

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**А.А. Щерба,  
Н.І. Поворознюк**

# **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ ПРИСТРОЇ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ. ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ**

**Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензент

*Чумак В.В.*, кандидат технічних наук, доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний  
редактор

*Лободзинський В.Ю.*, кандидат технічних наук, доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ р.)  
за поданням Вченої ради факультету/навчально-наукового інституту  
(протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ р.)*

У посібнику приділено увагу формуванню у студентів здатностей використовувати основні закони електротехніки та електромеханіки при поясненні принципів функціонування електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів; одержання теоретичних і практичних знань процесів перетворення енергії в електротехнічних пристроях та електротехнологічних комплексах; вміння визначати місце, роль та особливості функціонування окремих класів електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів в структурі загальної енергетичної системи. Предметом навчальної дисципліни є конструкція, принципи роботи, фізичні явища та процеси в електротехнічних пристроях та електротехнологічних комплексах; типові математичні методи дослідження електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів; основні характеристики електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів. Посібник призначений для здобувачів вищої освіти ступеня бакалавр за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Реєстр. № НП \_\_\_\_\_. Обсяг \_\_\_\_\_ авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© А.А.Щерба, Н.І.Поворознюк  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

# ІСТОРІЯ ЕНЕРГЕТИКИ І ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

## Вступ

Історія цивілізації пов'язана з енергією та її джерелами. Тисячі років ми залежали від енергії, яка нам потрібна, від сонячного світла, сили м'язів та вогню. Ми також покладаємось на сили природи: тепло та світло від сонця, сонячну енергію, що зберігається у викопному паливі та біомасі, вітер та воду, атомну енергію та тепло зсередини Землі.

Первинними джерелами енергії є ті, які безпосередньо створюють тепло, і їх можна поділити на невідновлювані джерела (вугілля, нафта, природний газ та ядерна енергія) та відновлювані джерела (гідроенергетика, біомаса, вітер, геотермальна та сонячна енергія). Вторинні джерела, такі як електроенергія та водень, вимагають для свого виробництва енергію з інших джерел.

Сама енергія зустрічається в декількох формах. М'язи, вода та вітер виробляють механічну енергію. Під час спалювання палива хімічна енергія перетворюється на теплову. Це тепло може бути використано безпосередньо або перетворено в механічну енергію для роботи двигунів та турбін для транспортування та виробництва електроенергії.

Предмет енергетики є складним і охоплює науку, техніку, сільське господарство, економіку, історію та політику.

## Перелік термінів та одиниць

Фізичні величини в області енергетики

потужність = швидкість передачі енергії; потік енергії

щільність енергії = кількість енергії на одиницю маси

коефіцієнт корисної дії перетворення енергії (або виробництва) = співвідношення випуску та введення

енергоємність = вартість товару чи послуги в одиницях енергії

Одиниці

1 ньютон = одиниця сили, яка виробляє прискорення 1 метр за секунду на об'єкті вагою 1 кілограм

1 джоуль (Дж) = кількість роботи, виконаної силою в один ньютон на відстані одного метра

1 Вт (Вт) = електричний потік 1 джоуль в секунду

1 кіловат (кВт) = 1000 Вт (швидкість електричного потоку) (= 3412 БТЕ або 3,6 млн джоулів)

1 мегават (МВт) = 1000 кіловат

1 кіловат-год (кВт-год) = 1 кіловат, використаний за 1 годину (норма з часом = кількість електроенергії)

1 кінська сила (к.с.) = 746 Вт

1 британський тепловий блок (Btu) = тепло, необхідне для підвищення температури 1 фунт води на 1 градус за Фаренгейтом. (= 1055 джоулів)

1 квадри Btu = 1 квадрильйон британських теплових одиниць  
1 барель (баррель) = 42 галони (барель сирої нафти дорівнює 5,80 мільйона BTE)

### **Історія енергетики і електроенергетики**

Коли гомініди вперше застосували вогонь, можливо, 250 000 років тому (1), вони почали довгий і складний шлях відкриттів та інновацій. Пошуки більш ефективних джерел енергії тривають і сьогодні. Наші основні потреби в енергії не змінилися - тепло, світло, виробництво та транспортування, - але зараз у нас є багато способів задоволення цих потреб та потреб сучасного суспільства, таких як телекомунікації. Людство пройшло багато етапів у розвитку джерел енергії.

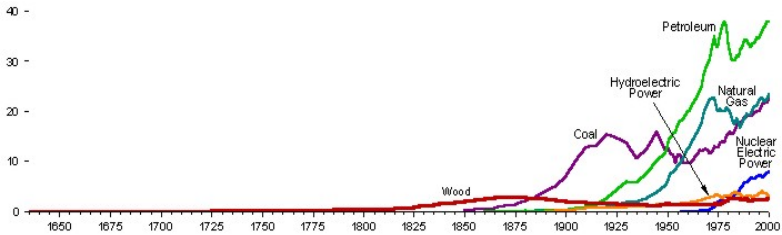
З самого початку вогонь був найважливішим фактором, а паливо включало дерево, деревне вугілля, торф, солому, сушений гній та тваринну олію. Будинки орієнтувались на сонце та вітер для опалення, охолодження та світла. М'язова сила людей та тяглових тварин використовувалася для полівання, сільського господарства, транспорту та виробництва. Розробка ефективних упряж збільшила силу тяглових тварин. Одна тварина зазвичай могла виконувати роботу трьох -п'яти робітників. Покращення розведення та харчування тварин збільшило це співвідношення до однієї тварини на 15 працівників (2). Веслові колеса, що працюють від людини, використовувались для зрошення по всій Азії. Користь від зрошення сільськогосподарських культур на критичних стадіях вирощування була величезною. Зрошувані поля можуть виробляти в 30 разів більше енергії харчування, ніж те, що споживають люди, що забезпечують енергію для переміщення води (2).

Великим розвитком в історії використання енергії стало використання води та вітру для транспортування. Докази використання човнів сягають 60 000 років тому (3), а вітряна енергія використовувалася для переміщення вітрильників ще в 3500 р. до н.е. Стародавні римляни, китайці та індійці використовували квадратні вітрила на своїх кораблях, тоді як араби використовували більш ефективний трикутний дизайн, який з часом був прийнятий у Західній Європі. Вітрильні кораблі продовжували залишатися основним транспортним засобом, поки у 1800-х роках їх не замінили пароплавні кораблі.

Вітер та воду також використовували для запуску вітряків та водяних коліс. Вітряні млини для помелу зерна використовувались в Персії з 640 року нашої ери, а пізніше були розроблені для перекачування води. Найдавніше вертикальне водяне колесо було розроблено в Греції приблизно в 200 р. До н. Е. Водяні колеса використовувались для подрібнення зерна та відкачування води для зрошення, а для зберігання води та збільшення тиску води споруджували греблі. Люди оселялися в містах у найкращих місцях уздовж річок. Винахід розподільного та колінчастого валів дозволив використовувати водяне колесо на лісопилних заводах та в чавуноливарних цехах, що в кінцевому підсумку

## Історія енергетики і електроенергетики

призвело до великих бавовняних заводів, побудованих у Європі та США у середині 1800-х років (4).



Малюнок 1. Споживання енергії в США за джерелами (квадрильйон БТЕ).

Рис. 3.1

Оскільки в 1600 -х роках у Європі було дефіциту деревини, все більше вугілля видобувалося і на більш глибоких глибинах. Щоб відкачати воду з шахт, Томас Сейвері та Томас Ньюкомен розробили перші парові машини на початку 1700 -х років. Ці двигуни могли працювати на вугіллі і не потребували живлення від вітру або води. Джеймс Ватт покращив ефективність цих двигунів протягом кількох років, з 1763 по 1775 рік (5). Це нове джерело механічної сили розпочало Індустріальну революцію, "одну з найглибших соціальних трансформацій в історії" (6). Цікаво, що Джеймс Ватт вважав пар високого тиску небезпечним і не рекомендував використовувати парові машини на вугіллі для транспортування. Його патент на двигун запобігав новим інноваціям до 1800 року, коли термін дії патенту закінчився (2). Невдовзі парову машину адаптували для використання на заводах, річкових човнах, кораблях та залізницях (4). Люди вважали ці двигуни більш зручними та надійними та менш дорогими, ніж використання води, вітру та коней. Покращення їх конструкції різко підвищило продуктивність. До 1900 року парові машини були в 30 разів потужнішими і в 10 разів ефективнішими, ніж ті, що були розроблені в 1800 р. (2). У США деревина використовувалася так само, як і вугілля, особливо на Заході, але попит на вугілля по всій країні в чотири рази збільшився між 1880 і 1918 роками (мал. 1). Велика кількість вугілля була потрібна для виробництва заліза та сталі, а також для залізничної промисловості.

Двигуни, достатньо малі для дорожніх транспортних засобів, були розроблені лише на початку 1900 -х років, коли стали доступними нові види палива, очищеного з сирової нафти. Гас був вперше перегнаний з нафти в 1853 році і був використаний у лампах, замінивши китову олію. Саме з цією метою було розпочато розвідку нафти (2), починаючи з першої сучасної нафтової свердловини в Пенсільванії в 1859 р. Подальший розвиток промисловості приблизно на початку століття призвів до створення свердловин у Румунії, США, на Суматрі,

в Мексиці, Іран та інші країни. Мережа нафтопроводів була розроблена в США у 1880 -х роках. Двигун внутрішнього згоряння з прототипами ще в 1806 р. Був далі розроблений Ніколаусом Отто, Карлом Бенцем, Готлібом Даймлером та Рудольфом Дизелем (7, 2). Перший автомобіль був розроблений і виготовлений Карлом Бенцем до 1888 року, і промисловість стрімко зростала. Ренсом Е. Олдс розпочав виробництво виробничих ліній у 1902 р., яке було подальшим розвитком Генрі Форда, починаючи з 1914 р. (8).

За цей час змін відбулися інші події у сфері використання енергії. Спираючись на попередні наукові відкриття, такі винахідники, як Майкл Фарадей, Томас Едісон, Нікола Тесла, Френк Спраг, Джордж Вестінгхаус та Олександр Грехем Белл, привели нас до другої промислової революції, яка працює на електриці. Починаючи з 1880-х років, паротурбінні електростанції та гідроелектростанції виробляли електроенергію за допомогою електромагнітних генераторів. З часом електричні візки та електричні ліхтарі та обігрівачі почали замінювати коней, гас, вугілля та деревину. Розвиток змінного струму та трансформатора дозволили передавати електрику більш ефективно та на більші відстані. Тепер електростанції могли бути розташовані подальше від кінцевих споживачів: заводів та споживачів (4, 9).

Подальший розвиток гідроелектростанцій та більших, більш ефективних установок, що працюють на викопному паливі, тривало. У США попит на електроенергію зростав у середньому на 12 відсотків на рік з 1901 по 1932 рік (10). У 1930 -х роках федеральний уряд почав як регулювати, так і виробляти електроенергію, а також субсидувати сільські електричні кооперативи. З 1930 -х по 1950 -ті роки по більшій частині сільської Америки були побудовані електричні лінії (10).

Найбільші нафтові родовища були відкриті між 1927 і 1958 роками в регіоні Перської затоки. Вартість електроенергії впала, коли ці запаси нафти були розроблені в 1940-1950 -х роках. Оскільки все більше дизельного палива стало доступним, залізнична промисловість перейшла на тепловози. Попит на дизельне паливо для вантажних автомобілів та бензин для автомобілів також різко збільшився за цей час. Трубопроводи природного газу були побудовані в США з 1945 року, і незабаром природний газ широко використовувався для опалення. Споживання нафти та природного газу перевищило споживання вугілля у 1947 р., незважаючи на постійну наявність вугілля та збільшення кількості вугілля, необхідного для виробництва електроенергії (Малюнок 1). Через високу енергетичну цінність та наявність імпортової нафти багатьох країн перейшли від використання деревини безпосередньо до нафти без неї незважаючи на запаси вугілля в деяких із цих країн (2).

У 1950 -х роках поділ ядер було вперше використано для виробництва електроенергії. Однак використання ядерної енергії не розповсюдилося так швидко, як використання інших джерел енергії, через вартість та занепокоєння щодо безпеки та поводження з відходами (4).

## Історія енергетики і електроенергетики

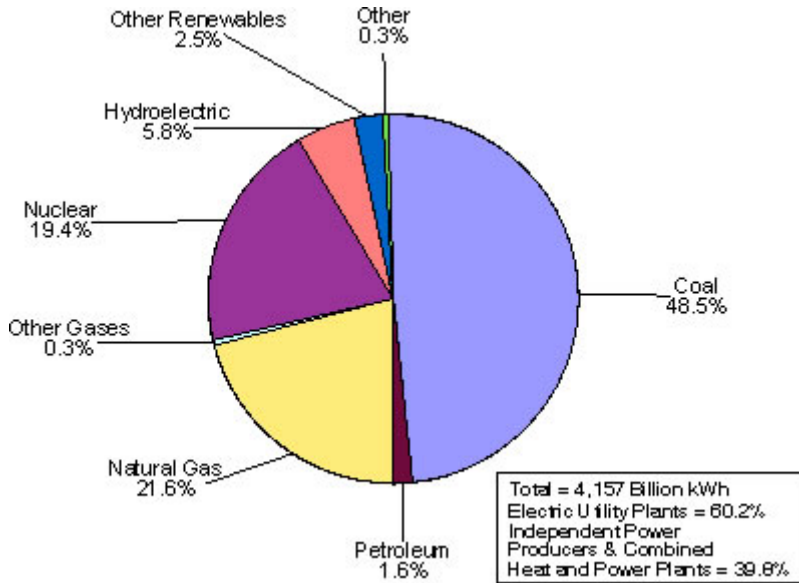


Рис. 3.1

У всьому світі виробництво викопного палива експоненціально зросло з 1800 р. Видобуток вугілля зріс у 100 разів з 1810 по 1910 р. І в п'ять разів з 1910 по 1990 р. Видобуток сирої нафти збільшився у 300 разів з 1880 по 1990 р., А видобуток природного газу збільшився у 1000 разів за той самий період часу (2). З точки зору наявності корисної енергії, протягом років з 1700 по 1850 рік у світі було 0,4 кг нафтового еквівалента на душу населення. Це значення збільшилося приблизно в 15 разів до 6,0 кг нафтового еквіваленту на душу населення до 2000 р. (2).

## **ВСЕСВІТНЯ ІСТОРІЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА**

Сувору термодинамічну перспективу повинна розглядати енергія - її спільне використання, якість, інтенсивність і ефективність перетворення - як ключовий фактор в історії людства. Енергетичні потоки і перетворення підтримують і обмежують життя всіх організмів, а отже, і суперорганізм, таких як суспільства і цивілізації.

Ніякі дії - будь то краший урожай, який покладе край голоду чи поразка агресивного сусіда - не можуть бути зроблені без використання і перетворення енергії за допомогою управління, інновацій або сміливості.

Неминуче наявність і якість конкретних первинних двигунів і джерел тепла, а також способи їх перетворення повинні були залишити глибокий слід в історії. Але ніяка енергетична перспектива не може пояснити, чому виникають складні сутності, такі як культури і цивілізації, і ніяка термодинамічна інтерпретація не може розкрити причини їх чудовою історії або вражаючого розмаїття вірувань, звичок і поглядів, у тому числі виникають їх дії. У цій статті досліджуються обидва цих протилежних погляди на енергетику і світову історію.

### **1. Детерміністичний погляд на історію**

Незліченні енергетичні імперативи - від сонячного потоку, що досягає Землі до мінімальних температур, необхідних для функціонування тисяч ферментів, - завжди формували життя на Землі, контролюючи навколишнє середовище і встановлюючи обмеження на функціонування організмів. Детерміністська інтерпретація ролі енергії в світовій історії здається природним пропозицією, оскільки історія розглядається як прагнення до підвищеної складності, що стало можливим завдяки оволодінню більш високими потоками енергії. Ще одна очевидна пропозиція - періодизація цього квесту на основі переважаючих первинних двигунів і домінуючих джерел тепла. Цей підхід поділяє еволюцію людського виду на окремі енергетичні епохи і підкреслює важливість енергетичних переходів, які відкривають більш потужні і більш гнучкі первинні двигуни і більш ефективні способи перетворення енергії. Можливо, найбільш інтригуючий висновок, який випливає з цього грандіозного погляду на історію, - це скорочення тривалості послідовних енергетичних епох і прискорення темпів грандіозних енергетичних переходів.

Перша енергетична ера почалася більше 300 000 років тому, коли людський вигляд, *Homo sapiens*, став диференціюватися від *Homo erectus*, і ця ера тривала до зародження осілих товариств близько 10 000 років тому. Протягом доісторичних часів всі спроби контролювати великі потоки енергії обмежувалися обмеженими можливостями людського метаболізму і неефективним використанням вогню. Одомашнення тяглових тварин і використання вогню для виробництва металів і інших міцних матеріалів стало першим великим енергетичним переходом: використання цих екstrasоматіческом енергій підвищило енергоемність доіндустріальних товариств більше ніж на порядок.



## Історія енергетики і електроенергетики

Другий перехід почався лише кілька тисячоліть тому; він не був таким універсальним, як перший, і його вплив справило глибокий і щодо ранне відмінність тільки в деяких місцях: воно відбулося, коли деякі традиційні суспільства замінили велику частину своїх м'язових зусиль водяними колесами і вітряними млинами, простими, але геніальними неживими двигунами. які були розроблені для перетворення двох загальних потоків відновлюваної енергії зі збільшенням потужності і ефективності.

Третій великий енергетичний перехід - заміна живих первинних двигунів двигунами і енергії біомаси викопним паливом - почався лише кілька століть тому в кількох європейських країнах і був здійснений усіма промислово розвиненими країнами протягом 20 століття. Цей перехід ще не завершився в більшості країн з низькими доходами, особливо в Африці. Останній енергетичний перехід відбувається з 1882 року, коли в Лондоні і Нью-Йорку були здані в експлуатацію перші в світі електростанції (обидві вугільні електростанції Едісона) і в Аплтон, штат Вісконсін (перша гідроелектростанція). З того часу все модернізується країни споживали все більшу частку викопного палива побічно у вигляді електроенергії і впроваджували нові режими виробництва первинної електроенергії - ядерне поділ, починаючи з середини 1950-х років, а пізніше також вітряні турбіни і фотоелектричні елементи - для підвищення загальний вихід цього найбільш гнучкого і найбільш зручного виду енергії. Другим ключовим атрибутом цього переходу було стійке відносне скорочення вугілля, відбите зростанням вуглеводнів, спочатку сирої нафти, а потім природного газу.

Підвищення якості життя було основною індивідуальною перевагою цього прагнення до більш високого використання енергії, яке призвело до збільшення врожаю продовольства, більшого накопичення особистого майна, достатку можливостей для освіти і відпочинку і значного збільшення особистої мобільності. Зростання населення світу, зростаюча економічна міць націй, розширення імперій і військового потенціалу, розширення світової торгівлі та глобалізація людських справ були ключовими колективними наслідками цього пошуку. Ці досягнення обговорюються в цій статті, і відзначаються обмеження первинних двигунів і джерел тепла, які були доступні протягом послідовних епох використання енергії, а також основні досягнення, які були досягнуті завдяки винахідливості і кращої організації.

## 2. САМІ РАННІЕ ЕРИ ЕНЕРГІЇ

Протягом довгого періоду доісторичних часів людську подобу покладався тільки на свою соматичну енергію, використовуючи м'язи для забезпечення основних запасів їжі, а потім для поліпшення жител і придбання мізерних матеріальних цінностей. Органічні імперативи (перш за все, масштабування основного метаболізму при збільшенні маси тіла до 0,75) і механічна ефективність м'язів (здатних перетворювати не більше 20-25% прийнятої їжі в кінетичну енергію) управляли цими зусиллями: здорові дорослі люди меншого

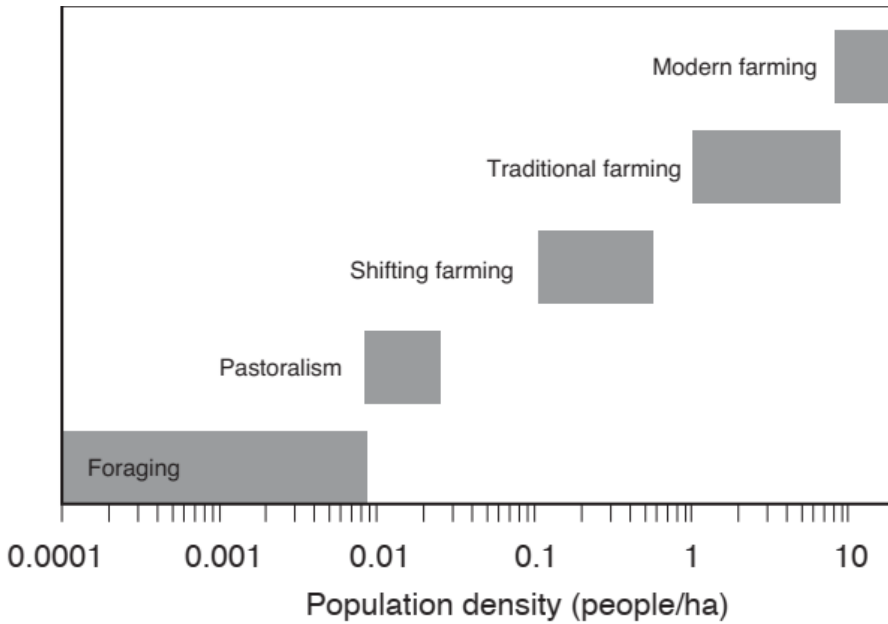
зростання не можуть витримувати корисну роботу при потужності більше 50-90 Вт і можуть розвивати потужність 102 Вт тільки під час коротких періодів зосередженого навантаження. Першого дії було досить для всіх, крім кількох крайніх форм збору їжі, а другі зусилля були потрібні для деяких форм полювання. Прості інструменти зробили деякі завдання з видобутку і переробці їжі більш ефективними і розширили досяжність людських м'язів.

Повернення енергії при видобутку їжі (енергія в їжі / енергія, що витрачається на збір і полювання) варіювався від ледь позитивного (особливо для деяких видів полювання) до досить високого по сезону (до 40-кратного при викопуванні бульб). Вибір зібраних рослин визначався, перш за все, їх доступністю, живильної щільністю і смаковими якостями, при цьому пасовища, як правило, пропонували кращий вибір таких видів, ніж густі ліси. Колективне полювання на великих ссавців принесла найбільшу чисту віддачу енергії (через високий вміст в них жиру), а також сприяла виникненню соціальної складності.

Лише кілька прибережних товариств, які збирають і полюють на морських видів, мали досить високу і надійну віддачу енергії (через сезонних міграцій риб або китів), так що вони могли жити в постійних поселеннях і витрачати надлишок енергії на складні ритуали і вражаючі художні твори ( для Наприклад, високі декоративні дерев'яні тотеми індійських племена Тихоокеанського Північно-Заходу).

Єдиним екстрасоматическом перетворенням енергії, освоєним доісторичними товариствами, було використання вогню для обігріву та приготування їжі, яке, безперечно, можна датувати приблизно 250 000 років тому. Можливий перехід від кормодобивання до змінного землеробства і потім до осілого землеробства був поступовим процесом, обумовленим рядом енергетичних, харчових і соціальних факторів: короткої і різкої сільськогосподарської революції не було. Ці зміни супроводжувалися зниженням чистої віддачі енергії від виробництва продуктів харчування, але це зниження мало позитивний наслідок у вигляді більш високих вкладень метаболічної енергії в розчищення земель і в посадку, прополку, добриво, збір врожаю та переробку сільськогосподарських культур, а також в зберігання зерна та т. Д. бульб, дозволили підтримувати набагато більш високу щільність населення. У той час як в найбільш багатих прибережних спільнотах кормодобиваюча тварин щільність становила менше 1 людини / км<sup>2</sup> (а у більшості суспільств кормовиробництва пропускна здатність була значно нижче 0,1 людини / км<sup>2</sup>), мінливий сільське господарство легко підтримувало б 20-30 чоловік / км<sup>2</sup> і навіть самі ранні екстенсивні форми осілих поселень. землеробство (стародавня Месопотамія, Єгипет і долина Хуанхе в Китаї) могло прогодувати 100-200 чоловік / км<sup>2</sup>, тобто 1-2 людини / га оброблюваної землі (рис. 1).

## Історія енергетики і електроенергетики



*РИСУНОК 1* Послідовні етапи осілого землеробства вимагали більших витрат енергії, але були здатні утримувати на 103–104 людей більше на одиницю землі, ніж це було на корм.

Збільшуються розміри полів неможливо було обробити повільної і копіткої лущенням, але оранка або надзвичайно втомлює, або, на важких ґрунтах, абсолютно неможлива без тяглової худоби. Таким чином, інтенсифікація землеробства призвела до використання першого важливого екстрасоматического джерела механічної енергії шляхом приручення тяглових тварин по всьому Старому Світу (в доколумбійській Америці були тільки в'ючні тварини). Тоді потрібні були постійні інвестиції в енергію для розведення і годування тварин, а також для виробництва більш складного інвентарю.

Дрібні корови матимуть потужність менше 200 Вт, сильніші тварини можуть витримати більше 300 Вт, а кращі бики і хороші ранні упряжні коні можуть споживати потужність понад 500 Вт, що еквівалентно праці 6-8 дорослих чоловіків (рис. 2). Таким чином, тяглові тварини прискорили роботу на полях, транспортуванні і переробці сільськогосподарських культур і підвищили продуктивність сільського господарства. Їх чисельність визначалася очевидним енергетичним імперативом: жодне суспільство не могло дозволити собі вирощувати кормові культури там, де урожай був недостатнім для забезпечення натурального раціону. Ті агроекосистеми, де пасовищні угіддя також були обмежені (рисові райони Азії), могли підтримувати лише відносно невелика кількість тяглових тварин.

Обмежену одиничну потужність м'язів можна було подолати шляхом масування людей або тяглових тварин, а поєднання інструментів і організованого використання масованої праці дозволило побудувати вражаючі конструкції виключно за допомогою людської праці. Масовані сили з 20-100 дорослих можуть забезпечити стійку потужність 1,5-8 кВт і витримати короткочасні навантаження до 100 кВт, яких достатньо для транспортування і зведення (за допомогою простих пристроїв) мегалітів і зведення вражаючих кам'яних споруд на всіх континентах, крім Австралії. На відміну від цього масового використання людської праці в будівництві, жодна культура Старого Вищого не зробила кроків до дійсно великомасштабного виробництва товарів, і атомізація виробництва залишалася нормою. Крім того, запеклий конфлікт, що живиться виключно м'язами людини, може відбуватися тільки у вигляді рукопашного бою або атаки стрілою, випущеною з відстані менше пари сотень метрів, межа визначається максимальною відстанню між витягнутим і зігнутою рукою при натягу цибулі. Зрештою, катапульти, натягнуті багатьма руками, збільшували масу снарядів, але не збільшували істотно максимальну дальність атаки.

Змінюються хлібороби розширили використання вогню до регулярного видалення рослинності, і перші осілі суспільства також використовували вогонь для виробництва цегли і контейнерів і для плавки металів, починаючи з міді (до 4000 р. до н.е.) і закінчуючи залізом (поширеним в деяких частинах країни). Старий Світ після 1400 р. н.е.). Деревне вугілля використовувалося для перетворення деревини в паливо з більш високою щільністю енергії (29 МДж / кг у порівнянні з не більше 20 МДж / кг для деревини та менше 15 МДж / кг для рослинних залишків) і екстра-класу (по суті бездимний і, отже, підходяще для спалювання в приміщенні в стаціонарних або переносних осередках). Але відкриті каміни і мангали перетворювали менше 10% продукції, що поставляється енергії в корисне тепло, а традиційне спалювання деревного вугілля перетворювало менше однієї п'ятої зарядженої енергії деревини в бездимний паливо. Первісні печі, використовувані для плавки металів, також були дуже неефективними, вимагаючи до 8-10 одиниць деревного вугілля на одиницю чавуну. Виниклий в результаті високий попит на деревину став основною причиною великого збеліснення, але майже повне зникнення лісів в частинах Середземномор'я (Іспанія, Кіпр і Сирія) і на Близькому Сході (Іран, Афганістан) було викликано виплавою міді, а не залізо.

Дрібномасштабна і дуже енергоємна металургія означала, що жодне раннє суспільство не могло виплавляти досить металу, щоб зробити його домінуючим матеріалом в повсякденному використанні, а прості машини, сільськогосподарський реманент і домашнє начиння давнини залишалися в переважній більшості дерев'яними. Ситуація докорінно змінилася тільки тоді, коли після 1750 року коксохімічна виплавка почала виробляти недороге залізо. Точно так же обмежена сила воли, найбільш доступних тяглових тварин, яких рідко годували концентратами, означала важкий темп польових операцій: оранка гектара землі. суглинними поле з парою цих тварин було легко в чотири рази

## Історія енергетики і електроенергетики

швидше, ніж розпушування тієї ж землі, але пара дебелих коней могла б виконати ту ж задачу менш ніж за половину часу, необхідного бикам. А поєднання слабкості тварин, неефективною упряжі і поганих (грунтових) доріг сильно обмежувало розмір максимальних вантажів і найбільшу дальність щоденних поїздок.

Європейська античність також побачила перші застосування гидротрансформаторів з приводом від води. Їх походження неясно, з першою згадкою про їхнє існування Антипатр Фессалонікійський в першому столітті до нашої ери описав їх використання в помелі зерна. Найбільш ранні колеса були горизонтальними, вода спрямовувалася через похилий дерев'яний жолоб на дерев'яні лопаті, прикріплені до валу, який був безпосередньо прикріплений до жорно нагорі. Більш ефективні вертикальні водяні колеса, вперше згадані Вітрувієм в 27 м до н.е., обертали жорна за допомогою прямокутних шестерень і працювали з потоками над головою, грудьми або недокус.

Хоча було кілька установок римських водяних коліс - можливо, найбільш примітно установка з 16 коліс в Барбегале близько Арля потужністю понад 30 кВт - дешевий рабська праця явно обмежував поширення цих машин.

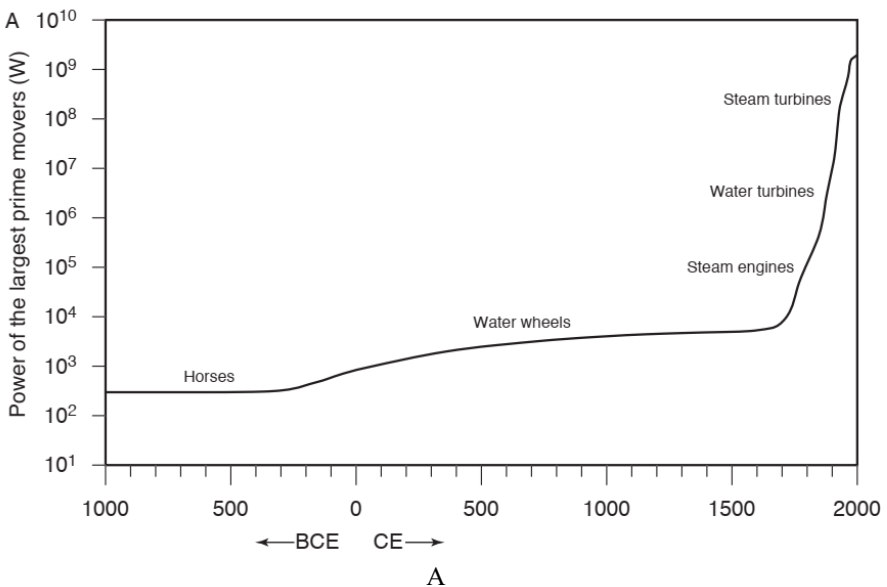
### 3. СЕРЕДНЬОВІЧНІ І РАННЄ СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ

Переважання морського первинних двигунів поширювалося на всі середні століття, але їх ефективність підвищилася, і до них все частіше приєднувалися поступово більш потужні перетворювачі поточної води і вітру. У середньовіччі зростання людини не показав помітного зростання, але поліпшені конструкції деяких машин з приводом від людини могли більш ефективно використовувати силу м'язів. Бігові колеса, що приводяться в рух людьми і тваринами, застосовувалися при будівництві висотних будівель, а також при навантаженні і розвантаженні суднових вантажів. Поєднання розведення, кращого корми, більш ефективної упряжки і кування в кінцевому підсумку підвищило продуктивність кращих тяглових тварин на 50% в порівнянні з можливостями, що переважали в давнину.

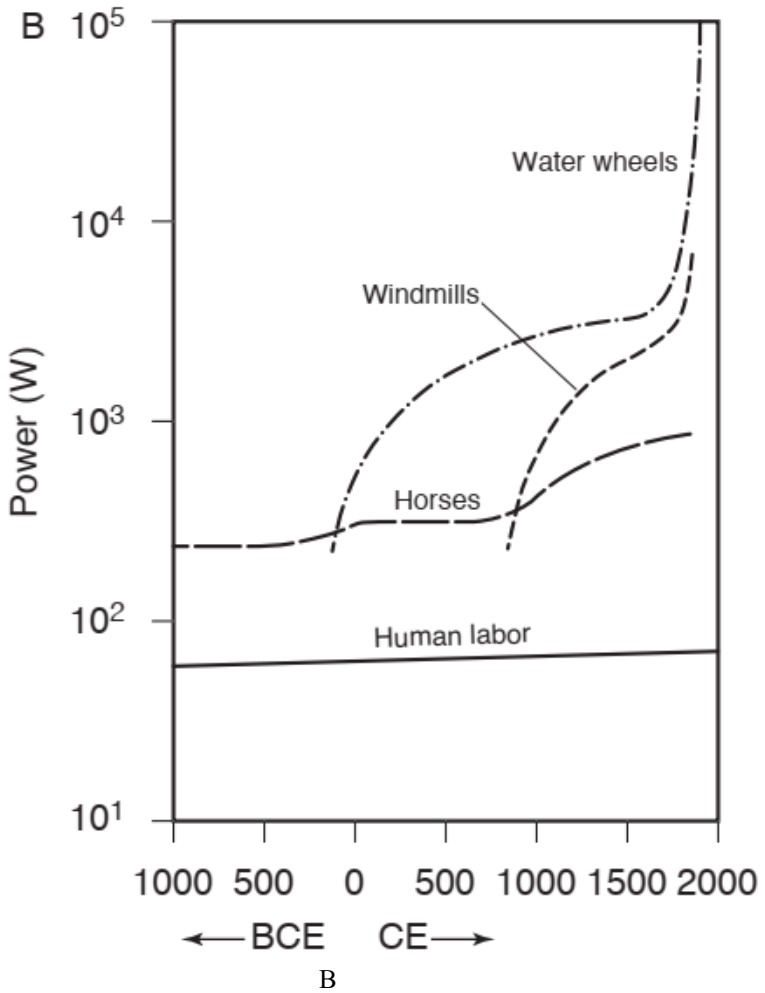
Нашийник, що оптимізує розгортання потужних м'язів грудей і плечей, з'явився в Китаї в V столітті нашої ери, а його поліпшена версія стала поширена в Європі п'ять століть тому. Приблизно в той же час стали поширені залізні підкови, що запобігають надмірний знос копит і поліпшують зчеплення з дорогою. Але потрібні були сторіччя, перш ніж інтенсифікація землеробства з більш широким поширенням сівозмінні харчових і кормових (особливо зернобобових) видів збільшила доступність концентрованих кормів і дозволила більш важким робочим тягловим тварин. Протягом 18-го століття вважалося, що добрий кінь еквівалентна 10 чоловікам, або принаймні 700 Вт, а кращі коні в кінцевому підсумку перевершували потужність, еквівалентну 1 кВт. У той час як пара ранньосередньовічних биків могла витримувати не більше 600 Вт, пара хороших коней в Європі раннього Нового часу забезпечувала потужність 1,2 кВт, а великі упряжки коней (до 40 голів) використовувалися в Сполучених

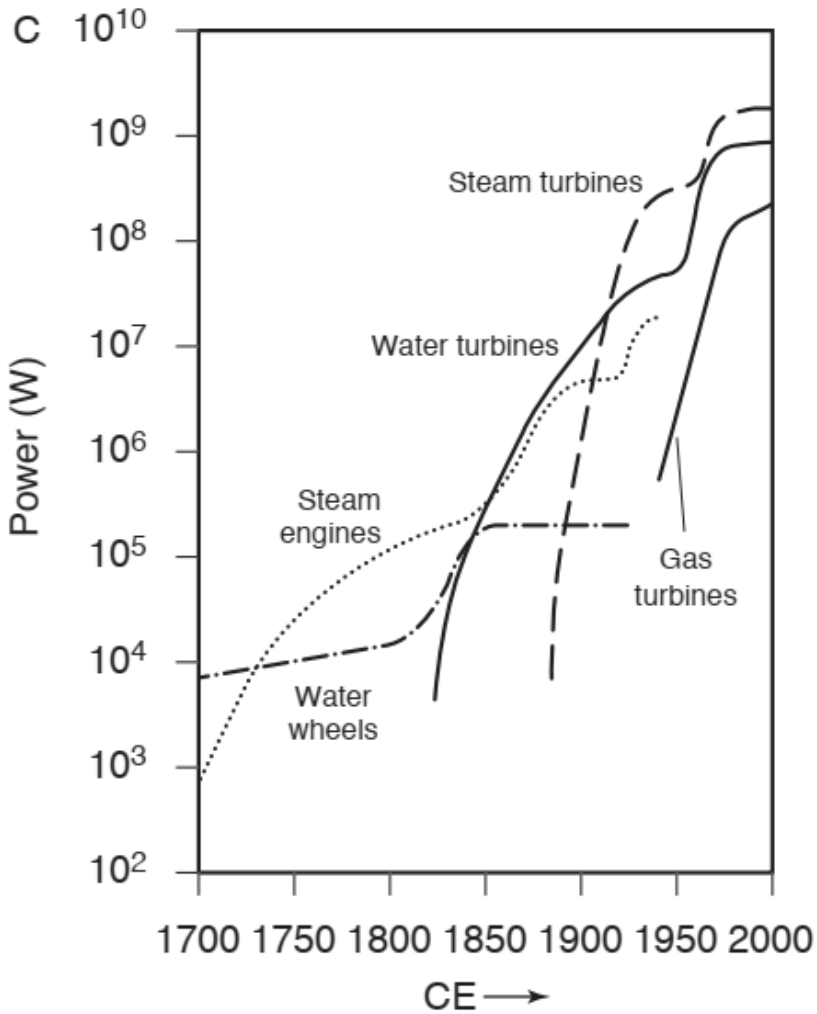
Штатах після 1870 року, аби тягнути бригадні плуги або плуги. Перші зернові комбайни мали тягову потужність від 8 до 30 кВт.

Деякі середньовічні суспільства почали покладатися на неживі первинні двигуни для виконання ряду складних завдань, включаючи подрібнення зерна, пресування масла, розпилювання деревини, приведення в дію сільфонов печей і ковальських молотів, а також механізацію виробничих процесів, починаючи від протягування дроту і закінчуючи глазуруванням плитки. Водяні колеса були першими машинами, які отримали широке поширення, і знаменита Книга Судного дня свідчить про те, наскільки вони були поширені в Англії в кінці 11 століття: в ній перераховані 5624 водяні млини в південній і східній Англії, по одній на кожні 350 осіб. Подальше збільшення максимальної потужності водяних коліс відбувалося повільно: треба було майже 800 років, щоб підвищити продуктивність на порядок. В Європі раннього Нового часу були розроблені щодо дуже великі колеса з водяним приводом, і, хоча типова потужність цих дерев'яних машин залишалася обмеженою (до 1700 року вони становили в середньому менше 4 кВт), вони були найпотужнішими первинними двигунами епохи раннього Нового часу (рис . 2).



## Історія енергетики і електроенергетики





C

РИСУНОК 2 Максимальна потужність первинних двигунів, показана як послідовність перетворювачів з найбільшою ємністю за останні 3000 років (A) і детально показана для періодів від 1000 до н. Е. До 1700 р. Н. Е. Та 1700 р. Н. Е. До 2000 р. Н. Е. (B і C).

Кораблі з простими квадратними вітрилами використовувалися стародавніми цивілізаціями Старого Світу, але перші письмові згадки про вітряних машинах з'явилися приблизно через 1000 років після першої згадки про водяних колесах. У 947 році в звіті аль-Масуді описувалося їх використання для



## Історія енергетики і електроенергетики

підйому води для зрошення садів на території нинішнього східного Ірану, а перші європейські записи відносяться тільки до останніх десятиліть XII століття.

Згодом неефективні вітряки і раніше використовувалися нечасто в Середземномор'ї і на Близькому Сході, і тим більше в Індії і Східної Азії, і вони зазнали значного розвитку лише в невеликому числі європейських регіонів. Найбільш ранні європейські вітряки оберталися на масивній центральній стійці, яка зазвичай підтримувалася чотирма діагональними поперечками, їх потрібно було повертати проти вітру, вони були нестабільні при сильному вітрі, а їхня низька висота обмежувала їх ефективність.

Однак вони широко використовувалися під час помелу зерна і перекачування води (найбільш відомим прикладом є голландські дренажні млини), а також в деяких промислових операціях. Пост-млини поступово були замінені баштовими млинами і шатровими млинами, і на початку 17 століття голландські млини представили перші щодо ефективні конструкції лопатей (проте справжні аеродинамічні лопатки з аеродинамічними контурами і товстими передніми крайками виникли незадовго до кінця XIX століття. Століття), а після +1745 року англійський винахід використання веерного хвоста для приведення в дію заводного механізму автоматично повернуло вітрила проти вітру. Навіть з цими нововведеннями середня потужність вітряних млинів 18 століття залишалася нижчою 5 кВт.

Пізнє середньовіччя і початок Нового часу також були часом, коли енергія вітру використовувалася більш ефективно для великих морських подорожей Європи. Підйом Заходу явно багато в чому зобов'язаний безпрецедентне поєднання використання двох різних видів енергії: кращого і більшого, вітрильних кораблів, оснащених недавно розробленими важкими знаряддями. Коли середньовічні кораблі оснастили великою кількістю вищих і краще регульованих вітрил, збільшилися в розмірах і придбали рулі на кормі і магнітні компаси (обидва винайдені в Китаї), вони стали набагато ефективнішими і набагато більш керованими перетворювачами вітряна енергія. Ці кораблі несли спочатку португальських, а потім і інших європейських моряків у все більш сміливі подорожі. Екватор був пересічений в 1472 році, Колумб привів три іспанських корабля в Карибському морі в 1492 році, Васко да Гама обігнув мис Доброї Надії і перетнув Індійський океан в Індію в 1497 році, а в 1519 році «Вікторія» Магеллана зробила перше кругосвітне плавання навколо Землі. З цими плаваннями почалася невблаганна тенденція глобалізації.

Порох був ще одним китайським винаходом (в XI столітті), яке краще використовувалося європейцями. Китайці відлили свої перші рушниці до кінця 13 століття, але європейці відстали всього на кілька десятиліть. Протягом століть чудові європейські конструкції знарядь перетворили середньовічне мистецтво війни на суші і дали наступальне перевагу великим вітрильним кораблям. Очевидно, що поліпшення збройового справи було засновано на значні досягнення середньовіччя в технологіях видобутку руди і плавки металів, які

вичерпно описані в таких класичних творах, як томи Бірінгуччо і Агріколи 1540 1556 років відповідно.

Ці нововведення знизили потребу в енерговитратах, особливо в доменних печах для виробництва чавуну, які вперше з'явилися в долині нижнього Рейну до кінця 15 століття. У міру зростання обсягу цих печей крихкість деревного вугілля чинить перешкод висоту і річний обсяг окремих плавильних операцій.

Більші операції також вимагали використання гідроенергії (для вибухових робіт і подальшої кування металу), і ця вимога обмежувало розташування гірськими районами. Але головна проблема полягала в тому, щоб забезпечувати їх деревним вугіллям, і скрутне становище Англії - найкраща ілюстрація.

До початку 18 століття типова англійська піч виробляла тільки близько 300 тонн чавуну на рік, але при використанні не менше 8 кг деревного вугілля на кілограм заліза і 5 кг деревини на кілограм деревного вугілля річна потреба в ній становила приблизно 12000 тонн. Оскільки майже всі природні ліси зникли, деревина була вирубана за 10-20-річні ротації з листяних порід, що дають урожай від 5 до 10 т / га. Це означає, що для безперервної роботи потрібно близько 2000 га порослі листяних порід, коло радіусом 2,5 км. По всій країні (майже 20 000 тонн чавуну щорічно вироблялося протягом 1720-х років), це призвело (разом з деревним вугіллям, необхідним для кузень), по крайній мере, на 1100 км<sup>2</sup> приросту засипки. Щоб зробити 1 мільйон тонн за допомогою того ж процесу, треба було б помістити принаймні чверть Британських островів під мідну деревину, що очевидно неможливо. Однак, починаючи з середини 830-х років, Великобританія почала виплавляти більше 1 мільйона тонн заліза на рік, і тим не менше деякі ліси країни почали відростати; кокс і парові машини зробили це можливим.

#### **4. ПЕРЕХОДИ ДО СЬОГОДЕННЯ**

Тисячолітня залежність від живої енергії і палива з біомаси підійшла до кінця тільки поступово, і великий перехід до викопним видам палива і двигунів, що споживають паливо, мав початок і тривалість в залежності від країни. Відмінності в доступності та доступності пояснюють, чому традиційні джерела енергії використовувалися так довго після появи нових видів палива і первинних двигунів. Наприклад, чотири види різних первинних двигунів, крім людської праці, співіснували в деяких частинах Європи більше 150 років між кінцем 18 і серединою 20 століть, перш ніж двигуни внутрішнього згоряння і електродвигуни стали повністю домінуючими: тяглові тварини (як в сільському господарстві, так і в міському русі), водяні колеса (а з 1830-х років - водяні турбіни), вітряні млини і парові машини. У багатьох деревиноу Сполучених Штатах вугілля перевершив спалювання паливної деревини, і кокс став більш важливим, ніж деревне вугілля, тільки в 1880-х роках.

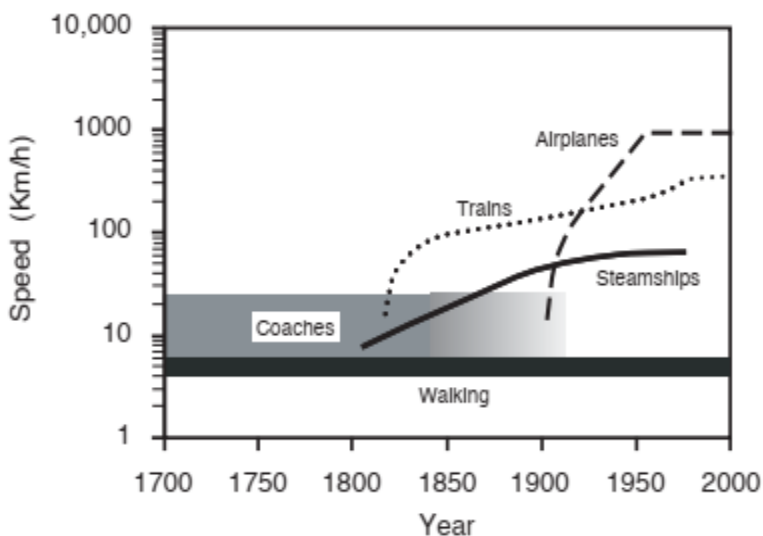
Більш того, епохальний перехід енергії від живих до неживих первинним двигунів і від біомаси до викопному паливу ще не пройшов своїм глобальним курсом. До 1900 року кілька європейських країн були майже повністю

## Історія енергетики і електроенергетики

забезпечені енергією за рахунок вугілля, але використання енергії в сільських районах Китаю в останній рік правління династії Цин (1911) мало відрізнялося від держави, яке переважало в китайських сільських районах 100 або 500 років тому. Навіть на початку 1950-х років більше половини загального обсягу первинної енергії в Китаї доводилося на деревну біомасу і рослинні залишки. Частина цих видів палива була знижена до 15% від загального енергоспоживання Китаю до 2000 р, але як і раніше перевищує 70% або навіть 80% для більшості країн Африки на південь від Сахари (в 2000 р традиційні види палива з біомаси становили приблизно 30 %, а в Бразилії - приблизно 25%), а в глобальному масштабі вона як і раніше становить майже 10%.

Індустріалізація Британських островів, звичайно, є найбільш відомим випадком раннього переходу від деревини до вугілля, і Англія була першою країною, яка здійснила перехід від деревини до вугілля в 16-17 століттях. Набагато менш відомий той факт, що Голландська республіка завершила перехід від деревини до торфу під час свого Золотого століття 17-го століття, коли вона також замінила більшу частину своїх потреб в механічній енергії вітрильними кораблями, які перевозили товари по внутрішніх каналах і на височинах моря і вітряні млини. В Англії та Уельсі процес почався як пряма заміна палива в суспільстві, де сукупний попит на деревне вугілля, будівництво суден і будинків, опалення і приготування їжі призвело до великої вирубки лісів. Використання вугілля як паливо для нового механічного первинного двигуна почалося тільки після 1700 року зі неефективною паровою машиною Ньюкомена. Окремий конденсатор Джеймса Ватта і інші удосконалення (запатентовані в 1769 році) перетворили існуючий двигун з машини обмеженою корисності (в основному перекачующою воду в вугільних шахтах) в первинний двигун безпрецедентною потужності, відповідний для безлічі різних завдань.

Вдосконалені машини Ватта як і раніше мали низький ККД перетворення (менше 5%), але його двигуни мали в середньому близько 20 кВт, що більше ніж в 5 разів більше, ніж у типових сучасних водяних млинів, майже в 3 рази більше, ніж у вітряних млинів, і в 25 разів вище продуктивності хорошою коні. Через сто років найбільші стаціонарні парові машини були в 10 разів ефективніше машин Ватта і мали потужність 1 MW. Після закінчення терміну дії патенту Ватта розробка парових двигунів високого тиску йшла швидкими темпами, радикально змінивши як наземні, так і морські подорожі. Протягом століть кінні екіпажі в середньому становили менше 10 км / год, але до 1900 року поїзди (перші регулярні рейси почалися в 1830-х роках) могли легко рухатися в 10 разів швидше і перевозити пасажирів з набагато більшим комфортом (рис. 3).



Малюнок 3 Максимальна швидкість транспортування протягом 1700–2000 років

Залізниця також різко знизилася вартість перевезення об'ємних вантажів в районах, де недорогий транспорт по каналах був неможливий. Пароплави скоротили міжконтинентальні подорожі і значно розширили і прискорили торгівлю на далекі відстані. Наприклад, трансатлантичний перехід, який для вітрильних суден 1830-х років займав більше 1 тижня, до 1890 року скоротився до менше ніж 6 днів.

Парові двигуни завжди будуть розглядатися як основні рушійні сили промислової революції, величезного розриву між традиційним і сучасним світом. Але це уявлення далеко не вірно, як і сама ідея промислової революції. Вугілля дійсно стимулював розширення виробництва чавуну, але текстильна промисловість, ключовий компонент цієї виробничої трансформації, зазвичай живилася енергією, як в Європі, так і в Північній Америці, за рахунок гідроенергії, а не за рахунок спалювання вугілля. Інновації для задоволення цього попиту включали реактивну водяну турбіну Бенуа Фурнейрон (в 1832 році) і турбіну з внутрішнім потоком Джеймса Б. Френсіса (в 1847 році). До кінця століття турбіни Френсіса, а також машини Пелтона (реактивні турбіни, представлені в 1889 році) допомогли запустити сучасне виробництво електроенергії з використанням води (тільки осьові турбіни Віктора Каплана є новинкою 20-го століття). Що стосується промислової революції, автор підтримує тих істориків,

## Історія енергетики і електроенергетики

які розглядають її як складний, багатогранний і тривалий процес, а не як чітко визначену інтенсивну трансформацію, що здійснюється за рахунок вугілля і пара, що генерується вугіллям. Зрештою, в 1850 році в Англії все ще було більше шевців, ніж вугільників, і більше ковалів, ніж робочих, а в Сполучених Штатах вугілля став давати більше енергії, ніж деревина, тільки на початку 1880-х років.

Ще один маловідомий факт: використання енергії вітру досягла свого піку одночасно з паровою машиною. Територіальне просування Америки на захід через вітряні Великі рівнини створило попит на вітряні млини для перекачування води для паровозів, домашніх господарств і великої рогатої худоби. Ці машини зазвичай виготовлялися з великої кількості досить вузьких планок, які кріпилися до суцільним або секційним колесам і зазвичай оснащувалися або відцентровим, або бічним регулятором і незалежними кермом напрямку. Загальний обсяг продажів цих відносно невеликих (менше 1 кВт) машин склав мільйони одиниць після 1860 року, написані в той час як потужність приблизно 30 000 більших вітряних млинів в країнах навколо Північного моря досягла піку приблизно в 100 МВт до 1900 року.

З точки зору початку 21-го століття ясно, що саме наступний енергетичний перехід - процес електрифікації та зростаюча глобальна залежність від вуглеводнів - залишив найбільший слід як в житті людей, так і в їх станах. економік і націй в 20 столітті. Винахід Томасом А. Едісоном і його соратниками комерційно життєздатної системи виробництва, передачі і використання електроенергії (починаючи тільки з ламп розжарювання) на початку 1880-х рр. Було стисло в надзвичайно короткий період. Потім був не менше інтенсивний період інновацій й фундаментальний внесок Джорджа Вестінгауз [який правильно наполягав на використанні змінного струму для передачі], Чарльза Парсона (який запатентував перший пар турбіну в 1884 р), Вільям Стенлі (який представив ефективний трансформатор в 1885 році) і Нікола Тесла (який винайшов електродвигун в 1888 році).

В результаті до кінця 1890-х років вся електрична система була в основному вдосконалена і стандартизована в тій формі, яка використовується до цих пір; перед нами стояло завдання продовжувати збільшувати розміри своїх підрозділів і підвищувати ефективність, і це завдання було вирішено багатьма вражаючими способами. З 1900 року максимальні розміри турбогенераторів виросли з 10 до 1,5 ГВт, напруга передачі змінного струму зросла з менш 30 кВ до більш ніж 700 кВ, а в 2003 році кращий ККД теплової генерації перевищив 40% (а з когенерацією 60%). У порівнянні з лише 5% в 1900 році. Недороге і надійне електропостачання змінило всі аспекти повсякденної діяльності, забезпечивши яскравий і доступне світло як в приміщеннях, так і на вулицях, забезпечуючи все ще зростаючу масу можливостей для економії часу і дозволяючи вдосконалення гаджетів, а також включення електрики в міські і міжміські поїзди.

Але самим революційним наслідком електрифікації стало промислове виробництво. Зворотно-поступальний рух парових двигунів повинно було передаватися обертовими валами і ременями, що призводило до тертя і великих втрат часу через нещасних випадків і дозволяло лише обмежене управління потужністю на окремих робочих місцях. Все це змінили недорогі електродвигуни всіх розмірів: ніяких валів і ременів, ніякого шуму і небезпечних аварій, тільки точне і гнучке індивідуальне керування потужністю. Американське виробництво було першим, хто здійснив перехід всього за три десятиліття: до 1929 року потужності промислових електродвигунів становили понад 80% всієї встановленої механічної потужності. Очевидним продуктом цієї трансформації стали високопродуктивні складальні лінії (піонером яких став Ford в 1913 році), як і багато нові спеціалізовані галузі. І хоча експериментальне початок радіо і телебачення передувало Першій світовій війні, тільки після Другої світової війни електрику стало джерелом енергії нового комп'ютерного століття з його величезним потоком інформації і розваг.

Електрика також було основним засобом полегшення тягаря жіночого домашньої праці, оскільки все більша кількість різноманітних машин і пристроїв взяли на себе виконання загальних обов'язків. Ще одним великим зміною, викликаним недорогий електроенергією, стало глобальне поширення кондиціонування повітря (вперше запатентовано Вільямом Керрієр в 1902 році). Його доступність відкрила американський Sunbelt для масової міграції з Snowbelt, і з 1980-х років кімнатні блоки також швидко поширилися серед більш заможних домогосподарств субтропічних і тропічних країн.

Ера сирової нафти почалася в той же десятиліття, що і епоха електрики, і три ключових інгредієнта сучасного автомобіля - бензиновий двигун Готліба Даймлера, електричне запалювання Карла Бенца і карбюратор Вільгельма Майбаха - зійшлися воєдино. в 1890-х роках, коли Рудольф Дизель також представив інший тип двигуна внутрішнього згоряння. У наступні десятиліття відбулися значні поліпшення, але не відбулося фундаментальних змін в основних принципах двигуна.

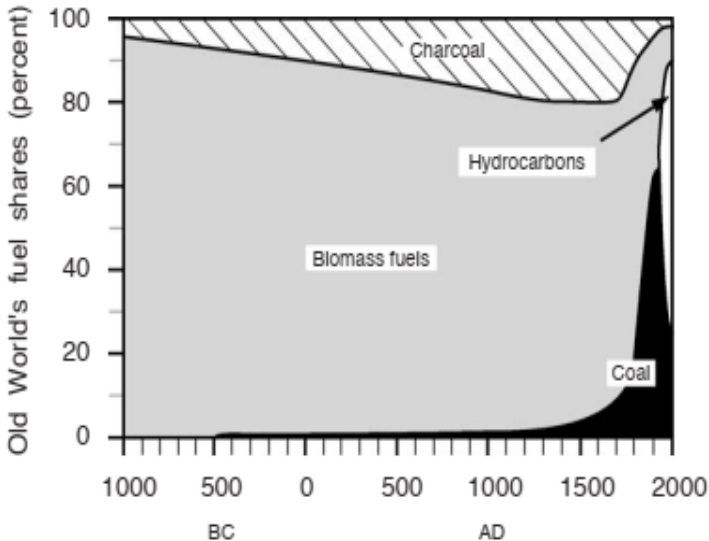
Тільки в Сполучених Штатах і Канаді володіння автомобілями досягло високого рівня перед Другою світовою війною; Західна Європа і Японія стали майже насиченими тільки в 1980-х роках. До 1904 року брати Райт побудували свій власний чотирициліндровий двигун з алюмінієвим корпусом і сталевим колінчастим валом, щоб забезпечити перший політ машини важчий за повітря, і перші 50 років комерційних і військових польотів переважали літаки зі зворотно-поступальним рухом. двигуни.

До 1944 року на перших бойових літаках були встановлені реактивні двигуни; Ера комерційних польотів на реактивних літаках почалася в 1950-х роках і була піднята на новий рівень з появою Boeing 747, представленого в 1969 році.

Транспорт був основною причиною більш високого попиту на сирову нафту, але рідке паливо, а потім і природний газ, також стали дуже важливі для

## Історія енергетики і електроенергетики

опалення, і обидва вуглеводню є відмінним сировиною для багатьох хімічних синтези. До 1950 року на сиру нафту і природний газ припадало приблизно 35% світових поставок первинної енергії, а до 2000 року їхня сукупна частка становила трохи більше 60% у порівнянні з приблизно 25% вугілля (рис. 4). Таким чином, викопне паливо забезпечує приблизно 90% всієї комерційної первинної енергії, а інша частина надходить від первинної (гідро- і ядерної) електроенергії. Незважаючи на велику кількість досліджень і громадський інтерес, нові поновлювані джерела енергії (перш за все, вітряні турбіни і фотоелектричні установки) як і раніше грають лише незначну роль, як і паливні елементи, чия висока ефективність перетворення і екологічно чиста робота пропонують набагато кращий спосіб перетворення газоподібних речовин. і рідке викопне паливо до кінетичної енергії, ніж при спалюванні, забруднює повітря.



Малюнок 4 Приблизні частки глобального споживання палива в період з 1000 року до н. Е. До 2000 року н. Е.

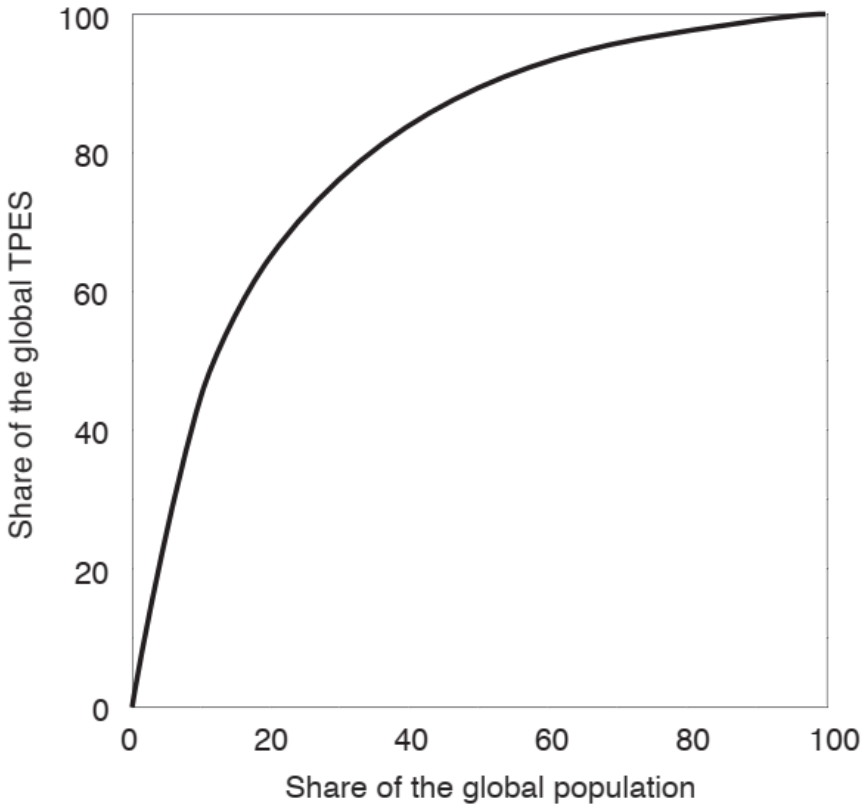
### 5. ЕНЕРГЕТИЧНА ЦИВІЛІЗАЦІЯ ТА ЇЇ АТРИБУТИ

Викопне паливо і електрику допомогли створити сучасний світ, підвищивши продуктивність фермерських господарств і, отже, різко скоротивши чисельність сільського населення, механізуюча промислове виробництво і дозволяючи робочій силі переміститися в сектор послуг, перетворюючи мегаполіси і мегаполіси в реальність, глобалізуюча торгівлю і культури, і нав'язуючи безліч структурних однаковість різноманітному світі. Неминуче всі ці події мали величезні індивідуальні і колективні наслідки, оскільки вони звільнили сотні мільйонів людей від важкої фізичної праці, поліпшили здоров'я і збільшили тривалість життя, сприяли поширенню грамотності, дозволили підвищити

матеріальний добробут, порушили традиційні соціальні та економічні обмеження і зробили західні ідеї особистої свободи і демократії в потужно привабливу (а також фанатично обурену) глобальну силу.

Але цими благами повністю або в значній мірі користується лише меншість (тільки 15%) населення світу.

Великий енергетичний перехід минулого століття всюди підвищив рівень життя, але не супроводжувався будь-яким вражаючим скороченням нерівності між багатими і бідними товариствами. У 2000 році 10% найбагатших людей світу споживали більше 40% всієї комерційної первинної енергії (рис. 5).



*ФІГУРА 5 Нерівність глобального комерційного використання енергії у 2000 році вказує на сильно опуклу форму кривої Лоренца: найбагатші 10% населення світу претендували приблизно на 45% усієї енергії, тоді як найбідніші 50% мали доступ лише до 10 % від загальної кількості.*

Сучасна високоенергетична цивілізація не тільки звільняє і творча, а й є величезним джерелом забруднення навколишнього середовища і деградації екосистем (можливо, навіть ставить під загрозу саме підтримка придатною для



## Історія енергетики і електроенергетики

життя біосфери), схильна до безлічі соціальних недуг, що посилюються міським життям, придбала зброю масового знищення і дуже вразливе для асиметричних загроз тероризму.

Люди, що живуть в багатьох суспільствах, сприймають рівні енергії, які контролюються окремими людьми і колективами, як належне, але твердження, які зараз висуваються щодо енергетичних ресурсів, як і раніше вражають, незалежно від того, порівнюються вони на всьому протязі людської еволюції або тільки протягом 20-го століття. Пікова потужність первинних двигунів зросла з менш 100 Вт постійного людського праці для збирачів пізнього неоліту до приблизно 300 Вт для тяглового бика ранньої античності і до 2 кВт для найбільших римських водяних коліс. Вдосконалені версії цих машин мали потужність приблизно 5 кВт до кінця першого тисячоліття СЕ і все ще не перевищували 8 кВт до 1700 року.

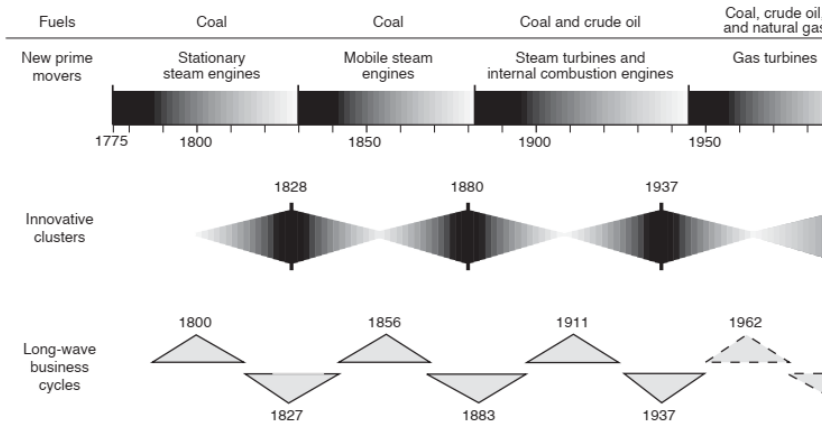
Через століття парові двигуни Ватта збільшили максимальну потужність до 100 кВт, до 1900 року найбільші парові і водяні турбіни мали потужність в 100 разів вище (10 МВт), а парові турбіни в кінцевому підсумку досягли свого максимуму в 1,5 ГВт (рис. 2). Таким чином, пікова потужність первинних двигунів, які забезпечують сталу потужність, зросла приблизно в 15 мільйонів разів за 10 000 років, причому більше 99% цього зростання припало на ХХ століття. Збільшення руйнівного розряду енергії було ще більш вражаючим: найбільше випробуване термоядерна зброя (100-мегатонн бомба Радянського Союзу в 1961 році) мав потужність на 16 порядків вище, ніж кінетична енергія стріли збирача.

Через швидке зростання світового населення порівняння на душу населення, природно, дають менші мультиплікатори. Незважаючи на майже чотириразове збільшення чисельності населення світу - з 1,6 мільярда в 1900 році до 6,1 мільярда у 2000 році - середньорічне валове пропозицію комерційної енергії на душу населення збільшилася більш ніж в чотири рази з 14 ГДж до приблизно 60 ГДж. У Сполучених Штатах споживання енергії на душу населення збільшилася більш ніж в три рази і склало приблизно 340 ГДж / рік, в Японії - більш ніж в чотири рази і склало трохи більше 170 ГДж / рік, а споживання викопного палива на душу населення, надзвичайно низька в 1900 році, зросла в 13 разів з 1950 року. і 2000, з трохи більше 2 до 30 ГДж / год. Ці досягнення набагато більш вражаючі, якщо висловити їх в більш значущих термінах як корисні енергетичні послуги. Консервативні розрахунки показують, що через більш високу ефективність перетворення світ у 2000 році мав у своєму розпорядженні принаймні в 25 разів більше корисної комерційної енергії, ніж в 1900 році, і відповідні кратні величини вище 30 в деяких швидко індустріальних країнах.

Можливо, найкращий спосіб порівняти постійний приріст енергії на рівні домогосподарств - це порівняти встановлену електричну потужність. У 1900 році в типовому міському будинку в США було всього кілька лампочок малої потужності, що в сумі становило менш 500 Вт. У 2000 році в повністю

електричному замиському будинку з кондиціонером і житловою площею близько 400 м<sup>2</sup> було більше. більше 80 вимикачів і розеток, готових до харчування всіх мислимих побутових приладів і споживають понад 30 кВт, по крайній мере, 60-кратний стрибок за одне століття. Три машини, що належать цьому дому, збільшили б загальну потужність, що знаходиться під його керуванням, майже до половини мегавата! Еквівалентна потужність - хоча нічого подібного зручності, універсальності, гнучкості і надійності послуг енергетичних послуг - була б доступна тільки римському латифундійському власнику сильних рабів Е6000 або землевласнику ХІХ століття, у якого було 3000 робочих і 400 великих тяглових коней. .

Оскільки впровадження нових джерел енергії і нових основних двигунів вимагає значних інвестицій, не дивно, що цей процес широко корелює з підйомом бізнес-циклів. Перша хвиля, добре задокументована Шумпетером, відповідає збільшенню видобутку вугілля і впровадження стаціонарних парових двигунів (1787-1814). Друга хвиля (1843-1869) була стимульована залізницями, пароплавами і металургією заліза, а третя хвиля (1898-1924) була стимульована зростанням виробництва електроенергії і заміною парових машин на електродвигуни в виробництві (Рис.6



Малюнок 6 Хронології великих енергетичних епох, інноваційних кластерів (за Г. Меншем) та довгохвильових бізнес-циклів (за Дж. А. Шумпетером) у 1775–1990 роках.

Початкові етапи енергетичних перетворень також в значній мірі корелюють з початком великих інноваційних хвиль, які, по всій видимості, викликані економічними депресіями. Перший інноваційний кластер, пік якого припав на 1828 рік, був пов'язаний в основному з мобільними паровими двигунами; друга група, що досягла піку в 1880 році, була пов'язана з впровадженням генерації

## Історія енергетики і електроенергетики

електроенергії і двигунів внутрішнього згоряння, а третя група, що досягла піку в 1937 році, включала газові турбіни, люмінесцентні лампи і ядерну енергетику. Розширення цих хвиль після Другої світової війни буде включати в себе глобальну заміну вугілля вуглеводнями і масове володіння автомобілями; ця хвиля була зупинена в 1973 р раптовим підвищенням цін на нафту, ініційованим Організацією країн-експортерів нафти.

### 6. Межі енергетичного детермінізму.

Якщо дивитися з строго біофізичної точки зору, енергія може мати безперечну першість серед змінних, що визначають хід історії, але якщо розглядати її з більш широких культурних і соціальних перспектив, вона може навіть не рахуватися *primus inter pares*. На додаток до всіх цих безперечним енергетичним імперативів існує безліч неенергетичних чинників, які ініціюють, контролюють, формують і спрямовують людські рішення по використанню і використанню енергії безліччю конкретних способів. Тільки якщо прирівняти якість життя або досягнення цивілізації до бездумного накопичення матеріальних благ, зростання споживання енергії стане неминучою передумовою. Але така примітивна точка зору виключає безліч моральних, інтелектуальних і естетичних цінностей, прищеплення, прагнення і відстоювання яких не мають ніякого відношення до будь-якого конкретного рівнем використання енергії.

Почнемо з того, що позачасові художні вираження не корелюють з рівнями або видами споживання енергії: бізони на знаменитих наскельних малюнках Альтаміри не менше елегантні, ніж бики Пікассо, намальовані майже 15 000 років тому. Слід також зазначити, що всі універсальні і стійкі етичні принципи, будь то свобода і демократія або співчуття і милосердя, виникли в давнину, коли неадекватне і неефективне енергопостачання становило лише невелику частину сьогоденного споживання. Наведемо кілька недавніх прикладів: Сполучені Штати прийняли провісного конституцію, коли країна все ще залишалася натуральним суспільством, що працюють на деревах; Навпаки, до свого розпаду Радянський Союз був найбільшим в світі виробником сирової нафти і природного газу, однак все, що ця країна могла запропонувати своїм громадянам, - це злиденне життя в страху, в клітці, яку їм не дозволяли залишити. Те, що політичні свободи не мають нічого спільного з використанням енергії, можна ясно побачити, переглянувши список найменш вільних країн світу: він включає не тільки бідні енергоресурсами Афганістан, В'єтнам і Судан, але також багаті на нафту Лівії і Саудівську Аравію.

Довгострокові тенденції зростання населення - ще одна ключова історична зміна, яку важко пов'язати зі змінами в енергетичній базі і рівнями використання енергії.

Поліпшення харчування можна розглядати як основну причину потроєння європейського населення між 1750 і 1900 роками, але таке твердження не можна погодити з ретельної реконструкцією середнього споживання енергії з їжею. Приклад Китаю ще більш переконливий: між 1700 і 1900 роками

династія Цин не побачила жодних серйозних змін в джерелах енергії і основних двигунах, а також не збільшилася в середньому використанні деревини та соломю на душу населення, але населення країни потроїлася і склало приблизно 475 чоловік . мільйон чоловік.

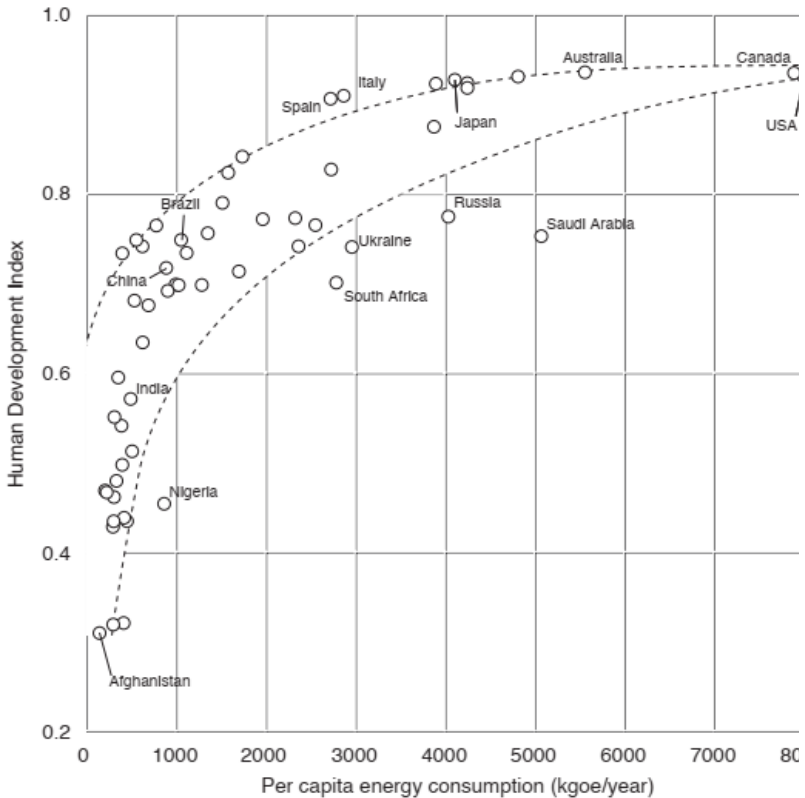
Навіть зв'язок між економічним обсягом виробництва і використанням енергії не так проста. Якщо дивитися з фізичної (термодинамічної) точки зору, економіки - це складні системи, які безперервно набувають і перетворюють величезні кількості викопного палива і електроенергії, і деякі дуже високі кореляції між рівнем використання енергії та рівнем економічних показників дозволяють припустити, що воно може бути пряма функція першого. Не доводиться сумніватися в тому, що послідовно змінюють один одного позиції економічної переваги і міжнародного впливу, якими володіли Голландська республіка в 17 столітті, Великобританія в 19 столітті і Сполучені Штати в 20 столітті, мали матеріальний генезис в ранній експлуатації палива, яке забезпечили більш високу чисту віддачу енергії і дозволили підвищити ефективність переробки (торф, вугілля і сира нафта відповідно).

Однак більш ретельний аналіз показує, що зв'язок між використанням енергії та економікою не може бути охоплена будь-якою легко піддається кількісній оцінці функцією, оскільки національні особливості виключають будь-які нормативні висновки і спростовують багато інтуїтивні очікування. Володіння рясними енергоресурсами не було гарантією національного економічного успіху, і їх фактичну відсутність не було перешкодою для досягнення завидного економічного процвітання. Довгий список багатих енергоресурсами країн, які, тим не менш, неправильно розпорядилися своїми станами, повинен включати, якщо назвати лише три найбільш помітних випадку, Радянський Союз, Іран і Нігерію. Список країн з низьким енергоспоживанням, які досягли успіху за будь-яким світовим стандартам, повинні очолити Японія, Південна Корея і Тайвань. І країнам не потрібно досягати певних рівнів споживання енергії, щоб мати порівняно високу якість життя.

Хоча очевидно, що гідне якість життя залежить від певних мінімумів енергоспоживання, ті країни, які зосереджені на правильній державній політиці, можуть отримати досить великі винагороди на рівнях, не набагато перевищують такі мінімуми, в той час як демонстративне надмірне споживання витрачає енергію без втрат. підвищення реальної якості життя. Суспільство, яке зацікавлене у справедливості і готове направити свої ресурси на забезпечення належного харчування, наявність якісного медичного обслуговування і доступність базового шкільної освіти, могло б гарантувати гідне фізичне благополуччя, високу тривалість життя, різноманітне харчування і досить хороші можливості для отримання освіти. річне споживання на душу населення всього 40-50 ГДж первинної енергії, перетвореної з ефективністю, що переважає в 1990-і роки.

## Історія енергетики і електроенергетики

Підвищення продуктивності, зниження малюкової смертності нижче 20/1000, підвищення середньої тривалості життя жінок вище 75 років і підвищення індексу людського розвитку (ІЛР) ПРООН вище 0,8, мабуть, вимагає не менше 1400-1500 кг н.е (кілограмів нафтового еквівалента) енергії на душу населення, а в 2000 році найкращі глобальні показники (дитяча смертність нижча



МАЛЮНОК 7 Ділянка Індексу людського розвитку проти середньорічного споживання комерційної енергії на душу населення у 2000 р., Який показує, що практично ніякого приросту якості життя не спостерігається при споживанні понад 2,6 метричних тонн нафтового еквіваленту

10/1000, середня тривалість життя жінок вище 80 років, ІЛР вище 0,9) вимагали не менше приблизно 2600 кг н.е. на душу населення (рис. 7).

Всі змінні якості життя відносяться до середнього споживання енергії на душу населення нелінійним чином, з явними відхиленнями від 40 до 70 ГДж на душу населення, з зменшується віддачею згодом і практично без

додаткових вигод, що супроводжують споживання вище 110 ГДж / на душу населення або 2,6 метричної тонни еквівалента сирової нафти.

Сполучені Штати споживають на душу населення рівно в два рази більше первинної енергії, ніж Японія або найбагатші країни Європейського Союзу (340 ГДж / рік проти 170 ГДж / рік), але було б безглуздо припускати, що життя американців вдвічі краще. Насправді Сполучені Штати відстають від Європи і Японії по широкому спектрі показників якості життя, включаючи більш високий рівень дитячої смертності, більшу кількість вбивств, нижчу наукову грамотність і меншу кількість вільного часу.

Нарешті, використання енергії мало допомагає в поясненні занепаду встановленого порядку. Тривалий занепад Західної Римської імперії не можна пов'язати з будь-якою втратою енергопостачання або різким ослабленням можливостей перетворення енергії, так само як і падіння французької монархії в 1780-х роках, крах царської імперії в 1917 році або націоналістичні настрої. Відступ з материкового Китаю в кінці 1940-х рр. І навпаки, багато історично далекоюсяжні консолідації (включаючи поступовий підйом Стародавнього царства Єгипту, підйом Римської республіки або підйом Сполучених Штатів) і блискавичний розширення влади (включаючи поширення ісламу в 7-8 століттях) або монгольське завоювання 13-го століття не може бути пов'язано ні з якими новими першими двигунами або з найкращим використанням переважного палива.

Між енергією і історією явно існує двоїста зв'язок. Джерела енергії та первинні двигуни обмежують можливості людської історії і визначають темп життя, і, при інших рівних, термодинаміка вимагає, щоб вища соціально-економічна складність підтримувалася більш інтенсивними потоками енергії. І все ж ні наявність рясних джерел енергії, ні високий рівень споживання енергії не гарантують безпеку нації, економічний комфорт або особисте щастя. Доступ до енергії та способи її використання обмежують варіанти дій людей, але не пояснюють джерела прагнень людей і причини того вибору, який вони роблять, і не визначають успіх чи невдачу окремих товариств в певний час в світі. історія. Справді, єдиний гарантований результат більш високого енергоспоживання - це збільшення навантаження на навколишнє середовище, глобальний вплив якої може поставити під загрозу саму населеність біосфери. Щоб цього не сталося, найбільш важливим вибором людства в майбутньому може стати обмеження використання енергії та, таким чином, початок абсолютно нового розділу історії.

### ІСТОРІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

#### Стародавні події

Задовго до того, як існували будь-які знання про електрику, люди знали про поштовхи від електричної риби. Стародавні єгипетські тексти, датовані 2750 р. До н. Е., Називали цих риб «громовержцем Нілу» та описували їх як «захисників» усіх інших риб. Тисячоліття пізніше знову повідомлялося про електричну рибу давньогрецькими, римськими та арабськими натуралістами та лікарями [1]. Кілька античних письменників, таких як Пліній Старший і Скрибоній Ларгус, засвідчили знеболюючий ефект ураження електричним сомом та електричними променями, і знали, що такі удари можуть проходити по провідних об'єктах [2]. Пацієнтів, які страждають на такі захворювання, як подагра або головний біль, скеровували торкатися до електричних риб у надії, що потужний поштовх може їх вилікувати. [3] Можливо, найдавніший і найближчий підхід до виявлення ідентичності блискавки та електрики з будь-якого іншого джерела слід віднести до арабів, які до 15 століття застосовували арабське слово для блискавки *ga'ad* (عَد) електричний промінь. [4]

Стародавні культури у Середземномор'ї знали, що певні об'єкти, такі як бурштинові палички, можна натирати котячим хутром для залучення легких предметів, таких як пір'я. Давньогрецький філософ Фалес з Мілета, який писав близько 600 р. До н. Е., Описав форму статичної електрики, зазначивши, що тертя хутра різними речовинами, такими як бурштин, викликає особливе приваблення між ними. Він зазначив, що бурштинові кнопки можуть притягувати світлі предмети, такі як волосся, і що, якщо вони натирають бурштин досить довго, вони навіть можуть отримати іскру для стрибка.

Приблизно в 450 р. До н. Е. Демокріт, пізніший грецький філософ, розробив атомну теорію, подібну до сучасної атомної теорії. Його наставнику, Левкіпу, приписують цю ж теорію. Гіпотеза Левкіппа і Демокріта вважала, що все складається з атомів. Але ці атоми, які називаються «атомос», були неподільними і незнищенними. Він заздалегідь заявив, що між атомами лежить порожній простір і що атоми постійно в русі. Він помилився лише в тому, що стверджував, що атоми бувають різних розмірів і форм, і що кожен об'єкт мав свою форму і розмір атома. [5] [6]

Об'єкт, знайдений в Іраку в 1938 році, датований приблизно 250 роком до нашої ери і названий Багдадською батареєю, нагадує гальванічний елемент і, за деякими даними, використовувався для гальванічного покриття в Месопотамії, хоча доказів цього немає

Події 17 століття



Вольтаїчна купа, перша батарея





## Історія енергетики і електроенергетики

Алессандро Вольта показує найдавнішу купу імператору Наполеону Бонапарту

Електроенергія залишатиметься не чим іншим, як інтелектуальною цікавістю протягом тисячоліть. У 1600 р. Англійський вчений Вільям Гілберт розширив дослідження Кардано про електрику та магнетизм, відрізнивши ефект кам'яного каменю від статичної електрики, отриманої шляхом натирання бурштину. [7] Він ввів нове латинське слово *electricus* ("бурштин" або "подібний до бурштину"), від *ήλεκτρον* [elektron], грецьке слово "бурштин") для позначення властивості притягувати дрібні предмети після тертя. [8] Ця асоціація породила англійські слова «електричний» та «електричний», які вперше з'явилися у друкованому вигляді в «Епідемії псевдодоксії» Томаса Брауна 1646 р. [9]

Подальшу роботу проводив Отто фон Геріке, який показав електростатичне відштовхування. Роберт Бойл також опублікував роботу [10].

### Події 18 століття

Незважаючи на те, що електричні явища були відомі протягом століть, у 18 столітті систематичне вивчення електрики стало називатися "наймолодшою з наук", а громадськість стала електрифікована найновішими відкриттями в цій галузі [11].

До 1705 р. Френсіс Хоксбі виявив, що якщо він помістив невелику кількість ртуті в склянку своєї модифікованої версії генератора Отто фон Геріке, вивів повітря з нього, щоб створити легкий вакуум, і розтер м'яч, щоб створити заряд, свічення було видно, якщо він поклав руку на зовнішню сторону м'яча. Це сяйво було досить яскравим, щоб його можна було прочитати. Здавалося, він схожий на вогонь Святого Елмо. Пізніше цей ефект став основою газорозрядної лампи, що призвело до неонових освітлення та ламп з ртутними парами. У 1706 році він створив "Машину впливу" для створення цього ефекту [12]. Того ж року він був обраний членом Королівського товариства [13].



*Бенджамін Франклін*

Хоксбі продовжував експериментувати з електрикою, роблячи численні спостереження та розробляючи машини для генерації та демонстрації різних електричних явищ. У 1709 р. Він опублікував фізико-механічні експерименти з різних предметів, які підсумували значну частину його наукової роботи.

Стівен Грей виявив важливість ізоляторів та провідників. К. Ф. дю Фей, побачивши його роботи, розробив теорію електрики про «дві рідини». [10]

У 18 столітті Бенджамін Франклін проводив масштабні дослідження електроенергії, продаючи своє майно для фінансування своєї роботи. У червні 1752 року він, як повідомляється, прикріпив металевий ключ до дна демпфрованої нитки повітряного змія і перемістив його на небесах під загрозою шторму [14]. Послідовність іскор, що стрибали від ключа до тильної сторони його руки, показала, що блискавка дійсно має електричний характер [15]. Він також пояснив парадоксальну поведінку банки Лейдена як пристрою для зберігання великої кількості електричного заряду, придумавши єдину рідину, теорію електрики двох станів.

У 1791 році італієць Луїджі Гальвані опублікував своє відкриття біоелектрики, продемонструвавши, що електрика - це середовище, за допомогою якого нервові клітини передають сигнали до м'язів. [10] [16] [17] Акумулятор або вольтовий ворс 1800 року Алессандро Вольти, виготовлений із чергування шарів цинку та міді, забезпечив вчених більш надійним джерелом електричної енергії, ніж електростатичні машини, які раніше використовувалися [16] [17].

### Події XIX століття [ред.]



*Сер Френсіс Рональдс*

Електротехніка стала професією наприкінці 19 століття. Практики створили глобальну мережу електричних телеграфів, і у Великій Британії та США були засновані перші інститути електротехніки, які підтримували нову дисципліну. Хоча неможливо точно визначити першого інженера -електрика, Френсіс Рональдс стоїть попереду поля, який створив працюючу телеграфну систему в 1816 році і задокументував своє бачення того, як світ може бути перетворений електрикою [18] [19]. Понад 50 років потому він приєднався до нового Товариства інженерів телеграфу (незабаром буде перейменовано на Інститут інженерів -електротехніків), де інші члени його вважали першим у їхній когорті [20]. Подарунок його великої електричної бібліотеки став значним благом для молодого Товариства.



*Майкл Фарадей з картини Томаса Філіпса с. 1841–1842 рр.*

Розвиток наукових основ електротехніки з використанням інструментів сучасних методів дослідження активізувався протягом 19 століття. Помітні події на початку цього століття включають роботи Георга Ома, який у 1827 р. кількісно оцінив залежність між електричним струмом та різницею потенціалів у провіднику, Майкла Фарадея, першовідкривача електромагнітної індукції 1831 р. У 1830 -х роках Георг Ом також сконструював ранню електростатичну машину. Однополярний генератор був вперше розроблений Майклом Фарадеєм під час його пам'ятних експериментів у 1831 році. Це був початок сучасних динамо- тобто електричних генераторів, які працюють за допомогою магнітного поля. Винахід промислового генератора, який не потребував зовнішнього магнітного живлення у 1866 році Вернером фон Сіменсом, зробив можливим велику серію інших винаходів.

У 1873 р. Джеймс Клерк Максвелл опублікував уніфіковану обробку електрики та магнетизму в «Трактаті про електрику та магнетизм», який стимулював кількох теоретиків мислити в термінах, описаних рівняннями Максвелла. У 1878 році британський винахідник Джеймс Уімшурст розробив апарат, який мав два скляні диски, встановлені на двох валах. Лише у 1883 році наукова спільнота отримала більш повне повідомлення про машину Уімшурста.



*Томас Едісон побудував першу у світі велику мережу електропостачання*

У другій половині 1800 -х років вивчення електрики в основному вважалося підрозділом фізики. Лише наприкінці 19 століття університети почали пропонувати дипломи в галузі електротехніки. У 1882 році Дармштадтський технологічний університет заснував перший у світі кафедру та перший факультет електротехніки. У тому ж році під керівництвом професора Чарльза Кросса Массачусетський технологічний інститут почав пропонувати перший варіант електротехніки на фізичному факультеті. [23] У 1883 р. Дармштадтський технологічний університет та Корнельський університет запровадили перші в світі курси вивчення електротехніки, а 1885 р. Університетський коледж Лондона заснував першу кафедру електротехніки у Сполученому Королівстві. Згодом Університет Міссурі створив перший факультет електротехніки в США у 1886 році [24].

За цей період комерційне використання електроенергії різко зросло. Починаючи з кінця 1870 -х років міста почали встановлювати масштабні електричні системи вуличного освітлення на основі дугових ламп [25]. Після розробки практичної лампи розжарювання для внутрішнього освітлення, Томас Едісон у 1882 р. увімкнув першу у світі публічну електромережу, використовуючи для забезпечення споживачів систему постійного струму напругою 110 вольт. Інженерні досягнення 1880 -х років, включаючи винахід трансформатора, призвели до того, що електромережі почали приймати змінний струм, який до цього часу використовувався переважно в системах дугового освітлення, як стандарт розподілу для зовнішнього та внутрішнього освітлення (з часом замінивши постійний струм для таких цілей) ). У США існувало суперництво, перш за все між Вестінгхаузом та системою Едісона, відомою як "війна течій" [26].



Джордж Вестінгхаус, американський підприємець та інженер, фінансово підтримав розвиток практичної мережі живлення змінного струму.

"До середини 1890-х років чотири" рівняння Максвелла "були визнані основою однієї з найсильніших і найуспішніших теорій у всій фізиці; вони зайняли своє місце як супутники, навіть суперники законів механіки Ньютона. Рівняння на той час також були введені в практичне використання, найбільш різко в нових технологіях радіозв'язку, що формується, але також у телеграфній, телефонній та електроенергетичній промисловості "[27]. До кінця 19 століття цифри прогресу електротехніки почали зароджуватися [28].



*Чарльз Протей Штейнметц близько 1915 року*

Чарльз Протей Стейнметц сприяв розвитку змінного струму, що зробило можливим розширення електроенергетичної промисловості США, сформулювавши математичні теорії для інженерів.

### Поява радіо та електроніки

Під час розвитку радіо багато вчених та винахідників зробили внесок у радіотехніку та електроніку. У своїх класичних УВЧ-експериментах 1888 р. Генріх Герц продемонстрував існування електромагнітних хвиль (радіохвиль), що спонукало багатьох винахідників та вчених намагатися адаптувати їх до комерційних застосувань, таких як Гульєльмо Марконі (1895) та Олександр Попов (1896).

Вперше міліметрову хвильову комунікацію дослідив Джагадіш Чандра Бозе протягом 1894–1896 років, коли він досяг надзвичайно високої частоти до 60 ГГц у своїх експериментах [29]. Він також запровадив використання напівпровідникових переходів для виявлення радіохвиль [30], коли він запатентував радіокристалічний детектор у 1901 р. [31] [32]



*Джагадіш Чандра Бозе в 1894 році*

### Події ХХ століття

Джон Флемінг винайшов першу радіолампу - діод - у 1904 році.

Реджинальд Фессенден визнав, що для забезпечення передачі мовлення необхідно створити безперервну хвилю, і до кінця 1906 року він надіслав першу радіомовлення. Також у 1906 р. Роберт фон Лібен та Лі Де Форест самостійно розробили підсилювальну трубку під назвою триод. [33] Едвін Говард Армстронг, що впроваджує технології для електронного телебачення, 1931 р. [34]

На початку 1920 -х років зростав інтерес до розробки вітчизняного застосування електроенергії [35]. Інтерес громадськості призвів до таких виставок із зображенням "будинків майбутнього", а у Великобританії у 1924 р. Було

створено Електричну жіночу асоціацію під керівництвом Керолайн Хаслетт, щоб заохотити жінок брати участь у електротехніці [36].

### **Роки Другої світової війни**

Друга світова війна показала величезний прогрес у галузі електроніки; особливо в радіолокації та з винаходом магнетрона Рендаллом і Бутом в Бірмінгемському університеті в 1940 р. В цей час було розроблено радіолокацію, радіозв'язок та радіоведіння літаків. Ранній електронно -обчислювальний пристрій Colossus був побудований Томмі Флауером із GPO для розшифровки кодованих повідомлень німецької шифрувальної машини Лоренца. У цей час також були розроблені передові підпільні радіопередавачі та приймачі для використання секретними агентами.

Американським винаходом на той час було пристрій для шифрування телефонних дзвінків між Вінстоном Черчіллем та Франкліном Д. Рузвельтом. Це називалося системою «Зелений шершень» і працювало шляхом введення шуму в сигнал. Потім шум видалявся на приймальному кінці. Німці цю систему ніколи не порушували.

У рамках Програми військової підготовки в США було проведено величезну роботу в галузі радіопеленгації, імпульсних лінійних мереж, частотної модуляції, схем вакуумних труб, теорії ліній електропередач та основ електромагнітної інженерії. Ці дослідження були опубліковані незабаром після війни в тому, що стало відоме як "Серія радіозв'язку", опублікована Макгроу-Гіллом у 1946 році.

У 1941 році Konrad Zuse презентував Z3, перший у світі повністю функціональний та програмований комп'ютер. [37]

### **Післявоєнні роки**

До Другої світової війни ця тема була загальновідомою як «радіотехніка» і була насамперед обмежена аспектами зв'язку та радіолокації, комерційного радіо та раннього телебачення. На цей час вивчення радіотехніки в університетах можна було проводити лише як частина ступеня фізики.

Пізніше, у повоєнні роки, коли почали розробляти споживчі пристрої, сфера розширилася, включивши сучасне телебачення, аудіосистеми, Ні-Фі, а згодом комп'ютери та мікропроцесори. У 1946 році ENIAC (електронний числовий інтегратор та комп'ютер) Джона Преспера Еккерта та Джона Мочлі послідували за початком обчислювальної ери. Арифметичні характеристики цих машин дозволили інженерам розробляти абсолютно нові технології та досягати нових цілей, включаючи місії «Аполлон» та посадку НАСА на Місяць. [38]

У середині-наприкінці 1950-х років термін радіотехніка поступово поступився місцем назві електроніка, яка потім стала окремим предметом університетського диплому, який зазвичай викладався поряд з електротехнікою, з якою він був пов'язаний через деякі подібності.

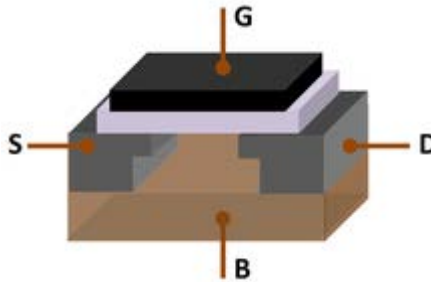


### Твердотільна електроніка

Дивіться також: Історія електронної інженерії, Історія транзистора, Винахід інтегральної схеми, MOSFET та твердотільна електроніка



*Копія першого працюючого транзистора, точкового контактного транзистора.*



*Металооксидно-напівпровідниковий польовий транзистор (MOSFET), основний елемент сучасної електроніки.*

Першим працюючим транзистором був точковий контактний транзистор, винайдений Джонами Бардіном та Уолтером Хаузером Бретеїном під час роботи під керівництвом Вільяма Шоклі в Телефонних лабораторіях Белла (BTL) у 1947 р. [39] Потім вони винайшли біполярний транзистор у 1948 р. [40] Хоча транзистори раннього переходу були відносно громіздкими пристроями, які було важко виготовити на основі масового виробництва [41], вони відкрили двері для більш компактних пристроїв.

Процес пасивування поверхні, який електрично стабілізував поверхні кремнію за допомогою термічного окислення, був розроблений Мохамедом М. Аталлою в BTL у 1957 р. Це призвело до розвитку монолітної мікросхеми інтегральної схеми. Першими інтегральними схемами були гібридна інтегральна схема, винайдена Джеком Кілбі в Texas Instruments у 1958 році, і монолітна

мікросхема інтегральної схеми, винайдена Робертом Нойсом у Fairchild Semiconductor у 1959 році.

MOSFET (польовий транзистор з оксидом металу та напівпровідника, або MOS-транзистор) був винайдений Мохамедом Аталлою та Давоном Кангом у BTL у 1959 р. [47] [48] [49] Це був перший по-справжньому компактний транзистор, який можна було мініатюрувати та масово виробляти для широкого спектру використання. [41] Він здійснив революцію в електронній промисловості [50] [51], став найбільш широко використовуваним електронним пристроєм у світі. [48] [52] [53] МОП -транзистор є основним елементом у більшості сучасних електронних пристроїв [54] [55] і займає центральне місце в революції електроніки [56], революції мікроелектроніки [57] та цифровій революції [49] [58] [59]. ] Таким чином, МОП -транзистор вважається народженням сучасної електроніки [60] [61] і, можливо, найважливішим винаходом в електроніці [62].



Джон Бардін, Вільям Шоклі, Уолтер Браттейн - транзистор (1947)



Мохамед М. Аталла - пасивація кремнію (1957) та транзистор MOSFET (1959)



Роберт Нойс - монолітна мікросхема з інтегральною схемою (1959)

## Історія енергетики і електроенергетики



• Давон Канг - транзистор MOSFET (1959)



• Гордон Мур -  
Закон Мура (1965)



• Федеріко Фаггін-МОП-транзистор із силіконовими затворами (1968) та мікропроцесор (1971)



• Марсіан Хофф - мікропроцесор (1971)



Масатосі Шима, Стенлі Мазор - мікропроцесор (1971)

MOSFET дозволив побудувати мікросхеми інтегральної мікросхеми високої щільності. [48] Аталла вперше запропонувала концепцію мікросхеми MOS IC (MOS IC) у 1960 році, а потім Канг у 1961 році [41] [63]. Найдавніший експериментальний чіп MOS IC, який був виготовлений, був побудований Фредом Хейманом та Стівеном Хофштейном у лабораторіях RCA у 1962 р. [64] Технологія MOS дозволила закон Мура, подвоєння транзисторів на мікросхемі мікросхеми кожні два роки, передбачений Гордоном Муром у 1965 р. [65] Технологія MOS із силіконовими воротами була розроблена Федеріко Фаггіном у Fairchild у 1968 р. [66] З тих пір МОП -транзистор є основним будівельним елементом сучасної електроніки. [49] [67] [68] Масове виробництво кремнієвих МОП-транзисторів та мікросхем з інтегральною схемою МОП, а також безперервна мініатюризація масштабування МОП-транзисторів з експоненціальними темпами (як передбачав закон Мура), з тих пір призвели до революційних змін у технологіях, економіці, культурі та мисленні. [69]

Програма "Аполлон", яка завершилася висадкою астронавтів на Місяць з "Аполлоном 11" у 1969 році, стала можливою завдяки прийняттю НАСА досягнень у галузі напівпровідникових електронних технологій, включаючи МОП-транзистори на Міжпланетній моніторинговій платформі (IMP) [70] [71] та кремнієві мікросхеми в комп'ютер керівництва Apollo (AGC). [72]

Розвиток технології інтегральних мікросхем MOS у 1960 -х роках призвів до винаходу мікропроцесора на початку 1970 -х років [73] [55] Першим однокристальним мікропроцесором був Intel 4004, випущений у 1971 р. [73] Він розпочався з "Проекту Busicom" [74] як тричіпового процесора Масатосі Шими у 1968 р. [75] [74], перш ніж Тадаші Сасаки від Sharp розробив конструкцію однокристального процесора, яку він обговорив з Busicom та Intel у 1968 р. [76] Потім Intel 4004 був розроблений і реалізований Федеріко Фаггіном в Intel за допомогою своєї технології MOS із силіконовими воротами [73] разом з Марсіаном Хоффом та Стенлі Мазором та Масатосі Сімою від Busicom [74]. Це спровокувало розвиток персонального комп'ютера. За 4004, 4-розрядним процесором, у 1973 році послідував 880-розрядний процесор Intel 8080, що дозволило створити перший персональний комп'ютер-Altair 8800. [77]

### ІСТОРІЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Електронна інженерія як професія виникла завдяки технологічним удосконаленням у телеграфній промисловості наприкінці 19 століття та в радіо та телефонній промисловості на початку 20 століття. Люди тяжіли до радіо, залучені технічним захопленням, яке воно викликало, спочатку в отриманні, а потім у передачі. [2] Багато хто, хто почав мовлення у 1920 -х роках, стали "аматорами" в період до Першої світової війни [3]. Сучасна дисципліна електронної інженерії значною мірою виникла внаслідок розробки телефонного, радіо- та телевізійного обладнання та великого обсягу розробки електронних систем під час Другої світової війни радіолокаційних, гідролокаційних, систем зв'язку та передових боєприпасів та системи озброєння. У міжвоєнні роки цей предмет був відомий як радіотехніка. Слово електроніка почало вживатися у 1940 -х роках [4] Наприкінці 1950 -х років почав з'являтися термін електронна інженерія.

Електронні лабораторії (наприклад, Bell Labs), створені та субсидовані великими корпораціями в галузі радіо, телебачення та телефонного устаткування, почали виробляти низку електронних досягнень. Електронна промисловість була революційно здійснена винаходами першого транзистора 1948 р., Мікросхеми інтегральної схеми 1959 р. [5] [6] та кремнієвого МОП-транзистора (металооксидно-напівпровідниковий польовий транзистор) 1959 р. [7] [8] У Великій Британії предмет електронної інженерії став відмінним від електротехніки як предмета університетського ступеня близько 1960 року. (До цього часу студенти електроніки та суміжних предметів, таких як радіо та телекомунікації, мали вступати на електротехнічний факультет університету як жоден університет не мав кафедр електроніки. Електротехніка була найближчим предметом, з яким можна було б узгодити електронну техніку, хоча подібність у предметах, що охоплюються (крім математики та електромагнетизму) тривала лише перший рік трирічних курсів.)

Електронна інженерія (ще до набуття її назви) сприяла розвитку багатьох технологій, включаючи бездротову телеграфію, радіо, телебачення, радары, комп'ютери та мікропроцесори.

#### Зміст

- 1 Бездротова телеграфія та радіо
- 2 Телебачення
- 3 Радіолокаційне та радіолокаційне розташування
- 4 Транзистори та інтегральні схеми
- 5 Комп'ютери
- 6 Мікропроцесори
- 7 Див. Також
- 8 Список використаної літератури

## Бездротова телеграфія та радіо

Деякі з пристроїв, які могли б забезпечити бездротову телеграфію, були винайдені до 1900 р. До них належать передавач з іскровим розривом та когерер з ранніми демонстраціями та опублікованими висновками Девіда Едварда Х'юза (1880) [9] та Генріха Рудольфа Герца (1887–1890) [10] та подальші доповнення до цієї сфери Едуардом Бранлі, Ніколою Тесла, Олівером Лоджем, Джагадіш Чандрою Бозе та Фердинандом Брауном. У 1896 році Гульєльмо Марконі продовжив розробку першої практичної і широко використовуваної системи зв'язку на основі радіохвиль. [11] [12]

Вперше міліметрову хвильову комунікацію дослідив Джагадіш Чандра Бозе протягом 1894–1896 років, коли він досяг надзвичайно високої частоти до 60 ГГц у своїх експериментах [13]. Він також запровадив використання напівпровідникових переходів для виявлення радіохвиль [14], коли запатентував радіокристалічний детектор у 1901 р. [15] [16]

У 1904 році Джон Амброуз Флемінг, перший професор електротехніки Університетського коледжу Лондона, винайшов першу радіолампу - діод. Потім, у 1906 р., Роберт фон Лібен та Лі Де Форест самостійно розробили підсилювальну трубку, яка отримала назву тріод. Часто вважається, що електроніка почалася з винаходу тріода. Протягом 10 років пристрій використовувався в радіопередавачах і приймачах, а також системах для міжміських телефонних дзвінків.

Винахід тріодного підсилювача, генератора та детектора зробило аудіозв'язок радіо практичним. (У передачах Реджинальда Фессендена 1906 р. Використовувався електромеханічний генератор.) У 1912 р. Едвін Х. Армстронг винайшов регенеративний підсилювач зворотного зв'язку та генератор; він також винайшов супергетеродинний радіоприймач і його можна вважати батьком сучасного радіо. [17]

Перша відома програма радіо новин транслювалася 31 серпня 1920 року на станції 8МК, неліцензійній попередниці WWJ (AM) у Детройті, штат Мічиган. Регулярне бездротове мовлення для розваг розпочалося в 1922 році з Дослідницького центру Марконі в Піттллі поблизу міста Челмсфорд, Англія. Станція була відома як 2MT, а за нею слідувала 2LO, що транслювалася зі Стенда, Лондон.

Хоча деякі ранні радіоприймачі використовували певний тип підсилення за допомогою електричного струму або акумулятора, до середини 1920-х років найпоширенішим типом приймачів був набір кристалів. У 1920 -х роках підсилювальні вакуумні лампи зробили революцію як у радіоприймачах, так і в передавачах.

Вакуумні трубки залишалися бажаним підсилювальним пристроєм протягом 40 років, поки дослідники, які працювали у Вільямі Шоклі з Bell Labs, не винайшли транзистор у 1947 р. У наступні роки транзистори виготовляли невеликі портативні радіоприймачі або транзисторні радіоприймачі, а також дозволяли використовувати більш потужні комп'ютери з мейнфреймів.

## Історія енергетики і електроенергетики

будувати. Транзистори були меншими і для роботи їм потрібна менша напруга, ніж вакуумні лампи.

До винаходу інтегральної схеми в 1959 році електронні схеми були побудовані з дискретних компонентів, якими можна було маніпулювати вручну. Ці неінтегральні схеми споживали багато місця та електроенергії, були схильні до збоїв і мали обмежену швидкість, хоча вони все ще поширені в простих додатках. Навпаки, інтегральні схеми упаковували велику кількість - часто мільйонів - крихітних електричних компонентів, переважно транзисторів, у великий чіп розміром з монету. [18]

### Телебачення

У 1927 році Філо Фарнсворт здійснив першу публічну демонстрацію чисто електронного телебачення. [19] Протягом 1930 -х років кілька країн почали мовлення, а після Другої світової війни воно поширилося на мільйони приймачів, врешті -решт по всьому світу. З тих пір електроніка повністю присутня в телевізійних пристроях.

Сучасні телевізори та відеодисплеї перейшли від об'ємної електронно-трубної технології до використання більш компактних пристроїв, таких як плазмові та рідкокристалічні дисплеї. Тенденція стосується пристроїв із меншою потужністю, таких як органічні світлодіодні дисплеї, і, швидше за все, вони замінять РК-та плазмові технології [20].

### Радіолокаційне та радіолокація

Основна стаття: Історія радіолокації

Під час Другої світової війни багато зусиль було витрачено на електронне розташування ворожих цілей та літаків. Вони включали наведення радіопроменями бомбардувальників, електронні протидії, ранні радіолокаційні системи тощо.

### Транзистори та інтегральні схеми

Див. Також: Історія транзистора, Винахід інтегральної схеми та МОП -транзистор



Джон Бардін, Вільям Шоклі та Уолтер Бретеїн винайшли перший робочий транзистор (1947)

Першим працюючим транзистором був точковий контактний транзистор, винайдений Джонами Бардіном та Уолтером Хаузером Бретеїном у телефонних лабораторіях Белла (BTL) у 1947 р. [22] Тоді Вільям Шоклі винайшов транзистор з біполярним переходом у BTL у 1948 р. [23] Хоча транзистори раннього переходу були відносно громіздкими пристроями, які було важко виготовити на основі масового виробництва [24], вони відкрили двері для більш компактних пристроїв. [25]



Мохамед М. Аталла розробив процес пасивації поверхні кремнію (1957) та винайшов транзистор MOSFET (1959)



Роберт Нойс винайшов монолітну мікросхему інтегральної схеми (1959)

Процес пасивування поверхні, який електрично стабілізував поверхні кремнію шляхом термічного окислення, який розроблений Мохамедом М. Аталлою в BTL у 1957 р. Це призвело до розвитку монолітної мікросхеми інтегральної схеми. [26] [27] [28] Першими інтегральними схемами були гібридна інтегральна схема, винайдена Джеком Кілбі в Texas Instruments у 1958 році, і монолітна мікросхема інтегральної схеми, винайдена Робертом Нойсом у Fairchild Semiconductor у 1959 році [29].





Давон Канг спільно винайшов транзистор MOSFET (1959)

MOSFET (польовий транзистор з оксидом металу та напівпровідника, або MOS-транзистор) був винайдений Мохамедом Аталлою та Давоном Кангом у BTL у 1959 р. [30] [31] [32] Це був перший по-справжньому компактний транзистор, який можна було мініатюрувати та масово виробляти для широкого спектру використання. [24] Він здійснив революцію в електронній промисловості [7] [8], став найбільш широко використовуваним електронним пристроєм у світі. [31] [33] [34] МОП -транзистор є основним елементом у більшості сучасних електронних пристроїв [35] [36] і займає центральне місце в революції електроніки [37], революції мікроелектроніки [38] та цифровій революції [32] [39] [40] Таким чином, МОП -транзистор вважається народженням сучасної електроніки [41] [42] і, можливо, найважливішим винаходом в електроніці [43].

MOSFET дозволив створити мікросхеми з великою щільністю інтегральних схем. [31] Аталла вперше запропонував концепцію мікросхеми MOS IC (MOS IC) у 1960 році, а потім Канг у 1961 році [24] [44]. Найдавніший експериментальний чіп MOS IC, який був виготовлений, був побудований Фредом Гейманом та Стівеном Хофштейном у лабораторіях RCA у 1962 р. [45] Технологія MOS дозволила закон Мура, подвоєння транзисторів на мікросхемі мікросхеми кожні два роки, передбачений Гордоном Муром у 1965 р. [46] Технологія MOS із силіконовими воротами була розроблена Федеріко Фаггіном у Fairchild у 1968 р. [47] З тих пір масове виробництво кремнієвих МОП-транзисторів та мікросхем інтегральних мікросхем МОП, а також безперервна мініатюризація масштабування МОП-транзисторів з експоненціальними темпами

(як передбачено законом Мура) призвели до революційних змін у технологіях, економіці, культурі та мисленні. [48 ]

### **Комп'ютери**

Хоча механічні приклади комп'ютерів існували протягом значної частини історії людства, перші електронні комп'ютери були розроблені в середині 20 століття (1940–1945 рр.). Це були розміри великої кімнати, яка споживала стільки ж енергії, скільки кілька сотень сучасних персональних комп'ютерів (ПК). Сучасні комп'ютери на основі інтегральних мікросхем у мільйони -мільярди разів здатніші, ніж ранні машини, і займають частину простору. Прості комп'ютери досить маленькі, щоб вмістити їх у невеликі кишенькові пристрої, і можуть харчуватися від маленької батареї. Персональні комп'ютери у різних їх формах є іконами епохи інформації та є тим, що більшість людей вважає "комп'ютерами". Однак найчисленнішими є вбудовані комп'ютери, які можна знайти у багатьох пристроях - від MP3 -плеєрів до винищувачів, від іграшок до промислових роботів.

Можливість зберігати та виконувати списки інструкцій, які називаються програмами, робить комп'ютери надзвичайно універсальними, відрізняючи їх від калькуляторів. Теза Черч -Тьюрінга є математичним твердженням про цю універсальність: будь -який комп'ютер з певними мінімальними можливостями в принципі здатний виконувати ті ж завдання, які може виконувати будь -який інший комп'ютер. Тому всі комп'ютери, починаючи від нетбука і закінчуючи суперкомп'ютером, здатні виконувати однакові обчислювальні завдання за умови достатнього часу та обсягу пам'яті.

### **Мікропроцесори**

Витоки мікропроцесора можна простежити до винаходу МОП-транзистора (польового транзистора з оксидом металу та напівпровідника), також відомого як МОП-транзистор. [49] Він був винайдений Мохамедом М. Аталлою та Давоном Кангом у Bell Labs у 1959 р., і вперше продемонстрований у 1960 р. [30] Того ж року Аталла запропонувала концепцію інтегральної схеми МОП, яка являла собою мікросхему інтегральної схеми, виготовлену з МОП -транзисторів. [24] До 1964 року мікросхеми MOS досягли більшої щільності транзисторів і нижчих витрат на виробництво, ніж біполярні мікросхеми. Складність мікросхем MOS ще більше зростає зі швидкістю, передбаченою законом Мура, що призводить до масштабної інтеграції (LSI) з сотнями транзисторів на одному чіпі MOS до кінця 1960-х років. Застосування мікросхем MOS LSI до обчислень стало основою для перших мікропроцесорів, оскільки інженери почали визнавати, що повний комп'ютерний процесор може міститися на одному мікросхемі MOS LSI. [49]

Перші багатокристалльні мікропроцесори, Чотирифазні системи AL1 у 1969 році та Garrett AiResearch MP944 у 1970 році, були розроблені з використанням декількох мікросхем MOS LSI. Першим однокристалльним

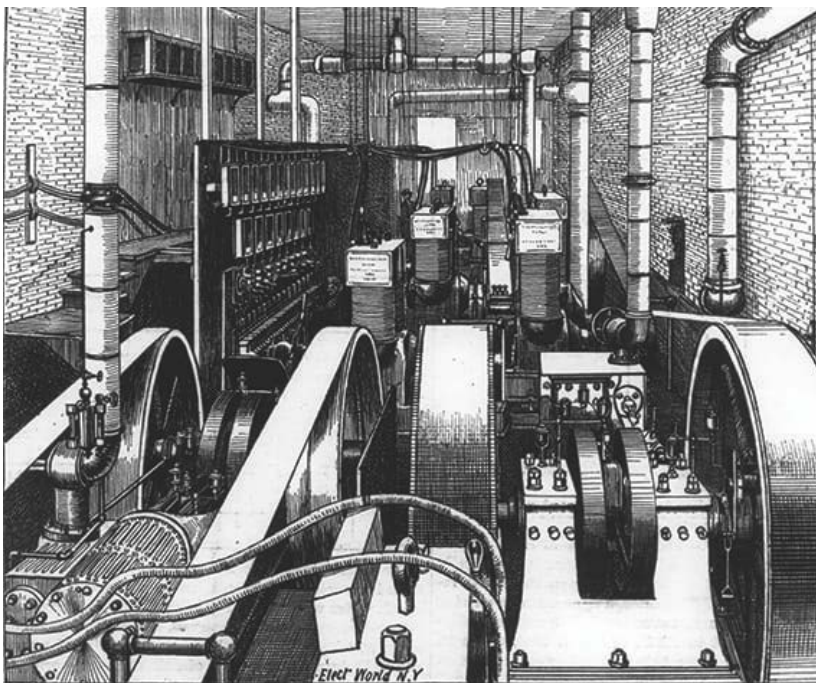
## Історія енергетики і електроенергетики

мікропроцесором був Intel 4004, випущений на одному мікросхемі MOS LSI в 1971 р. [50] Однокристальний мікропроцесор був задуманий у 1969 році Марсіаном Хоффом. Його концепція була частиною замовлення японської компанії Busicom на настільний програмований електронний калькулятор, який Хофф хотів створити якомога дешевше. Першою реалізацією однокристального мікропроцесора був Intel 4004, 4-розрядний процесор, випущений на одному мікросхемі MOS LSI в 1971 р. Його розробив Федеріко Фабгін, використовуючи свою технологію MOS із силіконовими затворами, разом з інженерами Intel Хоффом та Стен Мазор та інженер Busicom Масатосі Шима. [50] Це спровокувало розвиток персонального комп'ютера. У 1973 році 8-розрядний процесор Intel 8080 уможливив створення першого персонального комп'ютера-MITS Altair 8800. Перший ПК був оголошений широкій публіці на обкладинці випуску Popular Electronics у січні 1975 року.

Сьогодні багато інженерів електроніки спеціалізуються на розробці програм для електронних систем на базі мікропроцесорів, відомих як вбудовані системи. Гібридні спеціалізації, такі як комп'ютерна інженерія, виникли завдяки детальному знанню апаратного забезпечення, необхідного для роботи над такими системами. [51] Інженери -програмісти, як правило, не вивчають мікропроцесори на тому ж рівні, що й інженери -комп'ютери та електроніки. Інженери, які виконують виключно роль програмування вбудованих систем або мікропроцесорів, називаються "інженерами вбудованих систем" або "інженерами прошивки".

## ІСТОРІЯ ЕНЕРГЕТИКИ: ЕВОЛЮЦІЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Журнал POWER був запущений у 1882 році, коли світ почав розуміти наслідки нової, універсальної форми енергії: електрики. За свою 138-річну історію сторінки журналу відображали швидкозмінну еволюцію технологій та ринків, що характеризують світовий енергетичний сектор. Це деякі події, які сформували як історію влади, так і історію ЕНЕРГЕТИКИ.*



1. Станція Перл -стріт. Томас Едісон у вересні 1882 р. Досяг свого бачення повномасштабної центральної електростанції з системою провідників для розподілу електроенергії кінцевим споживачам у гучному діловому районі Нью-Йорка. Джерело: Міністерство енергетики США

Історія виробництва електроенергії довга і складна, позначена безліччю технологічних етапів, концептуальних та технічних, від сотень авторів. Багато розповідей починають історію влади з демонстрації електричної провідності англічанина Стівена Грея, що призвело до того, що в 1740 році в Лейдені, Німеччина, був винайдений генератор тертя скла. Кажуть, що цей розвиток надихнув відомі експерименти Бенджаміна Франкліна, а також винахід батареї італійцем Алессандро Вольтою в 1800 році, першою ефективною “дуговою

## Історія енергетики і електроенергетики

лампою” Хамфрі Дейві в 1808 році та 1820 року демонстрацією зв’язку між Гансом Крістіаном Ерстедом, електрики та магнетизму. У 1820 р., Мабуть, найважливіший внесок у сучасні енергетичні системи, Майкл Фарадей та Джо-зеф Генрі винайшли примітивний електродвигун, а в 1831 р. Задокументували, що електричний струм може вироблятися в дроті, що рухається біля магніту, що демонструє принцип генератор.

Винахід першого елементарного динамо приписується французу Іполіту Піксію в 1832 році. Антоніо Пачінотті покращив його, щоб забезпечити безперервну силу постійного струму до 1860 року. У 1867 році Вернер фон Сіменс, Чарльз Уїтстоун і С. А. Варлі майже одночасно розробили «самозахоплююче динамо». -електричний генератор ". Можливо, найважливіше поліпшення відбулося тоді в 1870 році, коли бельгійський винахідник Зенобе Грамм розробив динамо, яке виробляло постійний постійний струм, добре підходить для живлення двигунів-відкриття, яке викликало сплеск ентузіазму щодо потенціалу електрики для освітлення та живлення світ.

До 1877 року-оскільки вулиці багатьох міст по всьому світу були освітлені дуговим освітленням (але не звичайними кімнатами, тому що дугові ліхтарі були ще сліпуче яскравими)-Чарльз Ф. Бруш із штату Огайо розробив і почав продавати найнадійніший дизайн динамо. до цього моменту, і безліч дослідників активно досліджували перспективи масштабного розподілу електроенергії. Зрештою, Томас Едісон винайшов менш потужну лампу розжарювання у 1879 р., А у вересні 1882 р. - лише за місяць до виходу першого номера журналу POWER - він заснував центральну генераторну станцію на Перл -стріт (малюнок 1) у нижньому Манхеттені.

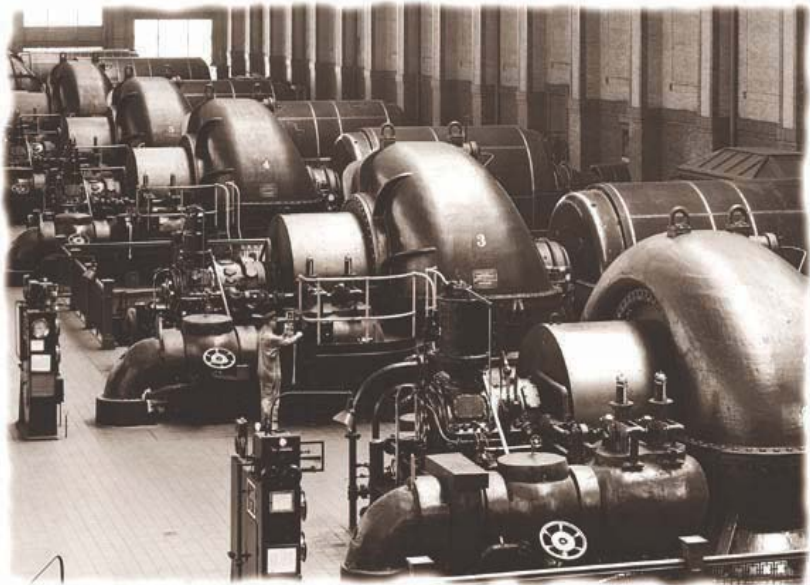
## Історія енергетики, що базується на вугіллі

Досягнення технології змінного струму (АС) відкрило нові сфери для виробництва електроенергії. Наприклад, гідроенергетика відзначилася кількома етапами між 1890 і 1900 роками в Орегоні, Колорадо, Хорватія (де перша повноцінна багатофазна система змінного струму була продемонстрована в 1895 році), на Ніагарському водоспаді та в Японії.

На той час, однак, місце видобутку вугілля в історії електроенергії вже міцно закріпилося. Перші парогенератори, що працюють на вугіллі, забезпечували насичену або злегка перегріту пару низького тиску для парових двигунів, що керують динамічними двигунами постійного струму. Сер Чарльз Парсонс, який побудував перший парогенераторний генератор (з тепловою ефективністю всього 1,6%) у 1884 році, покращив його ефективність через два роки, представивши першу конденсаційну турбіну, яка приводила в дію генератор змінного струму. До початку 1900-х років енергоблоки на вугіллі мали потужності в діапазоні від 1 МВт до 10 МВт, оснащені парогенератором, економайзером, випарником та секцією перегрівача. До 1910-х років цикл електростанцій, що працюють на вугіллі, був ще більше покращений шляхом впровадження турбін з відкачуванням пари для нагріву живильної води та

парогенераторів, обладнаних попередньо нагрівачами повітря-усі вони збільшили чисту ефективність приблизно до 15%.

Демонстрація генераторів парового вугілля на станції Онеїда -стріт у Вісконсіні в 1919 році значно покращила спалювання вугілля, дозволивши створити більші котли (Малюнок 2). У 1920-х роках черговий технологічний поштовх відбувся з появою одноразових котлів та парових електростанцій з повторним нагріванням, разом з парогенератором Benson, який був побудований у 1927 році. Повторний нагрів парових турбін став нормою в 1930-х роках, коли рейтинги агрегатів зросли до рівня потужності 300 МВт. Температура основної пари постійно зростала протягом 1940 -х років, і десятиліття також започаткувало перші спроби очищення димових газів з видаленням пилу. П'ятдесяті та шістдесяті роки минулого століття характеризувалися більшими технічними досягненнями для підвищення ефективності, зокрема будівництвом першого прохідного парогенератора з надкритичним тиском основної пари.



2. Чисто подрібнений. Озерна електростанція потужністю 40 МВт у Сент-Френсісі, штат Вісконсін, розпочала свою діяльність у 1921 році. На цьому зображенні зображено парові турбіни та генератори в Лейксайді, який був першою у світі електростанцією, яка спалювала виключно пилоувугільне вугілля. Надано: WEC Energy Group

Номінальні потужності енергоблоків 1300 МВт були досягнуті до 1970 -х років. У 1972 році розпочала роботу перша в світі інтегрована електростанція

## Історія енергетики і електроенергетики

з комбінованим циклом газифікації вугілля-електростанція потужністю 183 МВт для німецького генератора STEAG. Зростання екологічних проблем та подальше прийняття Закону про чисте повітря адміністрацією Ніксона у 1970-х роках також стимулювало технічні рішення, такі як скрубери, для зменшення викидів діоксиду сірки. Десятиліття закінчилося завершенням новаторської комерційної установки спалювання з киплячим шаром, побудованої в університетському містечку Джорджтауна у Вашингтоні, в 1979 році.

Тим часом початок 1980-х років ознаменувався подальшим розвитком технологій контролю викидів, включаючи впровадження систем селективного каталітичного відновлення як вторинного заходу для зменшення викидів оксиду азоту. Продуктивність компонентів також зазнала значних поліпшень за цей період до 21 століття. Одним з останніх важливих етапів в історії вугільної енергетики є завершення першого масштабного енергоблоку на вугіллі, обладнаного технологією збору та зберігання вуглецю, у 2014 році на дамбі Бордері в Саскачевані.

### Історія енергетики, що базується на газі

Еволюція вугільної енергетичної технології була стрімкою завдяки зростаючому попиту на електроенергію та зростаючому видобувному сектору. Енергетичний сектор природного газу, який сьогодні займає ліву частку як встановленої потужності США, так і виробництва, повільніше розвивався. У 1896 році, приблизно через десятиліття після того, як Чарльз Парсонс розробив свій парогенератор, американський винахідник Чарльз Кертіс запропонував компанії General Electric Co. (GE) винахід іншої турбіни. До 1901 року компанія GE успішно розробила турбінний генератор Curtis потужністю 500 кВт, який використовував пар високого тиску для швидкого обертання диска, встановленого на валу, а до 1903 року він поставив першу в світі парову турбіну потужністю 5 МВт до Співдружності Едісон Со. з Чикаго. Подальші моделі, які отримали посилення вдосконалення, запропоновані доктором GE д-ром Санфордом Моссом, використовувалися здебільшого як механічні приводи або як пікові агрегати.

Однак інновації в авіаційній техніці, а також інженерні та виробничі досягнення під час обох світових воєн підняли технології виробництва електроенергії на газі до нових висот. Наприклад, у GE інженери, які брали участь у роботі реактивних двигунів, застосували свої ноу-хау при проектуванні газової турбіни для промислового та комунального обслуговування. Після розвитку газотурбінного електровоза в 1948 році GE встановила свою першу комерційну газову турбіну для виробництва електроенергії-потужний агрегат потужністю 3,5 МВт-на станції Belle Isle, що належить компанії Oklahoma Gas & Electric у липні 1949 р. (Малюнок 3). Деякі експерти відзначають, що оскільки цей агрегат використовував тепло вихлопних газів для нагріву подачі води парової турбіни, це, по суті, також була перша в світі електростанція з

комбінованим циклом. Того ж року Westinghouse випустила в експлуатацію блок потужністю 1,3 МВт у компанії River Fuel Corp. в Міссісіпі.



3. Першопрохідник. У 1949 році General Electric встановила першу побудовану в США газову турбину для виробництва електроенергії на станції Belle Isle-агрегаті потужністю 3,5 МВт, що належить компанії Oklahoma Gas & Electric. Надано: GE

Пізніше технологія великих газових турбін великої потужності швидко вдосконалювалася. На початку 1950 -х років температура випалу становила 1300F (705C); до кінця 1950 -х років вони зросли до 1500F, а в кінцевому підсумку досягли 2000F у 1975 р. До 1957 р. загальне зростання розмірів газових турбін призвело до встановлення першого парогенератора для рекуперації тепла (HRSG) для газової турбіни. До 1965 року ввійшла в експлуатацію перша повністю опалена котельня з газовою турбіною з газовою турбіною (CCGT), а до 1968 року перша CCGT була обладнана HRSG. Тим часом наприкінці 1960-х років постачальники газових турбін почали розробляти заздалегідь спроектовані або стандартні установки з виробництва ПГУ. GE розробила систему STAG (пар і газ), наприклад, Westinghouse, систему PACE (Потужність з комбінованою ефективністю) та Siemens, систему GUD (газ і пара).

Більш нові віхи газових турбін сталися в 1990 році, з впровадженням перших вдосконалених газових турбін і встановленням першого ТГУ в парі з паливним елементом у 2000 році.



### Атомні відкриття

Хоча концепція атома була досить добре розвинена, вчені ще не з'ясували, як використати енергію, що міститься в атомах, коли вийшов перший номер журналу POWER. Але через 13 років, у 1895 році, випадкове відкриття Вільгельмом Рентгеном рентгенівських променів поклало початок хвилі експериментів у атомному полі.

У наступні роки радіацію відкрив Антуан Анрі Беккерель, французький фізик; Кюрі - Марія та П'єр - провели додаткові дослідження радіації та ввели термін «радіоактивність»; та Ернест Резерфорд, британський фізик з Нової Зеландії, якого багато людей вважають батьком ядерної науки, постулював будову атома, запропонував закони радіоактивного розпаду та провів новаторські дослідження трансмутації елементів.

Багато інших вчених допомагали просунути світове розуміння атомних принципів. Альберт Ейнштейн розробив свою теорію спеціальної теорії відносності  $E = mc^2$ , де  $E$  - енергія,  $m$  - маса, а  $c$  - швидкість світла - у 1905 р. Нільс Бор опублікував свою модель атома в 1913 р., яку пізніше удосконалив Джеймс Чедвік, коли відкрив нейтрон.

Енріко Фермі, італійський фізик, у 1934 році показав, що нейтрони можуть розщеплювати атоми. Два німецькі вчені - Отто Хан і Фріц Страсман - розширили ці знання в 1938 році, коли вони відкрили поділ, і, використовуючи теорію Ейнштейна, команда показала, що втрачена маса перетворюється на енергію.

### Ранні ядерні реактори

Тоді вчені звернули свою увагу на розвиток самопідтримуваної ланцюгової реакції. Для цього «критичну масу» урану потрібно було розмістити за відповідних умов. Фермі, який емігрував до США у 1938 році, щоб уникнути рабових законів фашистської Італії, очолив групу вчених Чиказького університету при будівництві першого у світі ядерного реактора.

Дизайн команди склався з урану, покладеного в стопку графіту для створення кубоподібної рами з розщеплюваного матеріалу. Купа, відома як Чиказька купа-1, була зведена на підлозі сквошу під спортивним стадіоном Чиказького університету (малюнок 4). 2 грудня 1942 року в Чиказькій Палі-1 була продемонстрована перша самостійна ядерна реакція.



4. Перший у світі ядерний реактор. Чиказька купа-1 була експоненціальною купою. Щонайменше 29 експоненціальних паль було побудовано в 1942 році під західними стендами Чикагського університету Стейг -Філд. Джерело: Міністерство енергетики США

Але в той час США були роком початку Другої світової війни, і більшість атомних досліджень, які проводилися тоді, були зосереджені на розробці технологій зброї. Лише після війни уряд США почав заохочувати розвиток ядерної енергетики для мирних цивільних цілей.

Першим реактором, що виробляв електроенергію з ядерної енергії, був експериментальний реактор -селекціонер I, 20 грудня 1951 року в Айдахо. У Радянському Союзі в той час також розвивалася програма ядерної енергетики. Його вчені модифікували існуючий графітовий модельований реактор для виробництва плутонію каналного типу для виробництва тепла та електроенергії. У червні 1954 р. Цей агрегат, розташований в Обнінську, почав виробляти електроенергію. Кілька років по тому, 18 грудня 1957 р., Першу комерційну атомну електростанцію США-атомну електростанцію «Шиппортпорт», легководний реактор потужністю 60 МВт-було синхронізовано з електромережею в Пенсільванії.

## Історія енергетики і електроенергетики

Однак США та Радянський Союз не були єдиними країнами, які будували атомні електростанції. Велика Британія, Німеччина, Японія, Франція та кілька інших також стрибали. Промисловість стрімко зростала протягом 1960-1970-х років. Проекти ядерного будівництва були розміщені на дошках для розведення по всьому США, лише в 1973 році було замовлено 41 новий агрегат. Але повільніше зростання попиту на електроенергію, затримки будівництва, перевищення витрат та складні нормативні вимоги поклали край розквіту в середині 1970-х років. Майже половина всіх запланованих американських проектів була скасована. Тим не менш, до 1991 року США мали вдвічі більше діючих комерційних реакторів - 112 агрегатів -, ніж будь-яка інша країна світу.

Історію атомної енергетики запламували три великі аварії. Перший-часткове розплавлення 2-го блоку острова "Три милі" 28 березня 1979 року. Порушення роботи обладнання, проблеми, пов'язані з дизайном, і помилки робітників призвели до розпаду. Друга велика аварія сталася 26 квітня 1986 р. Ця подія була спричинена раптовим перепадом енергії під час випробування реакторних систем на 4-му енергоблоці Чорнобильської атомної електростанції в Україні, колишньому Радянському Союзі. Аварія та подальша пожежа викинули величезну кількість радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище. Найновіша велика аварія сталася після землетрусу магнітудою 9,0 біля узбережжя Японії 11 березня 2011 р. Землетрус призвів до того, що станція Фукусіма-Дайчі втратила всю потужність за межами майданчика. Резервні системи працювали, але через 40 хвилин після землетрусу на територію області влучило цунамі заввишки 14 метрів, яке вибило деяких з них. Три реактори врешті-решт перегрілися - до деякої міри розплавив їх ядра - потім вибухи водню поширили радіоактивне забруднення по всій території.

Наслідки аварій зіграли певну роль у прийнятті рішень про поступове припинення або скорочення залежності від ядерної енергії в деяких країнах. Тим не менш, Китай, Росія, Індія, Об'єднані Арабські Емірати, США та інші продовжують будувати нові підрозділи. Передові технології реакторів та невеликі модульні реактори також дають надію на поживлення промисловості.

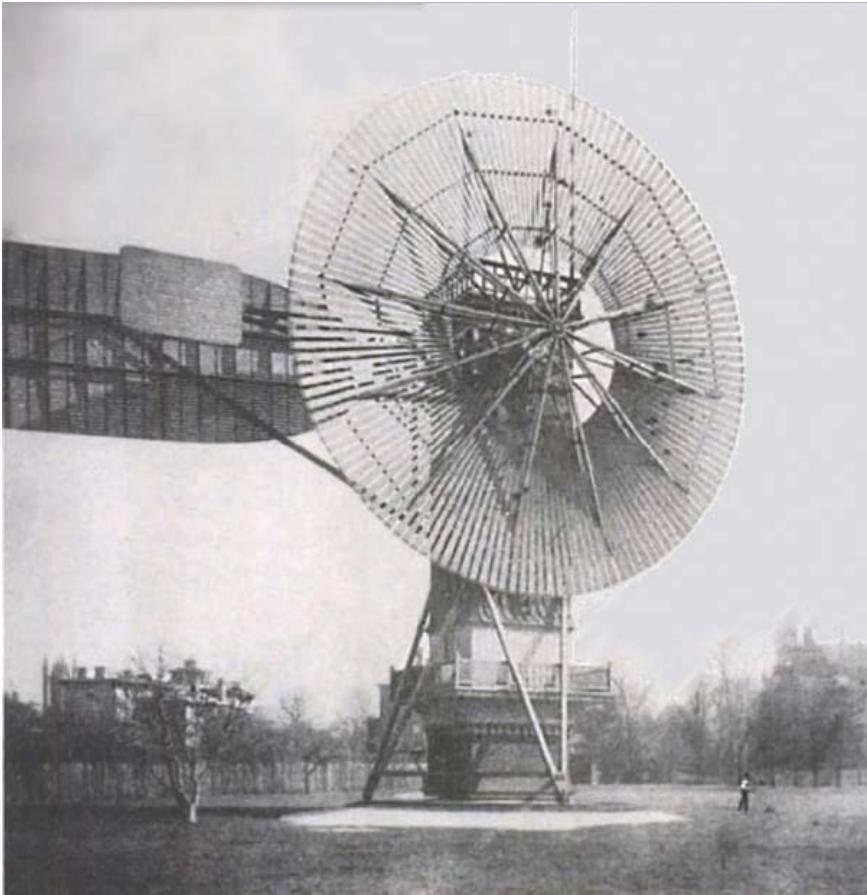
### **Відновлювані джерела енергії: найстаріші та новітні джерела енергії у світі**

Хоча люди тисячі років використовували енергію сонця, вітру та води, технологія істотно змінилася з плином історії, і ці стародавні види енергії перетворилися на найсучасніші інноваційні джерела виробництва електроенергії.

**Погоня за водою.** Те, що стало сучасним виробництвом відновлюваних джерел енергії, почалося наприкінці 1800-х років, приблизно в той час, коли запустилася компанія POWER. Гідроенергетика першою перейшла на комерційне джерело виробництва електроенергії, і вона дуже швидко розвивалася. У 1880 році компанія «Гранд-Рапідс Електрик Лайт енд Енерджі» з Мічигану виробляла електроенергію постійного струму, використовуючи

гідроелектростанцію на стільці Росомахи. Динамо з ремінним приводом від водяної турбіни на заводі запалювало 16 дугових вуличних ліхтарів.

Всього через два роки перша в світі центральна гідроелектростанція постійного струму забезпечила виробництво паперу в Ешплтоні, штат Вісконсін. До 1886 р. Лише в США та Канаді працювало від 40 до 50 гідроелектростанцій, а до 1888 р. Приблизно 200 електрокомпаній покладалися на гідроенергію хоча б у частині виробництва електроенергії. У 1889 році в мережі з'явилася перша в країні гідроелектростанція змінного струму - станція Willamette Falls в місті Орегон, штат Орегон.



5. Народження вітрогенератора. У 1888 році Чарльз Бруш, винахідник з Огайо, сконструював вітрову турбіну завдовжки 60 футів, здатну виробляти електроенергію у своєму дворі. Джерело: Wikimedia Commons

## Історія енергетики і електроенергетики

На міжнародному рівні Швейцарія займає лідируючі позиції у сфері зберігання насосів, відкривши перший у світі такий завод у 1909 р. Насосне сховище не було інтегровано в енергетичний комплекс США до 1930 р., Коли Connecticut Electric Light and Power Co. Коннектикут.

**Дме на вітрі.** Приблизно в той час, коли гідроенергетика набирала популярності, винахідники також придумували, як використовувати вітряні млини минулого для виробництва електроенергії для майбутнього. У 1888 році Чарльз Бруш, винахідник з Огайо, побудував 60-футову вітрогенератор у своєму дворі (Малюнок 5). Колесо вітряка було діаметром 56 футів і мало 144 лопаті. Вал всередині вежі обернувся шківками та ременями, які крутили динамо потужністю 12 кВт, підключене до батарей у підвалі Бруша.

Вітрові турбіни повільно і з невеликими помпами поширюються по всьому світу. На Середньому Заході Америки, де турбіни використовувалися для живлення іригаційних насосів, було багато інсталяцій. У 1941 році світ побачив першу турбіну потужністю 1,25 МВт, приєднану до електромережі на пагорбі в Каслтоні, штат Вермонт, під назвою Дідусева ручка.

Інтерес до вітроенергетики відновився внаслідок нафтової кризи 1970 -х років, що стимулювало дослідження та розробки. Вітроенергетика в США отримала посилення політики, коли президент Джиммі Картер підписав Закон про регуляторну політику у сфері комунальних послуг 1978 року, який вимагав від компаній купувати певну кількість електроенергії з відновлюваних джерел енергії, включаючи вітер.

До 1980-х років у Каліфорнії почали з'являтися перші вітрові електростанції загального користування. Європа була лідером у галузі вітрового флоту на морі: перша морська вітряна електростанція була встановлена в 1991 році в Данії. За даними Wind Europe, в Європі наразі є потужність 12,6 ГВт від 3 589 вітрових турбін, підключених до мережі, у 10 країнах. В кінці 2016 року перша морська вітроелектростанція в США почала працювати у водах біля острова Блок, Род -Айленд.

**Нехай сонечко увійде.** Порівняно з іншими комерційно доступними відновлюваними джерелами енергії, сонячна енергія знаходиться на зародку, хоча шлях, який привів до її комерційного використання, розпочався майже 200 років тому.

У 1839 р. Французький вчений Едмонд Беккерель відкрив фотоелектричний (PV) ефект, експериментуючи з електролітичною коміркою з двох металевих електродів у провідниковому розчині. Беккерель виявив, що вироблення електрики збільшується під впливом світла. Понад три десятиліття потому англійський інженер -електротехнік на ім'я Віллобі Сміт відкрив фотопровідність селену. До 1882 р. Першим сонячним елементом був створений нью -Йоркський винахідник Чарльз Фрітц, який покрив селен шаром золота для створення клітини з коефіцієнтом перетворення енергії всього на 1-2%.

Однак лише в 1950 -х роках комерційне виробництво кремнієвих сонячних батарей було зроблено. Фізики лабораторій Белл визначили кремній більш

ефективним, ніж селен. За даними Міністерства енергетики США (DOE), клітина, створена компанією Bell Labs, була "першою сонячною батареєю, здатною перетворювати достатню кількість сонячної енергії в енергію для роботи щоденного електричного обладнання".

До 1970 -х років ефективність використання сонячних батарей зростає, і вони почали використовуватися для живлення навігаційних вогнів та звукових сигналів на багатьох морських газових і нафтових вишках, маяках та сигналах залізничних переїздів. Вітчизняні сонячні установки стали розглядати як розумну альтернативу у віддалених місцях, де можливості підключення до мережі недоступні.

У 1980-х роках відбувся значний прогрес у розробці більш ефективних, потужних сонячних проектів. У 1982 році в Гесі з'явилася перша електростанція з фотоелектричними установками мегаватного масштабу, розроблена компанією ARCO Solar Перія, Каліфорнія. Також у 1982 році DOE розпочало експлуатацію Solar One, демонстраційного проекту з центральним приймачем потужністю 10 МВт, першого проекту, який довів доцільність використання технології енергетичної вежі. Тоді, у 1992 році, дослідники з Університету Південної Флориди розробили 15,9% ефективну тонкоплівкову фотоелектричну батарею, яка першою пододала 15% бар'єр ефективності. До середини 2000-х років житлові сонячні електростанції були доступні для продажу в магазинах для благоустрою будинків.

У 2016 році на сонячну енергію припадало лише 0,9% виробництва електроенергії США на об'єктах комунального господарства. Однак він набирає

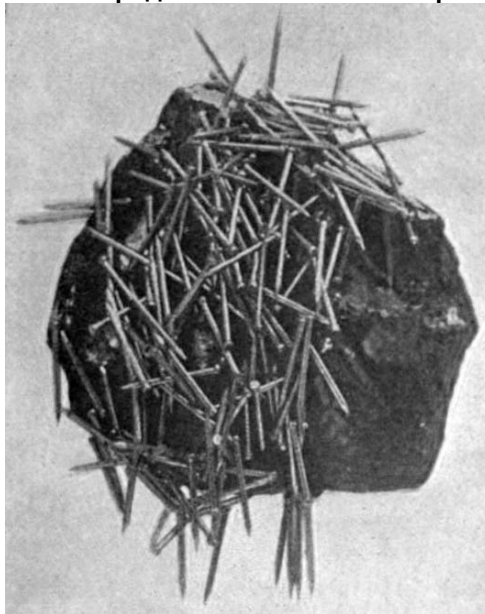
обертів. За даними Асоціації промисловості сонячної енергії, "[Т] американський ринок сонячної енергії мав наймасштабніший рік у 2016 році, майже вдвічі збільшивши свій попередній рекорд і вперше в історії додавши більше генеруючих потужностей, ніж будь-яке інше джерело енергії". (Докладніше про історію всіх типів виробництва електроенергії див. У додатках, пов'язаних із цією проблемою, на веб-сайті [powermag.com](http://powermag.com).)

## ІСТОРІЯ ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМУ

Історія електромагнітної теорії починається з давніх заходів для розуміння атмосферної електрики, зокрема блискавки. Тоді люди мало розуміли електрику і не могли пояснити явища. Наукове осмислення природи електрики зростало протягом 18-го і 19-го століть завдяки працям таких дослідників, як Кулон, Ампер, Фарадей та Максвелл.

У 19 столітті стало зрозуміло, що електрика та магнетизм пов'язані між собою, а їх теорії об'єднані: скрізь, де заряди рухаються, виникає електричний струм, а магнетизм — завдяки електричному струму. Джерелом електричного поля є електричний заряд, тоді як джерелом магнітного поля - електричний струм (рухомі заряди).

### Стародавня та класична історія



*Відкриття властивості магнітів.*

*Магніти вперше були знайдені в природному стані; деякі оксиди заліза були відкриті в різних частинах світу, зокрема в Магнезії в Малій Азії, які мали властивість притягувати невеликі шматки заліза, що показано тут.*

Знання про статичну електрику сягають найдавніших цивілізацій, але протягом тисячоліть воно залишалося лише цікавим і загадковим явищем, без теорії, що пояснювало б його поведінку, і його часто плутали з магнетизмом. Стародавні були знайомі з досить цікавими властивостями, якими володіють два мінерали, бурштин (грецька: ἤλεκτρον, ēlektron) та магнітна залізняк (μαγνήτις λίθος magnētis



## Розділ 0

lithos, "магнієвий камінь, вапняк"). Бурштин при натиранні притягує легкі предмети, наприклад, пір'я; магнітна залізна руда має силу притягання заліза.

Грунтуючись на своїй знахідці артефакту мінералу окислу заліза (гельматиту) який використовували плем'я ольмеків у Центральній Америці, американський астроном Джон Карлсон припустив, що "ольмеки, можливо, виявили та використовували геомагнітний компас з гірського каменю раніше 1000 року до нашої ери". Якщо це правда, це "випереджає китайське відкриття компасу з геомагнітного каменю більш ніж на тисячоліття". Карлсон припускає, що ольмеки, можливо, використовували подібні артефакти як орієнтаційний пристрій в астрологічних чи геомагнітних цілях або для орієнтації своїх храмів, осель живих чи поховань померлих. Найдавніша китайська література, що згадує магнетизм, міститься в книзі IV століття до нашої ери під назвою «Книга Майстра долини диявола» (鬼谷子): «Твердий камінь змушує залізо надходити або притягує його».

Задовго до того, як існували знання про електромагнетизм, люди знали про вплив електрики. Блискавка та інші прояви електрики, такі як вогонь Святого Ельма, були відомі ще в античні часи, але не було зрозуміло, що ці явища мають спільне походження.



*Електричні соми зустрічаються в тропічній Африці та річці Ніл.*

Стародавні єгиптяни знали про удари при взаємодії з електричними рибами (такими як електричні соми) або іншими тваринами (наприклад, з електричними вуграми).

Електричні удари від тварин були очевидними для спостерігачів різних народів ще з доісторії, які з ними контактували. Тексти стародавніх єгиптян від 2750 року до нашої ери називали цих риб "громовержцем Нілу" і розглядали їх як "захисників" усіх інших риб. Інший можливий підхід до виявлення ідентичності блискавки та електрики з будь-якого іншого джерела слід віднести до арабів, які до

XV століття використовували те саме арабське слово для блискавки (barq) та електричної іскри.

Фалет з Мілета, який писав близько 600 р. до н. е., зазначив, що тертя хутра різними речовинами, такими як бурштин, призведе до того, що вони привернуть до себе пилинки та інші легкі предмети. Фалес писав про ефект, відомий зараз як статична електрика. Греки відзначали, що якщо вони натирали бурштин досить довго, вони навіть можуть отримати електричну іскру.

Про ці електростатичні явища знову повідомили тисячоліття пізніше римські та арабські натуралісти та лікарі. Кілька античних письменників, таких як Пліній Старший і Скрибоній Ларгус, засвідчили знеболюючий ефект ураження електричним струмом від сомів і електричних скатів. Пліній у своїх книгах пише: «Стародавні Тоскани, навчаючись, стверджують, що існує дев'ять богів, які посилають блискавки, і одинадцять сортів блискавки». Взагалі це була перша язичницька ідея блискавки. Стародавні дотримувалися певної концепції, згідно з якою удари можуть проходити вздовж провідних об'єктів. Пацієнтів, які страждають на такі захворювання, як подагра або головний біль, скеровували доторкнутися до електричної риби в надії, що потужний електричний удар може їх вилікувати.

Ряд предметів, знайдених в Іраку в 1938 році, датованих ранніми століттями нашої ери (Сасанідська Месопотамія), так звана Багдадська батарея, нагадує гальванічний елемент і, на думку деяких вчених, використовувався для гальванічного покриття. Твердження є суперечливими через підтверджуючі докази та теорії використання артефактів, речові докази об'єктів, що сприяють виконанню електричних функцій, і якщо вони мали електричний характер. В результаті природа цих об'єктів ґрунтується на припущеннях, а функція цих артефактів залишається під сумнівом.

### Середньовіччя та Відродження

Колись Аристотель і Фалес вважали магнітне тяжіння роботою душі в камені.

Компас з магнітною стрілкою був розроблений у II столітті, і він покращив точність навігації, використовуючи астрономічну концепцію справжньої півночі (Dream Pool Essays, 1088). Тоді китайський учений Шень Куо (1031–1095) був першою людиною, яка написала про компас із магнітною стрілкою, а до XII століття китайці були відомі тим, що для навігації використовували кам'яний компас. У Європі перший опис компаса та його використання для навігації належить Олександру Неккаму (1187), хоча використання компаса вже було поширеним. Його розвиток в європейській історії відбувся завдяки Флавіо Джоза з Амальфі.

У тринадцятому столітті Петро Перегрінус, родом з Марікурта в Пікардії, зробив відкриття принципового значення. Французький вчений XIII століття проводив експерименти над магнетизмом і написав перший діючий трактат, що описує властивості магнітів і поворотних голок компаса. У 1282 р. властивості магнітів та сухих компасів обговорював аль-Ашраф Умар II, вчений з Ємену. Сухий компас був винайдений близько 1300 р. італійським винахідником Флавіо Джоза.

Архієпископ Солунський Євстатій, грецький вчений і письменник XII століття, записує, що Волівер, цар готів, зміг витягнути іскри зі свого тіла. Той самий письменник стверджує, що якийсь філософ під час одягання міг витягнути іскри зі

## Розділ 0

свого одягу — результат, здавалося б, схожий на той, що був отриманий Робертом Сіммером у його експериментах з панчохами з шовку, ретельний опис яких можна знайти у «Філософських трансакціях», 1759.

Італійський лікар Джероламо Кардано писав про електрику в книзі «*De Subtilitate*» (1550), де, можливо, вперше розрізняв електричні та магнітні сили.

### 17 століття

Наприкінці 16 століття лікар часів королеви Єлизавети, доктор Вільям Гілберт (*William Gilbert*) у роботі *De Magnete* розширив роботу Кардано і винайшов нове латинське слово *electricus* від *ήλεκτρον* (*ēlektron*), грецького слова «бурштин». Гілберт, уродженець Колчестера, науковий співробітник коледжу Сент-Джонс, Кембридж, і колись президент Коледжу лікарів, був одним з найдавніших і найвидатніших англійських науковців — людиною, чия робота Галілей вважав завидною. Він був призначений придворним лікарем і отримав пенсію, щоб звільнити його для продовження досліджень у галузі фізики та хімії.



Вільям Гілберт (1544–1603), олія по дереву

## Історія електромагнетизму

Гілберт здійснив ряд ретельних електричних експериментів, в ході яких він виявив, що багато інших речовин, крім бурштину, такі як сірка, віск, скло тощо, здатні виявляти електричні властивості. Гілберт також виявив, що нагріте тіло втрачає електрику і що волога перешкоджає електризації всіх тіл через відомий зараз факт, що волога погіршує ізоляцію таких тіл. Він також помітив, що електризовані речовини притягують усі інші речовини без розбору, тоді як магніт притягує лише залізо. Багато відкриттів такого характеру принесли Гілберту титул засновника електричної науки. Дослідивши сили на легкій металевій голці, збалансованої по точці, він розширив список електричних тіл, а також виявив, що багато речовин, включаючи метали та природні магніти, при розтиранні не виявляли сили притягання. Він помітив, що суха погода з північним або східним вітром була найбільш сприятливою атмосферною умовою для прояву електричних явищ - спостереження, яке могло бути хибним, поки не буде зрозуміла різниця між провідником та ізолятором.



*Роберт Бойл.*

## Розділ 0

Роботу Гілберта продовжив Роберт Бойл (*Robert Boyle*) (1627–1691), відомий натурфілософ, якого колись називали «батьком хімії і дядьком графа Корка». Бойл був одним із засновників Королівського товариства, коли воно зібралося приватно в Оксфорді, і став членом Ради після того, як Товариство було зареєстроване Карлом II у 1663 р. Він часто працював над новою наукою про електрику і додав кілька речовин до списку електрики Гілберта. Він залишив детальний опис своїх досліджень під назвою «Експерименти щодо походження електрики» [29]. Бойл у 1675 р. Заявив, що електричне притягання та відштовхування може діяти у вакуумі. Одним з його важливих відкриттів було те, що електризовані тіла у вакуумі притягують легкі речовини, що вказує на те, що електричний ефект не залежить від повітря як носій. Він також додав смолу до відомого тоді списку електрики.



У 1663 р. Отто фон Геріке (*Otto von Guericke*) винайшов пристрій, який зараз визнаний раннім (можливо, першим) електростатичним генератором, але він не визнав його насамперед як електричний пристрій і не проводив з ним електричних

## Історія електромагнетизму

експериментів. До кінця 17 століття дослідники розробили практичні засоби генерування електроенергії тертям з електростатичним генератором, але розвиток електростатичних машин розпочався серйозно лише у 18 столітті, коли вони стали фундаментальними інструментами у вивченні нової науки про електрику.

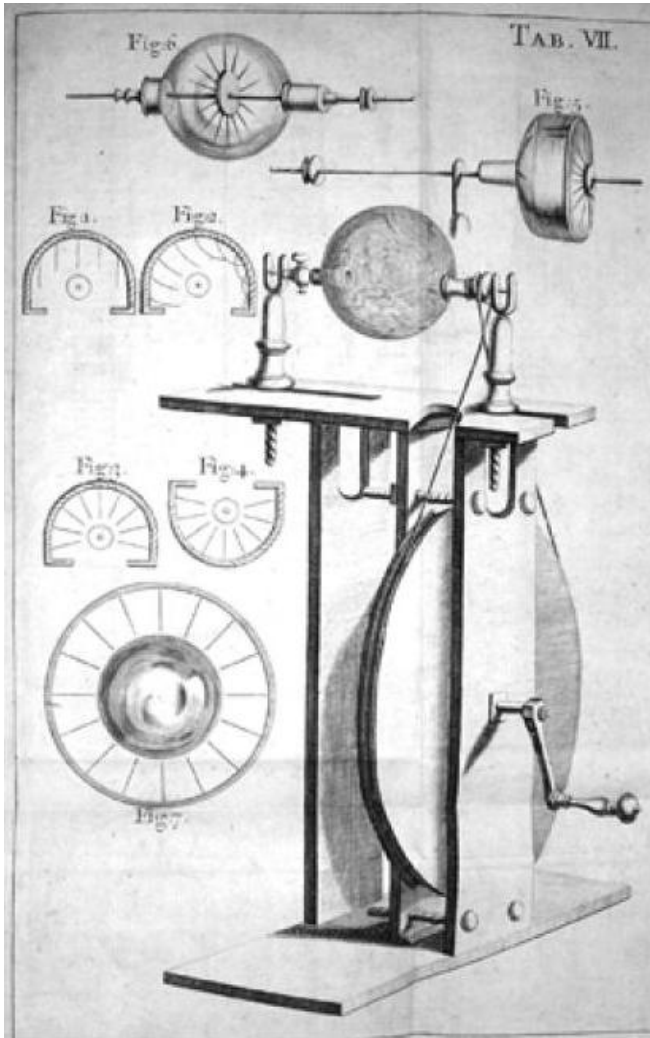
Перше вживання слова електрика приписується серу Томасу Брауну в його праці 1646 року «Епідемія псевдодоксії».

З іншого боку, перша поява терміну електромагнетизм походить від більш ранньої дати: 1641 р. у роботі *Magnes* єзуїта Афанасія Кірхера (*Athanasius Kircher*), на сторінці 640 містить провокаційний заголовок: «Електромагнетизм, тобто про магнетизм бурштинові, або електричні атракції та їх причини "(ηλεκτρομαγνητισμος id est sive De Magnetismo electri, seu electricis atraktionibus earumque causis)".

### 18 століття

#### Удосконалення електростатичної машини

У 18 столітті електростатичну машину вдосконалили Френсіс Хоксбі (*Francis Hauksbee*), його учень Ліцендорф (*Litzendorf*) та професор Георг Матіас Боze (), близько 1750 року. Літцендорф, продовжив дослідження Крістіана Августа Гаузена (*Christian August Hausen*), замінив скляною кулькою сірчану кульку Отто фон Геріке. Боze був першим, хто застосував "прем'єр-провідник" у таких машинах, який складався із залізного стрижня, який тримався в руці людина, тіло якої було ізольоване, стоячи на блоці смоли. Протягом 1746 року Інгенхоуш (*Ingenhousz*) винайшов електростатичну машину з пластинчатого скла. Дослідам з електричною машиною значною мірою сприяло відкриття, що скляна пластина, покрита з обох сторін фольгою, буде накопичувати електричний заряд, коли вона з'єднана з джерелом електрорушійної сили. Незабаром електричну машину було ще більше вдосконалено Ендрю Гордоном (*Andrew Gordon*), шотландцем, професором Ерфурта, який замінив скляний циліндр замість скляної кулі; і Гіссінг (*Giessing*) з Лейпцига, який додав "гуму", що складається з подушки з вовняного матеріалу. Колектор, що складається з низки металевих наконечників, був доданий до машини Бенджаміном Вілсоном (*Benjamin Wilson*) приблизно в 1746 році, а в 1762 році Джон Кантон (*John Canton*) з Англії (також винахідник першого електроскопа з кульками в 1754 році) підвищив ефективність електричних машин шляхом розбризкування амальгами олова на поверхню гуми.



*Генератор, побудований Френсісом Хоксбі.*

### **Провідники (електрика) та діелектрики (неелектрика)**

У 1729 році Стивен Грей (*Stephen Gray*) провів серію експериментів, які продемонстрували різницю між провідниками та непровідниками (ізоляторами), продемонструвавши, серед іншого, що металевий дріт і навіть пачка з нитками проводять електрику, тоді як шовк-ні. В одному зі своїх експериментів він направив електричний струм через 800 футів нитки з коноплі, яка з проміжками часу підвішувалася петлями шовкової нитки. Коли він спробував провести той самий

експеримент, замінивши шовк тонко пряденим латунним дротом, він виявив, що електричний струм більше не проходить по конопляному шнуру, а, здається, зникає в латунній дроті. У цьому експерименті він класифікував речовини на дві категорії: «електрику», наприклад скло, смолу і шовк, і «неелектрику», наприклад метал і воду. "Неелектричні" проводили заряди, а "електричні" тримали заряд. [11] [39]

### Склоподібні та смолисті речовини

Зацікавлений результатами Грея, у 1732 р. К. Ф. дю Фей (*C. F. du Fay*) почав проводити кілька експериментів. У своєму першому експерименті Дю Фей дійшов висновку, що всі предмети, крім металів, тварин та рідин, можна електризувати тертям, а метали, тварин та рідини можна електризувати за допомогою електричної машини, тим самим дискредитуючи «електрику» та «не електрика» класифікація речовин.

У 1733 році Ду Фей відкрив, на його думку, два види фрикційної, тобто порожденної тертям, електрики; один тип електрики утворився з натирання скла, інший — з терти смоли. Виходячи з цього, Дю Фей висунув теорію, що електрика складається з двох електричних рідин, "склоподібної" та "смолистої", які розділені тертям і нейтралізують одна одну при поєднанні. Цю картину електрики також підтримав Крістіан Готліб Краценштейн (*Christian Gottlieb Kratzenstein*) у своїх теоретичних та експериментальних працях. Пізніше теорія двох рідин породила концепцію позитивних і негативних електричних зарядів, розроблену Бенджаміном Франкліном.

### Лейденська банка

Лейденська банка, тип конденсатора для електричної енергії у великих кількостях, була незалежно винайдена Евальдом Георгом фон Клейстом (*Ewald Georg von Kleist*) 11 жовтня 1744 р. та Пітером ван Мюшенбрюком (*Pieter van Musschenbroek*) у 1745–1746 рр. у Лейденському університеті (останнє місце дало назву пристрою).

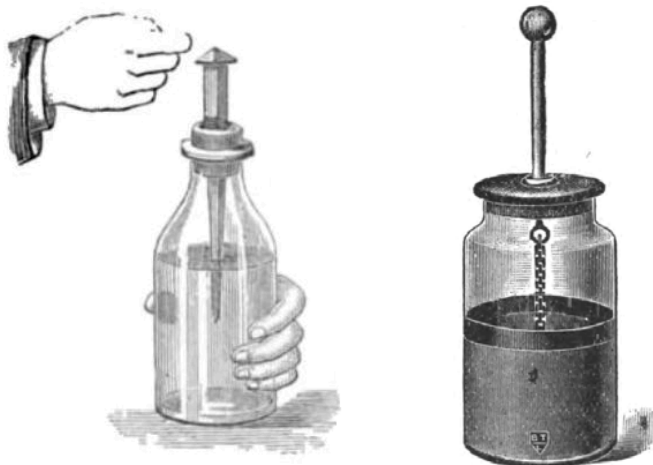
Експериментуючи з баночкою Лейдена, Вільям Вотсон виявив у 1747 році, що розряд статичної електрики еквівалентний електричному струму. Вперше емність була помічена фон Клейстом з Лейдена в 1754 р. Фон Кляйст випадково тримав біля своєї електричної машини маленьку пляшечку, у горловині якої був залізний цвях. Доторкнувшись випадково іншою рукою до залізного цвяха, він отримав сильний удар струмом. Приблизно так само Мусшенброк з допомогою Кунанса зазнав більш серйозного шоку від дещо подібної скляної пляшки. Англійський сер Вільям Уотсон значно покращив цей пристрій, накривши пляшку або банку зовні та всередині фольгою. Цей фрагмент електричного приладу буде легко впізнати як відому банку Лейдена, яку так назвав абат Нолле з Парижа, за місцем її відкриття.

У 1741 році Джон Еллікотт "запропонував виміряти силу електризації за допомогою її сили підняти вагу в одній шкалі ваги, тоді як іншу тримали над електрифікованим тілом і притягували до неї своєю привабливою силою". Ще в 1746 році Жан-Антуан Нолле (1700–1770) проводив експерименти зі швидкістю поширення електрики. Залучивши 200 ченців -картузіанців, з'єднаних з рук в руки залізними



## Розділ 0

дротами [44] так, щоб утворити коло довжиною близько 1,6 км, йому вдалося довести, що ця швидкість кінцева, хоча і дуже висока.



а

б

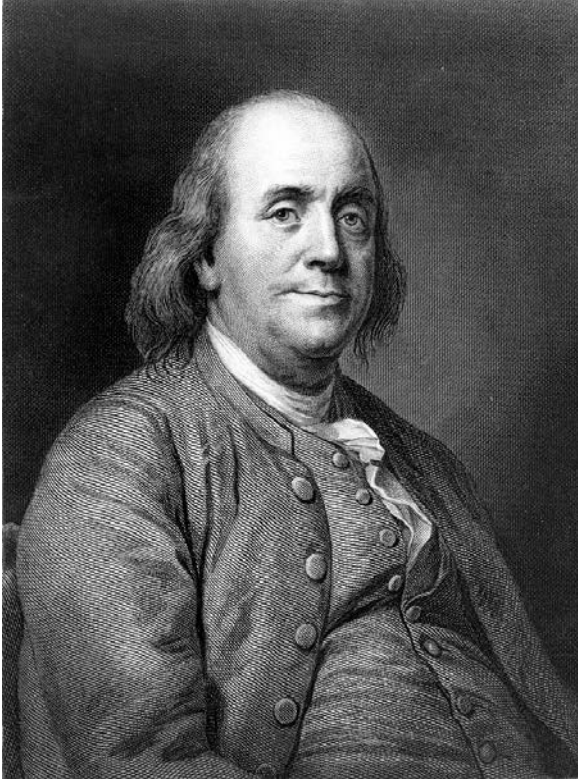
- а) Рання конструкція банки Лейдена, заповнена водою, що складається з пляшки з металевим шипом через пробку для контакту з водою
- б) Пізніший більш поширений тип банки Лейдена з використанням металевої фольги, 1919 рік

У 1749 році сер Вільям Уотсон провів численні експерименти, щоб з'ясувати швидкість електрики в дроті. Ці експерименти, хоча, можливо, і не передбачалися таким чином, але також продемонстрували можливість передачі сигналів на відстань за допомогою електрики. У цих експериментах сигнал виявився, що миттєво пройде ізольований провід довжиною 12 276 футів. Ле Монньє у Франції раніше проводив дещо подібні експерименти, посилаючи удари через залізний дріт завдовжки 1319 футів. [11]

Близько 1750 року були зроблені перші експерименти з електротерапії. Різні експериментатори проводили тести, щоб встановити фізіологічні та терапевтичні ефекти електрики. Типовим для цих зусиль був Кратценштейн у Галле, який у 1744 році написав трактат на цю тему. Demainbrau в Единбурзі досліджував вплив електрики на рослини і дійшов висновку, що зростання двох миртових дерев прискорилося електрифікацією. Ці мирти були електрифіковані "протягом усього жовтня 1746 р., і вони розпустили гілки та зацвіли раніше, ніж інші чагарники того ж виду, не електрифіковані" [47]. Аббат Менон у Франції спробував вплинути на постійне застосування електрики. людей та птахів і виявили, що досліджувані експериментували зі схудненням, таким чином, очевидно, показуючи, що електрика прискорює виділення. [48] [49] Ефективність ураження електричним струмом у випадках паралічу була перевірена в повітій лікарні в Шрусбері, Англія, з досить слабким успіхом [50].

### Кінець 18 століття

Бенджамін Франклін просунув свої дослідження електрики та теорій за допомогою знаменитого, хоча й надзвичайно небезпечного, експерименту, коли його син літав із повітряним змієм через небезпечне штормом небо. Ключ, прикріплений до нитки змія, іскрився і заряджав банку Лейдена, встановлюючи таким чином зв'язок між блискавкою та електрикою. Після цих експериментів він винайшов громовідвід. Вважається, що або Франклін (частіше), або Ебенезер Кінерслі з Філадельфії (рідше) встановили умову позитивної та негативної електрики.



*Бенджамін Франклін.*

Теорії щодо природи електрики були досить розпливчастими в цей період, і ці поширені були більш -менш суперечливими. Франклін вважав, що електрика - це нестерпна рідина, яка пронизує все, і яка в нормальному стані рівномірно розподілена по всіх речовинах. Він припустив, що електричні прояви, отримані при натиранні скла, були обумовлені виробництвом надлишку електричної рідини в цій речовині, а прояви, що виникають при розтиранні воску, були зумовлені дефіцитом рідини. Цьому поясненню протистояли прихильники теорії "двох рідин", такі як Роберт Сіммер у 1759 р. У цій теорії схопа подібна та смоляна електрика

розглядалася як нестерпні рідини, кожна з яких складається з взаємно відштовхувальних частинок, а частинки протилежних електрик є взаємно привабливими.

Коли дві рідини об'єднуються внаслідок їх тяжіння одна до одної, їх вплив на зовнішні об'єкти нейтралізується. Акт розтирання тіла розкладає рідини, одна з яких залишається в надлишку на тілі і проявляється у вигляді склоподібної або смоляної електрики.

До часу історичного експерименту з повітряними зміями Франкліна тотожність електрики, що вироблялася шляхом тертя та електростатичних машин (електрична тертя) з блискавкою, як правило, не встановлювалася. Доктор Волл, абат Нолле, Хоксбі, Стівен Греї та Джон Генрі Вінклер дійсно припустили схожість між явищами "електрики" та "блискавки", Греї натякнув, що вони лише відрізнялися за ступенем. Безперечно, Франклін вперше запропонував тести на визначення однаковості явищ. У листі до Лондона Пітера Комлінсона 19 жовтня 1752 р. Франклін, посилаючись на свій експеримент із зміями, написав:

"У цей ключ можна зарядити флакон (банку Лейдена); і з отриманого таким чином електричного вогню можна розпалити спиртні напої та сформувати всі інші електричні експерименти, які зазвичай проводяться за допомогою протертого скляного глобуса або трубки, і тим самим буде повністю продемонстрована однаковість електричної речовини з блискавкою ».

10 травня 1742 р. Томас-Франсуа Далібард у Марлі (поблизу Парижа) за допомогою вертикального залізного стрижня завдовжки 40 футів отримав результати, відповідні тим, що були записані Франкліном і дещо до дати експерименту Франкліна. Важлива демонстрація Франкліном однаковості фрикційної електрики та блискавки, безсумнівно, додала родзинку зусиллям багатьох експериментаторів у цій галузі в останній половині 18 століття для просування прогресу науки.

Спостереження Франкліна допомогли пізнішим вченим, таким як Майкл Фарадей, Луїджі Гальвані, Алессандро Вольта, Андре-Марі Ампер та Георг Саймон Ом, чия колективна праця стала основою для сучасних електротехнічних технологій і для яких названі основні одиниці вимірювання електрики. Серед інших, хто розвиватиме галузь знань, були Вільям Вотсон (*William Watson*), Георг Матіас Бозе (*Georg Matthias Bose*), Смітон (*Smeaton*), Луї-Гійом Ле Монньє (*Louis-Guillaume Le Monnier*), Жак де Ромас (*Jacques de Romas*), Жан Джаллаберт (*Jean Jallabert*), Джованні Баттіста Беккарія (*Giovanni Battista Beccaria*), Тіберій Кавалло (*Tiberius Cavallo*), Джон Кантон (*John Canton*), Роберт Сіммер (*Robert Symmer*), абат Нолле (*Abbot Nollet*), Джон Генрі Вінклер (*John Henry Winkler*), Бенджамін Вілсон (*Benjamin Wilson*), Ебенезер Кіннерслі (*Ebenezer Kinnersley*), Джозеф Прістлі (*Joseph Priestley*), Франц Епінус (*Franz Aepinus*), Едвард Хассі Делавай (*Edward Hussey Délavai*), Генрі Кавендіш (*Henry Cavendish*) та Шарль-Августин де Кулон (*Charles-Augustin de Coulomb*). Описи багатьох експериментів і відкриттів цих ранніх вчених-електротехніків можна знайти в наукових публікаціях того часу, зокрема у «Філософських транзакціях», «Філософському журналі», «Кембриджському математичному журналі», «Натуральній філософії Янга», «Історії електрики Прістлі», «Експериментах Франкліна» та спостереженнях Електрика, Трактат Каваллі про електрику та Трактат Де Ла Ріве про електрику.

Генрі Еллес (*Henry Elles*) був одним з перших людей, які запропонували зв'язок між електрикою та магнетизмом. У 1757 р. Він стверджував, що писав у 1755 р. Королівському товариству про зв'язки між електрикою та магнетизмом, стверджуючи, що "є деякі речі у силі магнетизму, дуже подібні до властивостей електрики", але він "ні в якому разі не думає вони однакові". У 1760 р. Він так само стверджував, що у 1750 р. Він першим «подумав, як електричний вогонь може стати причиною грому» [58]. Серед більш важливих електричних досліджень та експериментів у цей період були такі Франц Епінус, відомий німецький вчений (1724–1802) та Генрі Кавендіш з Лондона, Англія [11].

Франц Епінус (*Franz Aepinus*) вважається першим, хто усвідомив погляд на взаємний зв'язок електрики та магнетизму. У своїй праці «*Tentamen Theoria Electricitatis et Magnetism*», опублікованій у Санкт-Петербурзі 1759 р., він дає таке розширення теорії Франкліна, яка за деякими своїми рисами до певної міри відповідає сучасним поглядам: «Частинки електричної рідини відштовхують одна одну, притягується і притягується частинками всіх тіл із силою, яка пропорційно зменшується зі збільшенням відстані; електрична рідина існує в порах тіл; вона безперешкодно рухається через неелектричні (провідники), але рухається з труднощами в ізоляторах; прояви електрики обумовлені нерівномірним розподілом рідини в тілі або наближенням тіл, нерівномірно заряджених рідиною". Епінус сформулював відповідну теорію магнетизму, за винятком того, що у випадку магнітних явищ рідини діяли лише на частинки заліза. Він також зробив численні електричні експерименти, очевидно, показавши, що для прояву електричних ефектів турмалін потрібно нагріти до температури від  $37,5^{\circ}\text{C}$  до  $100^{\circ}\text{C}$ . Фактично, турмалін залишається неелектризованим, коли його температура рівномірна, але проявляє електричні властивості, коли його температура зростає або падає. Кристали, які проявляють таким чином електричні властивості, називаються піроелектричними; поряд з турмаліном, вони включають сульфат хініну та кварцу. [11]

Генрі Кавендіш (*Henry Cavendish*) самостійно задумав теорію електрики, майже подібну до теорії Епіна. У 1784 році він був, мабуть, першим, хто використав електричну іскру, щоб викликати вибух водню та кисню у належних пропорціях, які створили б чисту воду. Кавендіш також відкрив індуктивну здатність діелектриків (ізоляторів) і ще в 1778 р. виміряв питому індуктивну здатність бджолиного воску та інших речовин порівняно з повітряним конденсатором.

Близько 1784 р. С.А. Кулон розробив крутильні ваги, виявивши те, що зараз відоме як закон Кулона: сила, що діє між двома маленькими електризованими тілами, змінюється обернено квадрату відстані, а не обернено відстані, як вважав Епінус у його теорії електрики. Згідно з теорією, висунутою Кавендішем, "частинки притягують і притягуються з силою, обернено меншій степені відстані, ніж куб". Значна частина області електрики була практично приєднана відкриттям Кулоном закону обернених квадратів.



Шарль-Августин де Кулон (*Charles-Augustin de Coulomb*)

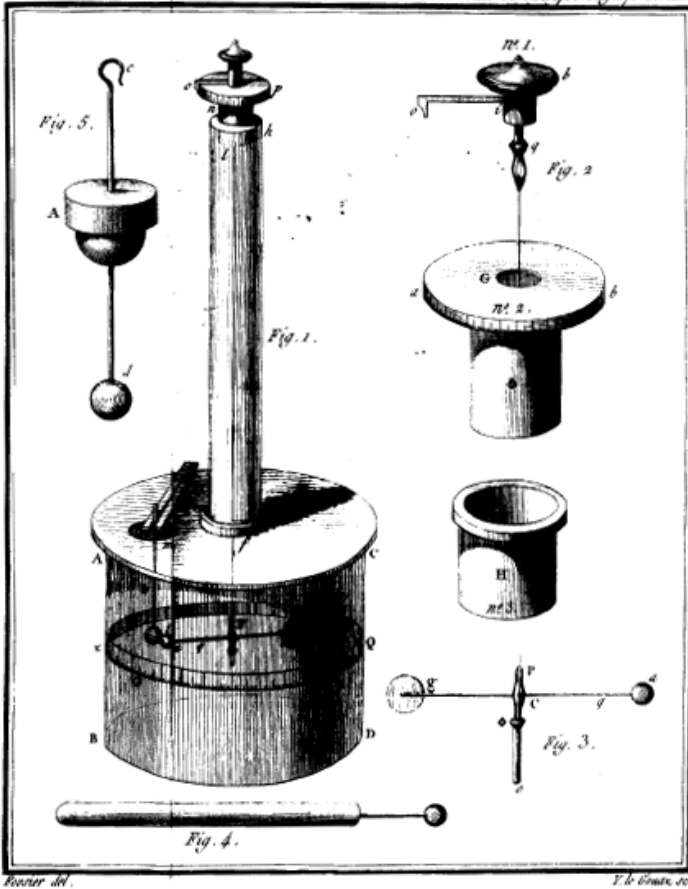
Завдяки експериментам Вільяма Вотсона та інших, що доводять, що електрику можна передавати на відстань, близько 1753 року ідея практичного використання цього явища почала захоплювати свідомість допитливих людей. З цієї метою були висловлені пропозиції щодо використання електроенергії для передачі інформації. Першим із методів, розроблених для цієї мети, ймовірно, був метод Жоржа Лесажа у 1774 р. Цей метод складався з 24 проводів, ізольованих один від одного, і кожен з них мав точкову кульку, з'єднану з її далеким кінцем. Кожен дріт являв собою букву алфавіту. Щоб надіслати повідомлення, потрібний провід миттєво зарядився електрикою від електричної машини, після чого вирвалася кулька, з'єднана з цим дротом. Були також випробувані інші методи телеграфування, в яких використовувалася електрична тертя, деякі з яких описані в історії телеграфу.

Епоха гальванічної або вольтаїчної електрики являла собою революційний відрив від історичної орієнтації на електрику тертя. Алессандро Вольта виявив, що хімічні реакції можуть бути використані для створення позитивно заряджених анодів та негативно заряджених катодів. Коли між ними був приєднаний провідник,

## Історія електромагнетизму

різниця в електричному потенціалі (також відома як напруга) пропускала струм між ними через провідник. Різниця потенціалів між двома точками вимірюється в одиницях вольт у визнанні роботи Вольти.

*Mem. de l'Ac. R. des Sc. An. 1785. Page 576. Pl. XIII.*



Креслення крутильних ваг Кулона

Перша згадка про вольтову електрику, хоча тоді вона не визнавалася такою, ймовірно, була зроблена Йоганом Георгом Сульцером у 1767 р., який, помістивши під язик невеликий диск з цинком, а над ним невеликий диск з міддю, помітив особливу смак, коли відповідні метали торкаються їх країв. Сульцер припустив, що коли метали зійшлися, вони піддаються вібрації, впливаючи на нерви язика, щоб викликати помітні ефекти. У 1790 р. Проф. Луїджі Алісіо Гальвані з Болоньї під час проведення експериментів з «електрикою тварин» помітив посмикування жабиних ніг у присутності електричної машини. Він помітив, що м'яз жаби, підвішений на залізній балюстраді мідним гачком, що проходить через її спинний стовп,

заснав жвавих судом без сторонніх причин, т. Електрична машина на даний час відсутня.

Щоб пояснити це явище, Гальвані припустив, що в нервах і м'язах жаби існує електрика протилежного типу, м'язи та нерви, які складають заряджені оболонки банки Лейдена. Гальвані опублікував результати своїх відкриттів разом зі своєю гіпотезою, яка привернула увагу тодішніх фізиків. Найбільш помітним з них був професор фізики з Павії Вольта, який стверджував, що результати, які спостерігав Гальвані, були результатом дії двох металів, міді та заліза, що діють як електрод-вигуни, і що м'язи жаби грали роль провідник, завершуючи ланцюг. Це викликало тривалу дискусію між прихильниками суперечливих поглядів. Одна група погодилася з Вольтою, що електричний струм був результатом дії електрорушійної сили контакту двох металів; інший прийняв модифікацію погляду Гальвані і стверджував, що струм є результатом хімічної спорідненості між металами та кислотами в купі. Майкл Фарадей писав у передмові до своїх Експериментальних Досліджень щодо питання про те, чи є металевий контакт продуктивним для частини електрики вольтової купи: "Я поки що не бачу причин змінювати свою думку; ... але сам момент має настільки велике значення, що я маю намір при першій нагоді поновити розслідування і, якщо зможу, зробити докази з тієї чи іншої сторони незаперечними для всіх ».

Однак навіть сам Фарадей не вирішив суперечок, і хоча погляди адвокатів з обох сторін питання зазнали змін, як того вимагали подальші розслідування та відкриття, до 1918 р. Продовжувало виявлятися різноманітність думок з цих питань. Вольта зробив численні експерименти на підтримку своєї теорії і в кінцевому підсумку розробив купу або батарею [65], яка була попередницею всіх наступних хімічних батарей, і мав відмінне достоїнство бути першим засобом, за допомогою якого можна було отримати тривалий безперервний струм електрики. Вольта передав опис своєї купи Лондонському королівському товариству, а незабаром після цього Ніколсон і Кавендіш (1780 р.) Здійснили розкладання води за допомогою електричного струму, використовуючи елементи Вольти як джерело електрорушійної сили.

## 19 століття

### Початок 19 століття

У 1800 році Алессандро Вольта сконструював перший пристрій для виробництва великого електричного струму, пізніше відомий як електричний акумулятор. Наполеон, поінформований про його твори, викликав його в 1801 році для командного виконання експериментів. Він отримав багато медалей та нагород, у тому числі Почесний легіон.



*Алессандро Вольта.*

Деві в 1806 р., використовуючи вольтів стовп приблизно 250 елементів або пар, розклав калій та соду, показавши, що ці речовини були відповідно оксидами калію та натрію, металів, які раніше були невідомі. Ці експерименти були початком електрохімії, дослідженням якої займався Фарадей, і щодо якої 1833 р. Він оголосив свій важливий закон електрохімічних еквівалентів, а саме: «Одна і та ж кількість електрики - тобто той самий електричний струм - розкладається хімічно еквівалентні величини всіх тіл, які він перетинає; отже, ваги елементів, розділених у цих електролітах, відносяться один до одного як їх хімічні еквіваленти ». Використовуючи батарею з 2000 елементів вольтової купи, Гемфрі Деві у 1809 році вперше публічно продемонстрував світло електричної дуги, використовуючи для цього вугілля, укладене у вакуум.

Дещо важливо відзначити, що лише через багато років після відкриття вольтової купи чітко було визнано та продемонстровано однаковість електричної та фрикційної електрики з вольтовою. Таким чином, ще в січні 1833 р. Ми знаходимо Фарадея [66] у роботі про електрику електричного променя.





*Ганс Крістіан Ерстед*

"Після вивчення експериментів Уолша, [67] [68] Ингенхоуза, Генрі Кавендіша, сера Х. Деві та доктора Деві, я не маю жодного сумніву щодо ідентичності електрики торпеди із загальним (фрикційну) і вольтаїчну електрику; і я припускаю, що на думку інших залишиться так мало, щоб виправдати моє утримання від того, щоб довго не входити у філософський доказ цієї ідентичності. Д-р Деві; результати останнього є протилежними результатам першого ... Загальний висновок, який, на мою думку, слід зробити з цієї збірки фактів (таблиця, що показує подібність властивостей різних імен електрики) полягає в тому, що електрика, незалежно від того, що є її джерелом, ідентична за своєю природою".

Доречно констатувати, що до часів Фарадея подібність електрики, отриманої з різних джерел, була більш ніж підозрюваною. Так, Вільям Хайд Волластон у 1801 р. писав: «Ця подібність у засобах, за допомогою яких збуджується електрика та гальванізм (вольтаїчна електрика), на додаток до подібності, що простежується

між їхніми ефектами, показує, що обидва вони по суті однакові і підтверджують думку, яку вже висловлювали інші, що всі відмінності, які можна виявити в наслідках останньої, можуть бути зумовлені її меншою інтенсивністю, але виробленою у набагато більшій кількості». У цій же роботі Волластон описує певні експерименти, в яких він використовує дуже тонкий дріт у розчині мідного купоросу, через який пропускав електричні струми від електричної машини.

Це цікаво у зв'язку з використанням пізніше дня майже однаково розташованих тонких проводів в електролітичних прийमाчах у бездротовій мережі або радіотелеграфії.

У першій половині XIX століття до знань світу про електрику та магнетизм було внесено багато дуже важливих доповнень. Наприклад, у 1820 році Ганс Крістіан Ерстед з Копенгагена виявив відхиляючу дію електричного струму, що перетинає дріт на підвишену магнітну стрілку.

Це відкриття дало підказку згодом доведеному інтимному зв'язку між електрикою та магнетизмом, за яким негайно продовжив Ампер, який через кілька місяців, у вересні 1820 р., Представив перші елементи своєї нової теорії, яку він розробив у наступні роки, що завершилося публікація у його 1827 р. *"Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience"* ("Спогади про математичну теорію електродинамічних явищ, унікально виведені з досвіду"), де оголошується його знаменита теорія електродинаміки, що стосується сили на інший, завдяки своїм електромагнітним ефектам, а саме:

- Дві паралельні частини кола притягують одна одну, якщо струми в них течуть в одному напрямку, і відштовхуються, якщо струми течуть у протилежному напрямку.
- Дві частини схем, що перетинаються одна з одною, косо притягують одна одну, якщо обидва струми протікають або до точки перетину, або від неї, і відштовхуються, якщо одна тече до цієї точки, а інша - від цієї.
- Коли елемент кола чинить силу на інший елемент кола, ця сила завжди прагне натискати другий у напрямку під прямим кутом до свого напрямку.

Ампер приніс у теорію безліч явищ своїми дослідженнями механічних сил між провідниками, що підтримують струми та магніти. Джеймс Клерк Максвелл у своєму "Трактаті про електрику та магнетизм" назвав Ампера "Ньютоном електрики"

Німецький фізик Зеебек у 1821 році виявив, що при нагріванні місця з'єднання двох металів, які були припаяні разом, виникає електричний струм. Це називається термоелектрикою. Пристрій Зеебека складається з мідної смуги, зігнутої на кожному кінці і припаяної до пластини з вісмуту. Паралельно мідній смугі розміщується магнітна стрілка. При нагріванні лампи до місця з'єднання міді та вісмуту виникає електричний струм, який відхиляє голку.



*Андре-Мари Ампер.*

Приблизно в цей час Сімеон Дені Пуассон (*Siméon Denis Poisson*) атакував складну проблему індукованої намагніченості, і його результати, хоча й виражені по-різному, все ще залишаються теорією як найважливіше перше наближення. Саме в застосуванні математики до фізики були зроблені його заслуги перед наукою. Мабуть, найоригінальнішими і, безумовно, найбільш постійними за своїм впливом, були його спогади про теорію електрики та магнетизму, які практично створили нову галузь математичної фізики.

Джордж Грін (*George Green*) написав «Нарис застосування математичного аналізу до теорій електрики та магнетизму» у 1828 р. У цьому нарисі було

представлено кілька важливих понять, серед яких теорема, подібна до сучасної теореми Гріна, ідея потенційних функцій, яка зараз використовується у фізиці, і концепція того, що зараз називається функціями Гріна. Джордж Грін був першою людиною, яка створила математичну теорію електрики та магнетизму, і його теорія лягла в основу роботи інших вчених, таких як Джеймс Клерк Максвелл, Вільям Томсон та інші.

У 1834 році Пельтьє відкрив ефект, протилежний термоелектриці, а саме те, що при проходженні струму через пару різних металів температура знижується або підвищується на стику металів, залежно від напрямку струму. Це називається ефектом Пельтьє. Зміни температури пропорційні силі струму, а не квадрату сили струму, як у випадку тепла через звичайний опір провідника. Другий закон - закон  $I^2R$ , експериментально відкритий в 1841 р. англійським фізиком Джоулем. Іншими словами, цей важливий закон полягає в тому, що теплота, що виділяється в будь-якій частині електричного кола, прямо пропорційна добутку опору  $R$  цієї частини кола та квадрату сили струму  $I$ , що протікає по колу. [11]

У 1822 році Йоганн Швайггер створив перший гальванометр. Згодом цей інструмент був значно вдосконалений Вільгельмом Вебером (1833). У 1825 році Вільям Стерджен з Вулвіча, Англія, винайшов підково -прямий електромагніт, отримавши за це срібну медаль Товариства мистецтв. [71] У 1837 році Карл Фрідріх Гаус і Вебер (обидва відомі працівники цього періоду) спільно винайшли відбивний гальванометр для телеграфних цілей. Це був попередник відбиваючих та інших надзвичайно чутливих гальванометрів Томсона, які колись використовувалися в сигналізації підводних човнів і досі широко використовуються в електричних вимірах. Араго в 1824 році зробив важливе відкриття, що коли мідний диск обертається у власній площині, і якщо магнітну стрілку вільно підвісити на повороті над диском, голка буде обертатися разом з диском. З іншого боку, якщо голка закріплена, вона буде уповільнювати рух диска. Цей ефект був названий обертаннями Араго. [11] [72] [73]

Чарівні Чарльз Бекбідж, Пітер Барлоу, Джон Гершель та інші намагалися пояснити це явище. Справжнє пояснення було зарезервоване для Фарадея, а саме, що електричні струми викликаються в мідному диску шляхом розрізання магнітних силових ліній голки, які струми в свою чергу реагують на голку. Георг Саймон Ом зробив свою роботу щодо опору в 1825 і 1826 роках, і опублікував свої результати в 1827 році як книгу *Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet*. Значне нахнення він черпав у роботах Фур'є щодо теплопровідності у теоретичному поясненні своєї роботи. Для експериментів він спочатку використовував вольтові палі, але пізніше використав термопари, оскільки це забезпечувало більш стабільне джерело напруги з точки зору внутрішнього опору та постійної різниці потенціалів. Він використовував гальванометр для вимірювання струму і знав, що напруга між клемами термопари пропорційна температурі переходу. Потім він додав випробувальні дроти різної довжини, діаметра та матеріалу, щоб завершити схему. Він виявив, що його дані можна моделювати за допомогою простого рівняння зі змінною, що складається з показань з гальванометра, довжини випробовуваного провідника, температури переходу термопари та константи всієї установки.

Виходячи з цього, Ом визначив свій закон пропорційності і опублікував свої результати. У 1827 році він оголосив відомий нині закон, що носить його ім'я, а саме:



*Георг Саймон Ом.*

***Електрорушійна сила = струм × опір***

Ом привів у порядок цілу низку загадкових фактів, що пов'язують електрорушійну силу та електричний струм у провідниках, які всім попереднім електрикам вдалося лише вільно якісно зв'язати разом за деякими досить туманними твердженнями. Ом виявив, що результати можна підсумувати за таким простим законом, і відкриттям Ома значна частина області електрики стала частиною теорії.

### **Фарадей і Генрі**

Відкриття електромагнітної індукції було зроблено майже одночасно, хоча і незалежно один від одного, Майклом Фарадеем, який першим зробив відкриття у 1831 р., Та Джозефом Генрі у 1832 р. [77] [78] Відкриття Генрі самоіндукції та його робота над спіральними провідниками з використанням мідної котушки були оприлюднені в 1835 році, безпосередньо перед відкриттями Фарадея [79] [80] [81].

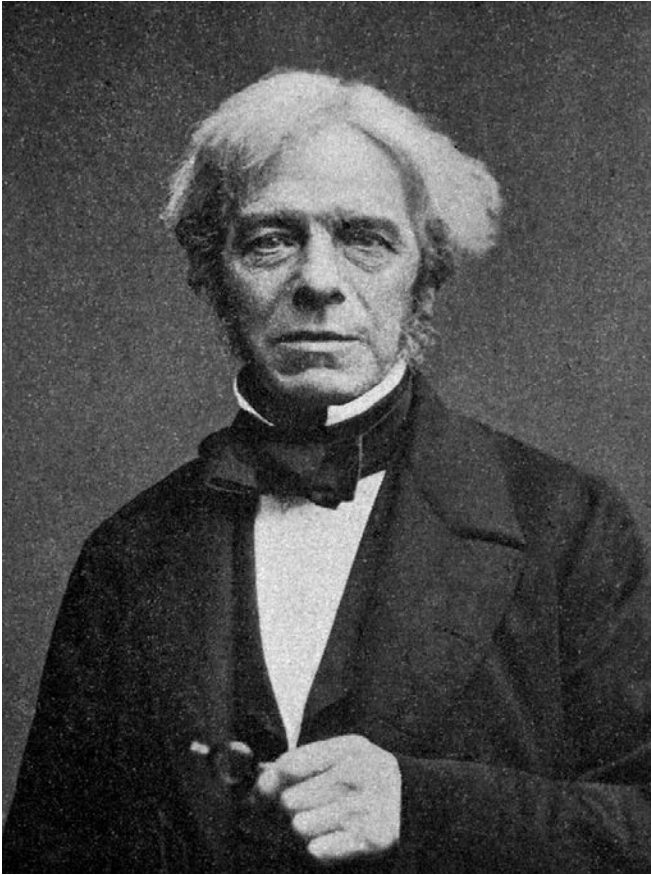
У 1831 р. Почалися епохальні дослідження Майкла Фарадея, відомого учня та наступника Хамфрі Деві на чолі Лондонського королівського інституту, що стосуються електричної та електромагнітної індукції. Чудові дослідження Фарадея, князя експериментаторів, щодо електростатики та електродинаміки та індукції струмів. Вони були достатньо довго переведені з грубого експериментального стану в компактну систему, що виражає справжню сутність. Фарадей не був компетентним математиком [82] [83] [84], але якби він був ним, йому дуже допомогли

б у його дослідженнях, врятував би собі багато марних припущень і очікував би набагато пізнішої роботи. Він, наприклад, знаючи теорію Ампера, за його власними результатами був би легко приведений до теорії Неймана та пов'язаної з ним роботи Гельмгольца і Томсона.



*Джозеф Генрі.*

Дослідження і дослідження Фарадея тривали з 1831 до 1855 р., а докладний опис його експериментів, висновків та припущень можна знайти у його укладених статтях під назвою «Експериментальні дослідження в електроенергетиці». За фахом Фарадей був хіміком. Він не був навіть віддаленим математиком у звичайному розумінні - насправді це питання, чи у всіх його працях є єдина математична формула. [11]



*Майкл Фарадей.*

Експеримент, який привів Фарадея до відкриття електромагнітної індукції, був зроблений таким чином: він сконструював те, що є зараз, а потім отримав назву індукційної котушки, первинний і вторинний дроти якої були намотані на дерев'яну котушку, поруч, і ізольовані від один одного. У ланцюг первинного дроту він помістив батарею приблизно на 100 осередків. У вторинний провід він вставив гальванометр. Під час першого випробування він не побачив результатів, гальванометр залишався нерухомим, але при збільшенні довжини проводів він помітив відхилення гальванометра у вторинному дроті, коли ланцюг первинного дроту був зроблений і розірваний. Це був перший спостережений випадок розвитку електро-рушійної сили за допомогою електромагнітної індукції. [11]

Він також виявив, що індуковані струми встановлюються у другому замкнутому колі, коли сила струму змінюється в першому дроті, і що напрямок струму у вторинному контурі протилежний напрямку в першому колі. Крім того, що струм індукується у вторинному ланцюзі, коли інший контур, що несе струм,

переміщується до першого кола і з нього, і що наближення або відведення магніту до замкнутого кола або від нього викликає миттєві струми в останньому. Одним словом, за кілька місяців Фарадей відкрив експериментом практично всі відомі зараз закони та факти щодо електромагнітної індукції та магнітоелектричної індукції. Від цих відкриттів, за рідкісним винятком, залежить робота телефону, динамо-машини і, супроводжуючи її, практично всі гігантські електротехнічні галузі світу, включаючи електричне освітлення, електричну тягу, роботу електродвигунів для енергетичні цілі, гальванічне покриття, електротипізація тощо [11]

У своїх дослідженнях особливого способу, в якому залізни опилки розташовуються на картоні або склі поблизу полюсів магніту, Фарадей задумав ідею магнітних "силових ліній", що проходять від полюса до полюса магніту і вздовж яких подання мають властивість розміщуватись самостійно. Після того, як було зроблено відкриття, що магнітні ефекти супроводжують проходження електричного струму в дроті, також було припущено, що подібні магнітні силові лінії обертаються навколо дроту. Для зручності та врахування індукованої електрики тоді вважалося, що коли ці силові лінії «перерізаються» дротом, що проходить поперек них, або коли силові лінії підйому та падіння перерізають провід, виникає струм електрики, або, якщо бути точніше, у дроті розвивається електрорушійна сила, яка встановлює струм у замкнутому колі. Фарадей висунув те, що було названо молекулярною теорією електрики [85], яка передбачає, що електрика є проявом своєрідного стану молекули розтертого тіла або ефіру, що оточує тіло. Фарадей також шляхом експерименту відкрив парамагнетизм і діамагнетизм, а саме, що всі тверді тіла та рідини або притягуються, або відштовхуються магнітом. Наприклад, залізо, нікель, кобальт, марганець, хром тощо є парамагнітними (притягуються магнетизмом), тоді як інші речовини, такі як вісмут, фосфор, сурма, цинк тощо, відштовхуються магнетизмом або є діамагнітними. [11] [86]

Бругани з Лейдену в 1778 р. та Ле Бейліф та Беккерель у 1827 р. [87] раніше виявили діамагнетизм у випадку вісмуту та сурми. Фарадей також знову відкрив специфічну індуктивну здатність у 1837 р., Результати експериментів Кавендіша тоді ще не були опубліковані. Він також передбачив [88] уповільнення сигналів на довгих підводних кабелях через індуктивний ефект ізоляції кабелю, іншими словами, статичну ємність кабелю [11]. У 1816 р. Телеграфний піонер Френсіс Рональдс також спостерігав затримку сигналу на своїх похованих телеграфних лініях, приписуючи це індукції [89] [90].

25 років одразу після відкриття Фарадеєм електромагнітної індукції були плідними для оприлюднення законів та фактів, що стосуються індуктованих струмів та магнетизму. У 1834 р. Генріх Ленц та Моріц фон Якобі незалежно продемонстрували відомий нині факт, що струми, наведені в котушці, пропорційні кількості витків у котушці. У той час Ленц також оголосив свій важливий закон, що у всіх випадках електромагнітної індукції індуктовані струми мають такий напрямок, що їхня реакція має тенденцію зупиняти рух, що їх виробляє, закон, який, можливо, можна було вивести з пояснення Фарадея обертань Араго. [11] [91]

Індукційна котушка була вперше спроектована Ніколасом Калланом у 1836 р. У 1845 р. Американський фізик Джозеф Генрі опублікував звіт про свої цінні та цікаві експерименти з індуктованими струмами високого порядку, показавши, що



струми можуть бути викликани вторинною індукцією котушки до первинної частини другої котушки, звідти - до її вторинної дроту і так далі до первинної частини третьої котушки тощо [92] Генріх Даніель Румкорфф далі розробив індукційну котушку, котушка Румкорфа була запатентована в 1851 р. [93], і він використав довгі обмотки мідного дроту, щоб досягти іскри довжиною приблизно 2 дюйми (50 мм). У 1857 році, після вивчення значно вдосконаленої версії, зробленої американським винахідником Едвардом Семюелем Річі [94] [95] [потрібне не первинне джерело] Румкорфф покращив свій дизайн (як і інші інженери), використовуючи утеплювач скла та інші інновації, щоб дозволяють виробляти іскри довжиною більше 300 міліметрів (12 дюймів) [96].

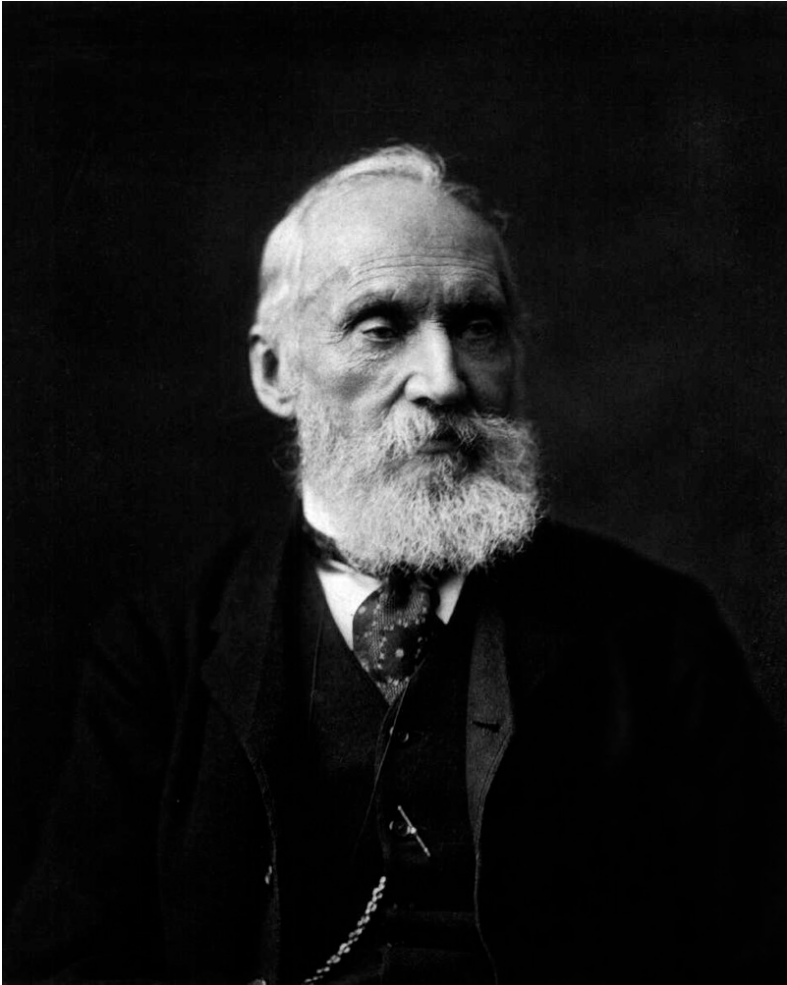
### Середина 19 століття

*«Електромагнітна теорія світла додає до старої хвилеподібної теорії величезну область трансцендентного інтересу та важливості; вона вимагає від нас просто пояснення всіх явищ світла та променистого тепла поперечними коливаннями пружного твердого тіла під назвою ефір, а її включення електричних струмів, постійного магнетизму сталі та ванпяку, магнітної сили та електростатичної сили в комплексній ефірній динаміці».*

- Лорд Кельвін [97]

До середини 19 століття, дійсно приблизно до 1870 року, електротехніка була, можна сказати, запечатаною книгою для більшості електричних працівників. До цього часу було видано ряд довідників з електрики та магнетизму, зокрема вичерпний «Трактат про електрику» Огюста де Ла Ріва [98] у 1851 р. (Французька мова) та 1853 р. (Англійська мова); Einleitung August Beer in die Elektrostatik, die Lehre vom Magnetismus und die Elektrodynamik, [99] "Galvanismus" Відемана та "Reibungsal-elektricitat" Рейса [100]. Але ці роботи в основному полягали в деталях експериментів з електрикою та магнетизмом, але мало в законах та фактах цих явищ. Генрі д'Абрія [101] [102] опублікував результати деяких досліджень законів індукованих струмів, але через їх складність дослідження це не дало дуже помітних результатів [103]. Приблизно в середині XIX століття були опубліковані роботи Флемінга Дженкіна на тему «Електрика та магнетизм [104]» та писар Максвелла «Трактат про електрику та магнетизм» [11].

Ці книги були відхиленнями від протореної стежки. Як стверджує Дженкін у передмові до своєї праці, наука про школу була настільки несхожою на науку практичного електрика, що було неможливо дати учням достатні або навіть приблизно достатні підручники. Студент, за його словами, міг би оволодіти великим і цінним трактатом де ла Ріве, але при цьому відчувати себе ніби в невідомій країні і слухати невідомий мову в компанії практичних людей. Як сказав інший письменник, з появою книг Дженкіна та Максвелла всі перешкоди на шляху вивчення електротехніки були усунені, "стає зрозумілим повний зміст закону Ома; електрошумна сила, різниця потенціалів, опір, струм, ємність, лінії силу, намагніченість та хімічну спорідненість можна було виміряти, і про них можна було міркувати, і про них можна проводити розрахунки з такою самою впевненістю, як і обчислення в динаміці". [11] [105]



*Сер Вільям Томсон.*

Близько 1850 р. Кірхгоф опублікував свої закони, що стосуються розгалужених або розділених схем. Він також математично показав, що згідно з пануючою тоді електродинамічною теорією, електрика буде поширюватися вздовж ідеально провідного дроту зі швидкістю світла. Гельмгольц досліджував математично вплив індукції на силу струму і виводив з них рівняння, які експеримент підтвердив, показавши серед інших важливих моментів затримуючий ефект самоіндукції за певних умов кола [11] [106]

У 1853 році сер Вільям Томсон (пізніше лорд Кельвін) передбачив в результаті математичних розрахунків коливальний характер електричного розряду конденсаторної ланцюга. Однак Генрі належить заслуга того, що в результаті своїх

експериментів у 1842 р. Він помітив коливальний характер розряду банки Лейдена. Він писав: [107] Явища вимагають від нас визнання існування головного розряду в одному напрямку, а потім кількох рефлекторних дій назад і вперед, кожне з яких слабкіше попереднього, до досягнення рівноваги. Згодом ці коливання були помічені Б. В. Феддерсеном (1857) [108] [109], який за допомогою обертового увігнутого дзеркала спроектував зображення електричної іскри на чутливу пластину, тим самим отримавши фотографію іскри, яка чітко вказувала на зміну природи розряд. Сер Вільям Томсон також був першовідкривачем електричної конвекції тепла (ефект «Томсона»). Він призначений для електричних вимірювань точності свого квадранта та абсолютних електрометрів. Відбиваючий гальванометр і реєстратор сифонів, застосовані до сигналізації підводного кабелю, також належать йому. [11]

Близько 1876 року американський фізик Генрі Август Роуланд з Балтимора продемонстрував важливий факт, що статичний заряд, що несеться навколо, виробляє ті ж магнітні ефекти, що і електричний струм. [110] [111] Важливість цього відкриття полягає в тому, що воно може дати правдоподібну теорію магнетизму, а саме те, що магнетизм може бути результатом спрямованого руху рядів молекул, що несуть статичні заряди. [11]

Після відкриття Фарадеєм того, що електричні струми можуть розвиватися в дроті, змушуючи його перетинати силові лінії магніту, можна було очікувати, що будуть зроблені спроби побудувати машини, щоб скористатися цим фактом у розвитку вольтаїчних струмів [112] Перша машина такого типу належить Іполіту Піксію, 1832 р. Вона складалася з двох бобіни із залізного дроту, навпроти яких змушували обертатися полюси підковового магніту. Оскільки це виробляло в котушках дроту змінний струм, Піксі влаштував комутуючий пристрій (комутатор), який перетворював змінний струм котушок або якоря у постійний струм у зовнішньому колі. Ця машина пішла за вдосконаленими формами магнітоелектричних машин завдяки Едварду Семюелю Річі, Джозефу Сакстону, Едварду М. Кларку 1834 р., Емілю Стореру 1843 р., Флорісу Нолле 1849 р., Шепперду [хто?] 1856 р., Ван Мальдерну [хто?], Вернеру фон Сіменс, Генрі Уайльд та інші. [11]

Помітний прогрес у мистецтві будівництва динамо був досягнутий Семюелем Альфредом Варлі в 1866 р. [113] та Сіменсом та Чарльзом Вітстоном [114], які незалежно виявили, що коли котушка дроту або якоря динамо -машини обертається між полюсів (або в "полі") електромагніту, в котушці створюється слабкий струм через залишковий магнетизм в залізі електромагніту, і що якщо ланцюг якоря з'єднати зі ланцюгом електромагніту, слабкий струм, що розвивається в якорі, збільшує магнетизм у полі. Це ще більше збільшує магнітні силові лінії, за яких обертається якоря, що ще більше збільшує струм в електромагніті, тим самим викликаючи відповідне збільшення польового магнетизму і так далі, до максимальної електрорушійної сили, яку здатна розвивати машина досягнуто. За допомогою цього принципу динамо -машина створює власне магнітне поле, тим самим значно підвищуючи її ефективність та економічність роботи. Однак ні в якому разі не було вдосконалено динамо -електричну машину в згаданий час. [11]

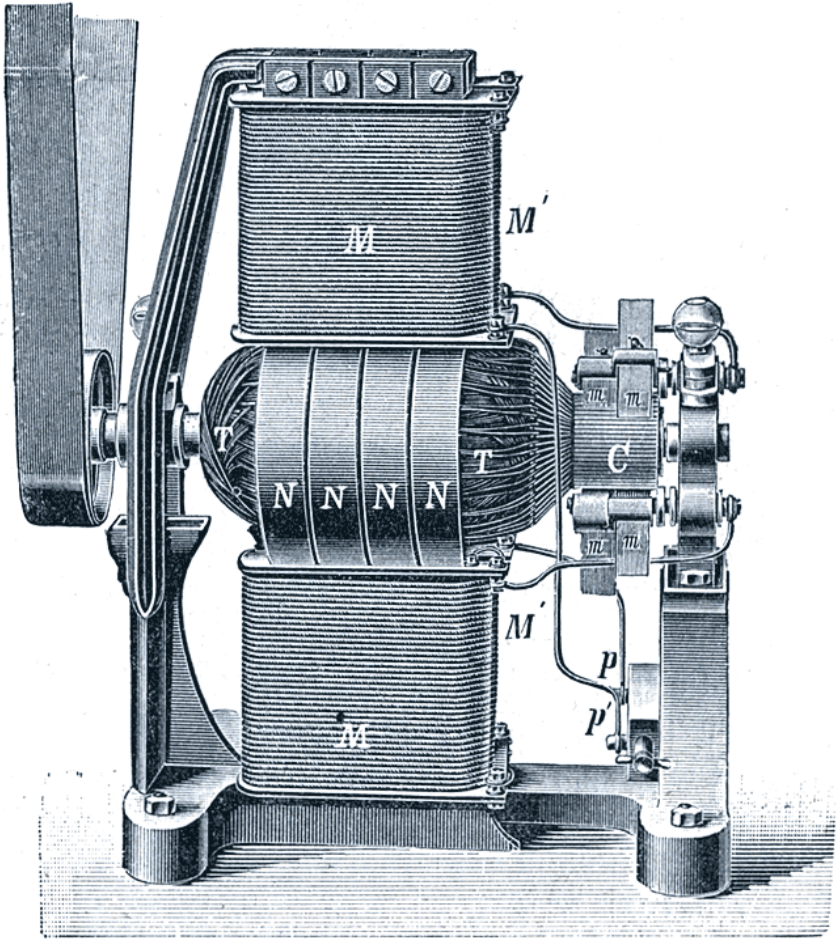


Fig. 389

### Siemens-Hefner-Alteneck'sche Dynamomaschine

*Siemens Hefner-Alteneck Dynamomaschine*

У 1860 році доктор Антоніо Пачінотті з Пізи зробив важливе поліпшення, створивши першу електричну машину з кільцевою арматурою. Ця машина спочатку використовувалася як електродвигун, але згодом як генератор електрики. Відкриття принципу оборотності динамо-електричної машини (по-різному приписується Валенну 1860; Пачінотті 1864; Фонтену, Грамме 1873; Депрезу 1881 та ін.), За допомогою якого вона може бути використана як електродвигун або як генератор електроенергії, був названий одним з найбільших відкриттів 19 століття. [11]

У 1872 році барабанна арматура була розроблена Гефнером-Альтенеком. Ця машина в модифікованому вигляді згодом була відома як динамо Сіменс. В даний час за цими машинами слідували Шукерт, Гюльчер, [115] Фейн, [116] [117] [118] Бруш, Хохгаузен, Едісон та динамо -машини багатьох інших винахідників [119]. У перші дні будівництва динамо-машин машини в основному були влаштовані як генератори постійного струму, і, мабуть, найважливішим застосуванням таких машин на той час було гальванічне покриття, для чого використовувалися машини низької напруги та великої сили струму. [11] [120]

Починаючи приблизно з 1887 р. Генератори змінного струму почали активно працювати та комерційно розвивати трансформатор, за допомогою якого струми низької напруги та великої сили струму перетворюються на струми високої та низької сили струму, і навпаки, з часом революціонізували передача електроенергії на великі відстані. Так само впровадження поворотного перетворювача (у зв'язку з "понижуючим" трансформатором), який перетворює змінні струми в постійні (і навпаки), вплинуло на велику економію в роботі електроенергетичних систем. [11] [121]

До впровадження динамо-електричних машин, вольтаїчних або первинних, батареї широко використовувалися для гальванічного покриття та телеграфування. Існує два різних типи вольтаїчних елементів, а саме: «відкритий» і «закритий», або «постійний» тип. Коротко кажучи, відкритий тип - це тип, який працює на замкнутому контурі, через короткий час стає поляризованим; тобто в осередку виділяються гази, які осідають на негативній пластині і створюють опір, що зменшує силу струму. Після короткого інтервалу розімкненого контуру ці гази виводяться або поглинаються, і комірка знову готова до роботи. Ячейки замкнутого контуру - це клітини, у яких гази в клітинах поглинаються так само швидко, як і вивільняються, а отже, вихід клітини практично рівномірний. Клітини Лекланше та Даніеля, відповідно, є звичними прикладами "відкритого" та "закритого" типу вольтаїчних елементів. Акумулятори типу "Даніель" або "гравітаційні" використовувалися майже зазвичай у США та Канаді як джерело електрорушійної сили в телеграфії до появи динамо -машини [11].

Наприкінці XIX століття термін світловий ефір, що означає світлоносний ефір, був припущеним середовищем для поширення світла [122]. Слово ефір походить від латини від грецького αιθήρ, від кореня, що означає запалювати, спалювати або сяяти. Він позначає речовину, яку в давнину вважали, що вона заповнює верхні частини області космос, за хмарами.

### Максвелл



#### *Джеймс Клерк Максвелл.*

У 1864 р. Джеймс Клерк Максвелл з Единбурга оголосив про свою електромагнітну теорію світла, яка була, мабуть, найбільшим кроком у світових знаннях про електрику [123]. Максвелл вивчав і коментував сферу електрики та магнетизму ще в 1855/6 рр., Коли лінії сили "Про Фарадея" [124] були прочитані Кембриджському філософському товариству. У роботі представлена спрощена модель творчості Фарадея та те, як ці два явища пов'язані між собою. Він скоротив усі наявні знання у зв'язану множину диференціальних рівнянь із 20 рівняннями у 20 змінних. Пізніше ця робота була опублікована як «Про фізичні лінії сили» у березні 1861 р. [125] Щоб визначити силу, яка діє на будь-яку частину машини, ми повинні знайти її імпульс, а потім обчислити швидкість, з якою цей імпульс змінюється. Цей темп змін додасть нам сили. Спосіб розрахунку, яким необхідно скористатися, був вперше запропонований Лагранжем, а потім розроблений з деякими змінами рівняннями Гамільтона. Його зазвичай називають принципом Гамільтона; при використанні рівнянь у вихідному вигляді вони відомі як рівняння Лагранжа. Тепер Максвелл логічно показав, як ці методи розрахунку можна застосувати до електромагнітного поля. [126] Енергія динамічної системи частково кінетична, частково

потенційна. Максвелл припускає, що магнітна енергія поля - це кінетична енергія, потенціал електричної енергії. [127]

Близько 1862 р., Читаючи лекції в Королівському коледжі, Максвелл підрахував, що швидкість поширення електромагнітного поля приблизно дорівнює швидкості світла. Він вважав це не просто збігом обставин, і прокоментував: "Ми навряд чи можемо уникнути висновку, що світло складається з поперечних хвиль того самого середовища, що є причиною електричних і магнітних явищ" [128].

Працюючи далі над проблемою, Максвелл показав, що рівняння передбачають існування хвиль коливальних електричних і магнітних полів, які проходять через порожній простір зі швидкістю, яку можна було передбачити за допомогою простих електричних експериментів; використовуючи наявні на той час дані, Максвелл отримав швидкість 310 740 000 м/с. У своїй роботі 1864 р. «Динамічна теорія електромагнітного поля» Максвелл писав: «Згода результатів, схоже, показує, що світло і магнетизм - це вплив однієї і тієї ж речовини, а світло - це електромагнітні порушення, що поширюються через поле відповідно до електромагнітних законів. [129]

Як уже зазначалося тут, Фарадей, а ще до нього, Ампер та інші, мали уявлення про те, що світловий ефір космосу також є середовищем для електричної дії. За допомогою розрахунків та експериментів було відомо, що швидкість електрики становила приблизно 186 000 миль на секунду; тобто дорівнює швидкості світла, що саме по собі наводить на думку про зв'язок між -електричністю та "світлом". Ряд попередніх філософів або математиків, як називає їх Максвелл, ХІХ століття, дотримувалися точки зору, що електромагнітні явища можна пояснити дією на відстані. Максвелл, слідуючи за Фарадеєм, стверджував, що місцезнаходження явищ - у середовищі. Методи математиків у отриманні результатів були синтетичними, а методи Фарадея - аналітичними. Фарадей у своєму розумі бачив силові лінії, що перетинають увесь простір, де математики бачили центри сили, що притягуються на відстані. Фарадей шукав місце розташування явищ у реальних діях, що відбуваються в середовищі; вони були задоволені тим, що знайшли це в силі дії на відстані на електричних рідинах.

Обидва ці способи, як зазначає Максвелл, зуміли пояснити поширення світла як електромагнітне явище, в той час як фундаментальні уявлення про те, що це за величини, докорінно відрізнялися. Математики припустили, що ізолятори є бар'єром для електричних струмів; що, наприклад, у банці Лейдена або електричному конденсаторі електрика накопичувалася в одній пластині і що декою окультною дією на відстані електрика протилежного виду притягувалася до іншої пластини.

Максвелл, дивлячись далі від Фарадея, міркував, що якщо світло є електромагнітним явищем і пропускається через діелектрики, такі як скло, це явище має носити характер електромагнітних струмів у діелектриках. Тому він стверджував, що, наприклад, під час заряджання конденсатора дія не припинялася на ізоляторі, а що в ізолюючому середовищі створюються певні струми «витіснення», які діють, поки сила опору середовища не дорівнює сили зарядки. У замкненому провідниковому контурі електричний струм також є витісненням електрики.

Провідник надає певний опір, подібний до тертя, витісненню електрики, і тепло розвивається в провіднику пропорційно квадрату струму орендна плата (як

уже зазначалося тут), струм якої протікає до тих пір, поки діє електрична сила, що рухається. Цей опір можна порівняти з тим, з яким стикається корабель під час його переміщення у воді. Опір діелектрика має іншу природу і його порівнюють із стисненням безлічі пружин, які під час стискання падають із збільшенням протитиску, аж до того моменту, коли загальний протитиск дорівнює початковому тиску. Коли початковий тиск знімається, енергія, витрачена на стиснення "пружин", повертається в контур одночасно з поверненням пружин у вихідний стан, що викликає реакцію у зворотному напрямку. Отже, струм внаслідок зміщення електричної енергії в провіднику може бути безперервним, тоді як струми зміщення в діелектрику є миттєвими, а в ланцюзі або середовищі, що містить мало опору порівняно з ємністю або реакцією індуктивності, струми розряду коливального або змінного характеру. [131]

Максвелл поширив це уявлення про струми зміщення в діелектриках на ефір вільного простору. Припускаючи, що світло є проявом змін електричних струмів в ефірі і коливається зі швидкістю світлових коливань, ці індукційні вібрації створюють відповідні коливання в прилеглих частинах ефіру, і таким чином хвилі, відповідні світловим поширюються як електромагнітний ефект в ефірі. Електромагнітна теорія світла Максвелла, очевидно, передбачала існування електричних хвиль у вільному просторі, і його послідовники поставили собі завдання експериментально продемонструвати істинність теорії. До 1871 р. Він представив Зауваження щодо математичної класифікації фізичних величин [132].

### Кінець 19 століття

У 1887 р. Німецький фізик Генріх Герц у серії експериментів довів дійсне існування електромагнітних хвиль, показавши, що поперечні електромагнітні хвилі у вільному просторі можуть подорожувати на деяку відстань, як передбачали Максвелл і Фарадей. Герц опублікував свою роботу в книзі під назвою «Електричні хвилі: дослідження досліджень поширення електричної дії з кінцевою швидкістю у просторі» [133]. Відкриття електромагнітних хвиль у космосі призвело до розвитку радіо в останні роки 19 століття.

Електрон як одиницю заряду в електрохімії був представлений Дж. Джонстоном Стоні в 1874 р., Який також придумав термін електрон у 1894 р. [134] Плазма була вперше ідентифікована в трубці Крукса, і її так описав сер Вільям Крукс у 1879 році (він назвав її «промениста речовина») [135].





*Генріх Герц.*

Місце електрики, що веде до відкриття цих чудових явищ трубки Крукса (завдяки серу Вільяму Круксу), а саме катодних променів [136], а пізніше до відкриття Рентгена чи рентгенівського випромінювання, не повинно бути не помічається, оскільки без електрики як збудника трубки відкриття променів могло бути відкладено на невизначений час. Тут було зазначено, що доктора Вільяма Гілберта називали засновником електротехніки. Це, однак, слід розглядати як порівняльне твердження. [11]



*Олівер Хевісайд*

Олівер Хевісайд був вченим-самоучкою, який переформулював рівняння поля Максвелла з точки зору електричних і магнітних сил та потоку енергії, а також самостійно сформулював векторний аналіз.

Наприкінці 1890 -х рр. Деякі фізики припустили, що електрика, як це спостерігається при дослідженні електричної провідності в провідниках, електролітах та електронно -променевих трубках, складалася з дискретних одиниць, які отримали різні назви, але реальність цих одиниць не мала було переконливо підтверджено. Однак були також ознаки того, що катодні промені мали хвилеподібні властивості. [11]

Фарадей, Вебер, Гельмгольц, Кліффорд та інші мали уявлення про цю точку зору; та експериментальні роботи Зеємана, Голдштейна, Крукса, Дж. Дж. Томсона та інших значно посилили цю точку зору. Вебер передбачив, що електричні явища обумовлені існуванням електричних атомів, вплив яких один на одного залежить від їх положення та відносних прискорень і швидкостей. Гельмгольц та інші також стверджували, що існування електричних атомів впливає із законів електролізу Фарадея, а Джонстон Стоні, якому належить термін "електрон", показав, що кожен

хімічний іон розкладеного електроліту несе певну і постійну кількість електрики, і оскільки ці заряджені іони поділяються на електродах як нейтральні речовини, має бути момент, хоч і короткий, коли заряди повинні існувати окремо як електричні атоми; тоді як у 1887 р. Кліффорд писав: «Є вагомий підстави вважати, що кожен матеріальний атом несе на собі невеликий електричний струм, якщо він не повністю складається з цього струму» [11].



*Дж. Дж. Томсон*

У 1896 році Дж. Дж. Томсон здійснив експерименти, які показали, що катодні промені дійсно є частинками, знайшов точне значення для їх відношення заряду до маси  $e/m$  і виявив, що  $e/m$  не залежить від матеріалу катода. Він зробив хороші оцінки як заряду  $e$ , так і маси  $m$ , виявивши, що частинки катодного променя, які він назвав "корпускулами", мають, мабуть, одну тисячну масу найменш відомого іона (відомого водню). Він також показав, що негативно заряджені частинки, що утворюються радіоактивними матеріалами, нагрітими матеріалами та освітленими матеріалами, були універсальними. Природа речовини катодного променя трубки Крукса була визначена Томсоном у 1897 р. [137] [необхідне не первинне джерело]

Наприкінці 19 століття експеримент Майкельсона – Морлі був виконаний Альбертом А. Майкельсоном та Едвардом У. Морлі в теперішньому Університеті Кейп Вестерн. Зазвичай це вважається доказом проти теорії світлового ефіру. Експеримент також називають "початковою точкою теоретичних аспектів Другої наукової революції" [138]. Перш за все за цю роботу Майклсон був удостоєний Нобелівської премії в 1907 році. Дейтон Міллер продовжив експерименти, проводячи тисячі вимірювань і врешті-решт розробив найточніший інтерферометр у світі на той час. Міллер та інші, такі як Морлі, продовжують спостереження та експерименти, що стосуються концепцій. [139] Ряд запропонованих теорій перетягування ефіру міг би пояснити нульовий результат, але вони були більш складними і мали тенденцію використовувати довільні на вигляд коефіцієнти та фізичні припущення. [11]

До кінця 19 століття інженери -електрики стали окремою професією, окремою від фізиків та винахідників. Вони створили компанії, які досліджували, розробляли та вдосконалювали методи передачі електроенергії, і отримали підтримку урядів у всьому світі для початку першого всесвітня електрична телекомунікаційна мережа, телеграфна мережа. Піонерами в цій галузі стали Вернер фон Сіменс, засновник Siemens AG у 1847 році, та Джон Пендер, засновник компанії Cable & Wireless.

Вільям Стенлі зробив першу публічну демонстрацію трансформатора, який дозволив комерційну доставку змінного струму в 1886 році [140]. Великі двофазні генератори змінного струму були побудовані британським електриком Дж. Е. Х. Гордоном [141] [необхідне не первинне джерело] у 1882 р. Лорд Кельвін та Себастьян Ферранті також розробили ранні генератори змінного струму, які виробляли частоти від 100 до 300 герц. Після 1891 р. Були введені багатофазні генератори змінного струму для подачі струмів з різними фазами [142]. Пізніше генератори змінного струму були розроблені для зміни частот змінного струму від шістнадцяти до приблизно ста герц, для використання з дуговим освітленням, розжарюванням та електричними двигунами. [143]

Можливість отримання електричного струму у великих кількостях та економічно за допомогою динамо -електричних машин дала поштовх до розвитку ламп розжарювання та дугового освітлення. До тих пір, поки ці машини не отримали комерційної основи, вольтаїчні батареї були єдиним доступним джерелом струму для електричного освітлення та живлення. Вартість цих батарей та труднощі з їх підтримкою у надійній роботі були заборонаю для їх використання для практичних цілей освітлення. Дату використання дугових і ламп розжарювання можна встановити приблизно 1877 р. [11]

Однак навіть у 1880 р. Було зроблено невеликий прогрес у загальному використанні цих освітлювачів; швидке подальше зростання цієї галузі - справа загальних знань. [144] Застосування акумуляторних батарей, які спочатку називалися вторинними батареями або акумуляторами, почалося приблизно в 1879 році. Такі батареї зараз широко використовуються як допоміжні засоби для динамо-машини в електростанціях та підстанціях, в електромобілях та у величезній кількості в автомобільні системи запалювання та пуску, також у системах пожежної сигналізації та інших сигнальних системах. [11]

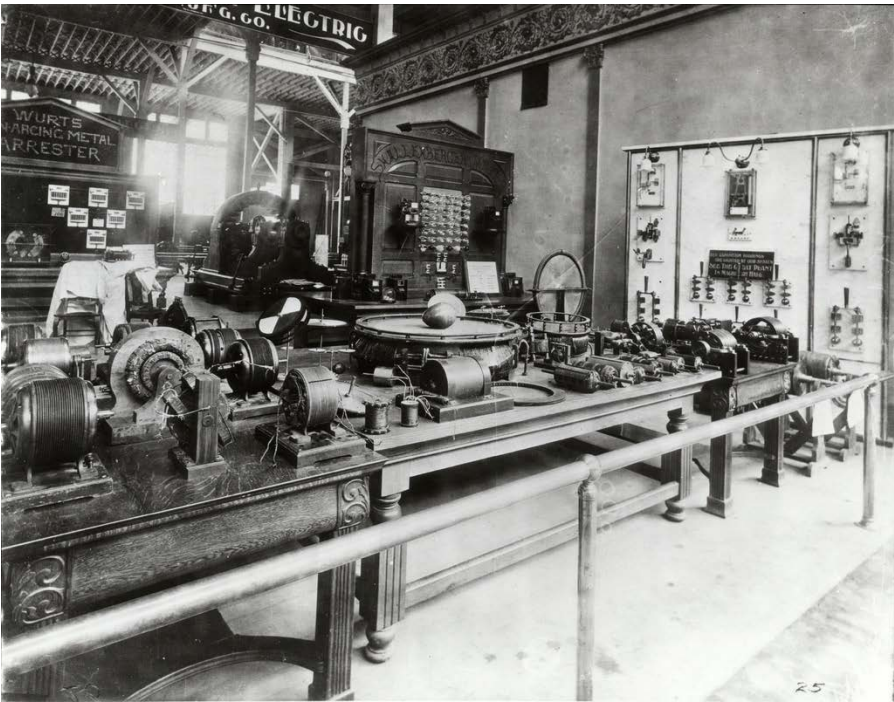
На Всесвітню Колумбійську міжнародну виставку 1893 року в Чикаго компанія General Electric запропонувала жити весь ярмарок постійним струмом.

Westinghouse трохи знизив пропозицію GE і використав ярмарок для дебюту своєї системи на основі змінного струму, показавши, як їхня система може жити багатофазні двигуни та всі інші експонати змінного та постійного струму на ярмарку.

### Друга промислова революція

Друга промислова революція, також відома як Технологічна революція, була фазою швидкої індустріалізації в останній третині XIX століття та на початку XX століття. Поряд з розширенням залізниць, виробництвом заліза та сталі, широким використанням машин у виробництві, значним збільшенням використання парової енергії та нафти, періодом стало розширення використання електроенергії та адаптація електромагнітної теорії до розробки різних технологій.

У 1880-х роках розпочалося поширення широкомасштабних комерційних електроенергетичних систем, спочатку використовуваних для освітлення, а згодом для електрорушійної енергії та опалення. Системи рано використовували змінний та постійний струм. Велике централізоване виробництво електроенергії стало можливим, коли було визнано, що лінії електропередачі змінного струму можуть використовувати трансформатори, щоб скористатися тим фактом, що кожне подвоєння напруги дозволить кабелю однакового розміру передавати однакову кількість електроенергії в чотири рази більшу відстань. Трансформатори були використані для підвищення напруги в точці генерації (репрезентативне число - це напруга генератора в діапазоні низьких кіловольт) до набагато вищої напруги (від десятків тисяч до кількох сотень тисяч вольт) для первинної передачі, після чого відбулося кілька перетворень вниз, для комерційного та житлового побутового використання. [11] Між 1885 і 1890 роками були розроблені поліфазні струми в поєднанні з електромагнітною індукцією та практичними асинхронними двигунами змінного струму.



1893 - Чиказька Всесвітня Колумбійська виставка демонструє патентні асинхронні двигуни Tesla

Міжнародна електротехнічна виставка 1891 р., Що демонструє передачу на великій відстані трифазного електричного струму. Він проходив між 16 травня і 19 жовтня на занедбаному місці трьох колишніх "Вестбанхофе" (Західні залізничні станції) у Франкфурті -на -Майні. На виставці було представлено першу міжміську передачу потужного трифазного електричного струму, який генерувався за 175 км від міста Лауффен-ам-Некар. В результаті цього успішного польового випробування встановлено трифазний струм для мереж електропередачі по всьому світу. [11]

Багато було зроблено у напрямку вдосконалення залізничних терміналів, і важко знайти одного інженера парової залізниці, який би заперечував, що всі важливі парові залізниці цієї країни не повинні експлуатуватися електрично. В інших напрямках очікується, що розвиток подій щодо використання електроенергії буде таким же швидким. У кожній частині світу потужність падіння води, вічного двигуна природи, який з початку існування зникає даремно, тепер перетворюється на електрику і передається дротом за сотні миль до точок, де він використовується корисно та економічно [11] [149]



*Чарльз Протей Штайнмец, теоретик змінного струму.*

Перший вітряк для виробництва електроенергії був побудований в Шотландії в липні 1887 р. Шотландським інженером -електриком Джеймсом Блітом [150]. Через Атлантику, у Клівленді, штат Огайо, у 1887–1888 роках Чарльзом Ф. Брушем був спроектований і сконструйований більший і потужно сконструйований апарат [151] [необхідне не первинне джерело], його побудувала його інженерна компанія у себе вдома. з 1886 по 1900 р. [152] Вітрогенератор Brush мав ротор діаметром 56 футів (17 м) і був встановлений на вежі 60 футів (18 м). Незважаючи на те, що за сучасними мірками машина велика, її потужність була лише 12 кВт; він обертався відносно повільно, оскільки мав 144 леза. Підключене динамо використовувалося або для зарядки батареї, або для роботи до 100 лампочок розжарювання, трьох дугових ламп та різних двигунів у лабораторії Бруша. Машина вийшла з ладу після 1900 року, коли електрика стала доступною з центральних станцій Клівленда, і була залишена в 1908 році [153].

### 20 століття

Представники електротехнічних інститутів світу прийняли і назвали різні одиниці електроенергії та магнетизму, одиниці та назви яких були підтверджені та легалізовані урядами США та інших країн. Таким чином, вольт з італійської Volta був прийнятий як практична одиниця електрорушійної сили, ом, з оповіщувача закону Ома, як практична одиниця опору; ампер, на честь видатного французького вченого з такою назвою, як практичну одиницю сили струму, генрі як практичну одиницю індуктивності, після Джозефа Генрі та на знак визнання його ранніх і важливих експериментальних робіт у взаємній індукції [154].

Дьюар та Джон Амброуз Флемінг передбачили, що при абсолютному нулі чисті метали стануть ідеальними електромагнітними провідниками (хоча пізніше Дьюар змінив свою думку про зникнення опору, вважаючи, що опір завжди буде).

Вальтер Герман Нернст розробив третій закон термодинаміки і заявив, що абсолютний нуль недосяжний. Карл фон Лінде та Вільям Хемпсон, обидва комерційні дослідники, майже одночасно подавали заявки на патенти щодо ефекту Джоуля -Томсона. Патент Лінде став кульмінацією 20 -річного систематичного дослідження встановлених фактів з використанням регенеративного методу протитоку. Дизайн Гемпсона також був регенеративним методом. Комбінований процес став називатися процесом зрідження Лінде – Гемпсона. Хайке Камерлінг Оннес придбала для своїх досліджень машину Linde. Зигмунт Флорентій Врублевський проводив дослідження електричних властивостей при низьких температурах, хоча його дослідження закінчилося рано через його випадкову смерть. Близько 1864 року Кароль Ольшевський та Врублевський передбачили електричні явища падіння рівнів опору при наднизьких температурах. Ольшевський та Врублевський документально підтвердили це у 1880 -х роках. Значний етап був досягнутий 10 липня 1908 р., Коли Оннес з Лейденського університету в Лейдені вперше випустив зріджений гелій і досяг надпровідності.

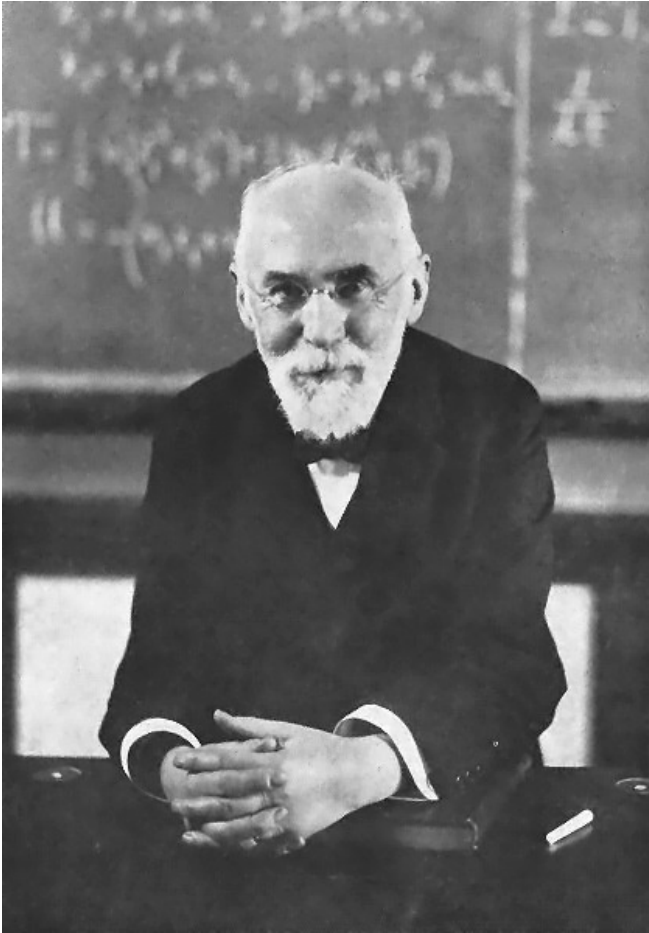
У 1900 році Вільям Дю Буа Дадделл розвиває Співочу дугу і видає з цієї дугової лампи мелодійні звуки від низьких до високих тонів.

### Лоренц і Пуанкаре

Між 1900 і 1910 роками багато вчених, таких як Вільгельм Віден, Макс Авраам, Герман Мінковський чи Густав Мі, вважали, що всі сили природи мають електромагнітне походження (так званий "електромагнітний погляд на світ"). Це було пов'язано з теорією електронів, розробленою між 1892 і 1904 роками Гендріком Лоренцем. Лоренц запровадив суворе розділення між речовиною (електронами) та ефіром, завдяки чому в його моделі ефір повністю нерухомий, і він не буде приводитися в рух в околицях важкої матерії. На відміну від інших моделей електронів раніше, електромагнітне поле ефіру з'являється як посередник між електронами, і зміни в цьому полі можуть поширюватися не швидше, ніж швидкість світла.

У 1896 р., Через три роки після подання дисертації про ефект Керра, Пітер Зіман не послухався прямих наказів свого керівника і використав лабораторне обладнання для вимірювання розщеплення спектральних ліній сильним магнітним полем. Лоренц теоретично пояснив ефект Зеємана на основі своєї теорії, за яку обидва отримали Нобелівську премію з фізики в 1902 р. Фундаментальною концепцією теорії Лоренца 1895 р. була "теорема відповідних станів" для умов порядку  $v/c$ . Ця теорема стверджує, що спостерігач, що рухається (відносно ефіру) здійснює такі ж спостереження, що і спокійний спостерігач. Ця теорема була розширена для всіх порядків Лоренцем у 1904 р.





*Гендрік Лоренц*

Лоренц зауважив, що необхідно змінювати просторово-часові змінні при зміні кадрів і ввів такі поняття, як скорочення фізичної довжини (1892), щоб пояснити експеримент Майкельсона – Морлі, і математична концепція місцевого часу (1895) для пояснення аберації світла та експеримент Фізо. Це призвело до формулювання так званого перетворення Лоренца Джозефом Лармором (1897, 1900) та Лоренцем (1899, 1904) [155] [156] [157] Як пізніше зазначав Лоренц (1921, 1928), він вважав час, зазначений годинниками, що лежать в ефірі, "справжнім" часом, тоді як місцевий час розглядався ним як евристична робоча гіпотеза та математична штучність. [158] [159] Тому сучасні історики розглядають теорему Лоренца як математичну трансформацію з "реальної" системи, що лежить в ефірі, в "фіктивну" систему, що рухається [155] [156] [157]



*Анрі Пуанкаре*

Продовжуючи роботу Лоренца, Анрі Пуанкаре між 1895 і 1905 роками неодноразово формулював принцип відносності та намагався гармонізувати його з електродинамікою. Він оголосив одночасність лише зручною умовою, яка залежить від швидкості світла, завдяки чому сталість швидкості світла була б корисним постулатом для максимально простих законів природи. У 1900 році він інтерпретував місцевий час Лоренца як результат синхронізації годинника за допомогою світлових сигналів, і запровадив електромагнітний імпульс, порівнявши електромагнітну енергію з тим, що він назвав "фіктивною рідиною" маси  $m = E/c^2$ . І, нарешті, у червні та липні 1905 р. Він оголосив принцип відносності загальним законом природи, включаючи тяжіння. Він виправив деякі помилки Лоренца і довів коваріантність Лоренца електромагнітних рівнянь. Пуанкаре також припустив, що існують неелектричні сили для стабілізації електронної конфігурації, і стверджував, що гравітація також є неелектричною силою, що суперечить електромагнітному світогляду. Однак історики зазначили, що він все ще використовував поняття ефіру і розрізняв «видимий» та «реальний» час, а тому не винайшов особливої теорії відносності в її сучасному розумінні [157] [160] [161] [162] [163] [164]

### **Роботи Ейнштейна Annus Mirabilis**

У 1905 році, коли він працював у патентному відомстві, Альберт Ейнштейн опублікував чотири статті у провідному німецькому журналі фізики *Annalen der Physik*. Ось документи, які історія почала називати документами *Annus Mirabilis*:

Його робота про частинку природи світла висунула ідею, що певні експериментальні результати, зокрема фотоелектричний ефект, можна просто зрозуміти з постулату про те, що світло взаємодіє з речовиною як дискретні «пакети» (кванти) енергії, ідея, яка була запроваджений Максом Планком у 1900 р. як суто математична маніпуляція і, здавалося, суперечить сучасним хвильовим теоріям світла (Ейнштейн 1905a). Це був єдиний твір Ейнштейна, який він сам назвав «революційним».

У його роботі про броунівський рух пояснюється випадкове переміщення дуже малих об'єктів як пряме свідчення молекулярної дії, таким чином підтримуючи атомну теорію. (Ейнштейн 1905b)



*Альберт Ейнштейн, 1905 рік*

У його роботі про електродинаміку рухомих тіл була введена радикальна теорія особливої теорії відносності, яка показала, що спостережувана незалежність швидкості світла від стану руху спостерігача вимагає фундаментальних змін у понятті одночасності. Наслідки цього включають часове-просторову рамку рухомого тіла, що сповільнюється і стискається (у напрямку руху) щодо рамки спостерігача. У цій роботі також стверджувалося, що ідея світильного ефіру - однієї з провідних теоретичних сутностей у фізиці того часу - була зайвою. (Ейнштейн 1905c)

У своїй роботі про еквівалентність маси та енергії (раніше вважалися окремими поняттями) Ейнштейн вивів із своїх рівнянь спеціальної теорії відносності те, що згодом стало відомим виразом:  $E = mc^2$ , припускаючи, що крихітні маси можна перетворити на величезну кількість енергії. (Ейнштейн 1905d)

Усі чотири документи сьогодні визнані величезними досягненнями - і тому 1905 рік відомий як «Чудовий рік» Ейнштейна. Однак у той час більшість фізиків не помітили, що вони важливі, і багато з тих, хто їх помітив, відверто відкинули їх. Деякі з цих робіт - наприклад, теорія квантів світла - роками залишалися суперечливими [165] [166].

Перша формулювання квантової теорії, що описує випромінювання та взаємодію речовини, належить Полю Діраку, який протягом 1920 року вперше зміг обчислити коефіцієнт спонтанного випромінювання атома [167]. Поль Дірак описав квантування електромагнітного поля як ансамбль гармонічних осциляторів з введенням концепції операторів створення та знищення частинок. У наступні роки завдяки внескам Вольфганга Паулі, Євгена Вігнера, Паскуала Джордана, Вернера Гейзенберга та витонченої формулювання квантової електродинаміки завдяки Енріко Фермі [168] фізики прийшли до думки, що в принципі можна виконати будь-які обчислення будь-якого фізичного процесу, що включає фотони та заряджені частинки. Однак подальші дослідження Фелікса Блоха з Арнольдом Нордсіком [169] та Віктором Вайскопфом [170] у 1937 та 1939 роках показали, що такі обчислення були надійними лише при першому порядку теорії збурень, на проблему, на яку вже звертав увагу Роберт Оппенгеймер. [171] При вищих порядках у серії з'являлися нескінченності, що робили такі обчислення безглуздими і ставили серйозні сумніви у внутрішню узгодженість самої теорії. Не знаючи того часу рішення цієї проблеми, виявилось, що існує фундаментальна несумісність між спеціальною теорією відносності та квантовою механікою.

У грудні 1938 р. Німецькі хіміки Отто Хан та Фріц Штрасманн надіслали до Натюрвісенсшафтен рукопис, у якому повідомили, що вони виявили елемент барій після бомбардування урану нейтронами [172], і вони одночасно повідомили ці результати Лізі Мейтнер. Мейтнер та її племінник Отто Роберт Фріш правильно інтерпретували ці результати як поділ ядер. [173] Фріш підтвердив це експериментально 13 січня 1939 р. [174] У 1944 році Хан отримав Нобелівську премію з хімії за відкриття поділу ядер. Деякі історики, які задокументували історію відкриття поділу ядер, вважають, що Мейтнеру слід було вручити Нобелівську премію разом з Ханом.

Середина 20 століття



*Пол Дірак*

Труднощі з квантовою теорією зросли до кінця 1940 р. Удосконалення мікрохвильової технології дозволило провести більш точні вимірювання зсуву рівнів атома водню [178], тепер відомого як зсув Лемба та магнітний момент електрона. [179] Ці експерименти однозначно виявили розбіжності, які теорія не змогла пояснити. З винайденням у 1950-х роках камер з бульбашками та іскрових камер експериментальна фізика частинок виявила велику і постійно зростаючу кількість частинок, які називаються адронами. Здавалося, що така велика кількість частинок не може бути фундаментальною.

Незабаром після закінчення війни в 1945 році Bell Labs створили Групу фізики твердого тіла під керівництвом Вільяма Шоклі та хіміка Стенлі Моргана; інший

## Історія електромагнетизму

персонал, включаючи Джона Бардіна та Уолтера Браттена, фізика Джеральда Пірсона, хіміка Роберта Гібні, експерта з електроніки Гілберта Мура та кількох техніків. Їх завданням було знайти твердотільну альтернативу крихким скляним вакуумним ламповим підсилювачам. Їхні перші спроби ґрунтувалися на уявленнях Шоклі про використання зовнішнього електричного поля напівпровідника для впливу на його провідність. Ці експерименти щоразу зазнавали невдач у різноманітних конфігураціях та матеріалах. Група стояла в тупику, поки Бардін не запропонував теорію, яка посилалася на поверхневі стани, які перешкождали проникненню поля в напівпровідник. Група змінила фокус, щоб вивчити ці поверхневі стани, і вони зустрічалися майже щодня, щоб обговорити роботу. Відносини групи були чудові, і ідеї вільно обмінювалися [180].

Щодо проблем в електронних експериментах, шлях до вирішення дав Ганс Бете. У 1947 р., Коли він їхав поїздом, щоб дістатися до Схенектаді з Нью-Йорка [181], після виступу на конференції на острові Шелтер на цю тему, Бете завершив перший нерелятивістський розрахунок зсуву ліній водню атом, виміряний Лембом і Ретерфордом. [182] Незважаючи на обмеження обчислень, угода була чудовою. Ідея полягала в тому, щоб просто додати нескінченності до поправок на масу і заряд, які фактично були зафіксовані до кінцевого значення експериментами. Таким чином, нескінченності поглинаються цими константами і дають кінцевий результат, що добре узгоджується з експериментами. Ця процедура отримала назву перенормування.



*Річард Фейнман*

На основі інтуїції Бете та фундаментальних праць на цю тему Шинічіро Томонага [183] Джуліана Швінгера [184] [185] Річарда Фейнмана [186] [187] [188] та Фрімана Дайсона [189] [190] нарешті вдалося отримати повністю коваріантні

формулювання, кінцеві в будь-якому порядку в ряді збурень квантової електродинаміки. Шинічіро Томонага, Джуліан Швінгер та Річард Фейнман спільно були нагороджені Нобелівською премією з фізики у 1965 році за свою роботу в цій галузі [191]. Їх внесок, а також внесок Фрімена Дайсона, стосувався коваріантів та інваріантних вимірів Ріанті формулювання квантової електродинаміки, що дозволяють обчислювати спостережувані при будь-якому порядку теорії збурень. Математична техніка Фейнмана, заснована на його діаграмах, спочатку здавалася дуже різною від теоретико-польового, операторського підходу Швінгера та Томонага, але пізніше Фрімен Дайсон показав, що ці два підходи були еквівалентними [189]. Ренормалізація, необхідність вкладати фізичний сенс у певні розбіжності, що виникають у теорії за допомогою інтегралів, згодом стала одним із фундаментальних аспектів квантової теорії поля і стала розглядатися як критерій загальної прийнятності теорії. Незважаючи на те, що перенормування працює дуже добре на практиці, Фейнман ніколи не був цілком задоволений своєю математичною валідністю, навіть посилаючись на перенормування як "гру в оболонці" та "фокус фокус" [192]. QED послужив моделлю і шаблоном для всіх наступних квантових теорій поля. Пітер Хітс, Джеффі Голдстоун та інші, Шелдон Глашоу, Стівен Вайнберг та Абдус Салам незалежно показали, як слабку ядерну силу та квантову електродинаміку можна об'єднати в єдину електрослабку силу.

Роберт Нойс вважав Курта Леговека принципом ізоляції р-п-переходу, викликаним дією зміщеного р-п-переходу (діода), як ключову концепцію інтегральної схеми. [193] Джек Кілбі записав свої початкові ідеї щодо інтегральної схеми в липні 1958 р. і успішно продемонстрував першу працюючу інтегральну схему 12 вересня 1958 р. У своїй заявці на патент від 6 лютого 1959 року Кілбі описав свій новий пристрій як "корпус з напівпровідникового матеріалу ... в якому всі компоненти електронної схеми повністю інтегровані". Кілбі отримав Нобелівську премію з фізики 2000 року за його частина винаходу інтегральної схеми. Роберт Нойс також придумав власну ідею інтегральної схеми через півроку пізніше, ніж Кілбі. Чіп Нойса вирішив багато практичних проблем, яких не було у Кілбі. Мікросхема Нойса, виготовлена в Fairchild Semiconductor, була виготовлена з кремнію, а чіп Кілбі - з германію.

Філо Фарнсворт розробив Фарнсворт – Гірш Фузор, або просто фузор, апарат, розроблений Фарнсвортом для створення ядерного синтезу. На відміну від більшості керованих систем термоядерного синтезу, які повільно нагрівають магнітно обмежену плазму, фузор впорскує високотемпературні іони безпосередньо в реакційну камеру, тим самим уникаючи значної складності. Коли наприкінці 1960-х років Фарнсворт-Гірш Фузор був вперше представлений у світі досліджень синтезу, Фузор був першим пристроєм, який чітко продемонстрував, що він взагалі викликає реакції синтезу. Тоді були великі надії, що його можна швидко перетворити на практичне джерело живлення. Однак, як і в інших експериментах з термоядерного синтезу, розробка джерела живлення виявилася важкою. Тим не менше, з тих пір фузор став практичним джерелом нейтронів і для цієї ролі виробляється комерційно.

### Порушення паритету

Дзеркальне відображення електромагніту породжує поле з протилежною полярністю. Таким чином, північний і південний полюси магніту мають таку ж симетрію, що і лівий і правий. До 1956 р. Вважалося, що ця симетрія ідеальна, і що техник не зможе розрізнити північний і південний полюси магніту, за винятком посилення на лівий і правий. Того року Т. Д. Лі та К. Н. Ян передбачили незбереження паритету у слабкій взаємодії. На подив багатьох фізиків, у 1957 році СС Wu та співробітники Національного бюро стандартів США продемонстрували, що за відповідних умов для поляризації ядер бета-розпад кобальту-60 переважно вивільняє електрони до південного полюса зовнішнього магнітного поля, і дещо більшу кількість гамма-променів до північного полюса. В результаті експериментальний апарат не поводить порівняно зі своїм дзеркальним відображенням. [198] [199] [200]

### Теорія електрослабких сил

Першим кроком на шляху до Стандартної моделі стало відкриття Шелдоном Глашю у 1960 році способу поєднання електромагнітної та слабкої взаємодій [201]. У 1967 році Стівен Вайнберг [202] та Абдус Салам [203] включили механізм Хіггса [204] [205] [206] до електрослабкої теорії Глашю, надавши їй її сучасну форму. Вважається, що механізм Хіггса породжує маси всіх елементарних частинок у стандартній моделі. Сюди входять маси бозонів  $W$  і  $Z$ , а також маса ферміонів - тобто кварків та лептонів. Після нейтральних слабких струмів, викликаних  $Z$  обмін бозонами були відкриті в ЦЕРНі в 1973 р., теорія електрослабості стала широко прийнятою, і Глашю, Салам і Вайнберг поділилися Нобелівською премією з фізики 1979 року за її відкриття. Бозони  $W$  і  $Z$  були експериментально виявлені в 1981 році, і їх маси виявилися такими, як передбачала Стандартна модель. Теорія сильної взаємодії, якій сприяли багато, набула свого сучасного вигляду приблизно в 1973-74 рр., Коли експерименти підтвердили, що адрони складаються з дробово заряджених кварків. Зі встановленням квантової хромодинаміки в 1970 -х роках був завершений набір фундаментальних і обмінних частинок, що дозволило встановити "стандартну модель" на основі математики калібрувальної інваріантності, яка успішно описувала всі сили, крім сили тяжіння, і яка залишається загалом прийнятий у домені, до якого він призначений.

"Стандартна модель" згрупує теорію електрослабкої взаємодії та квантову хромодинаміку у структуру, що позначається калібрувальною групою  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ . Формулювання уніфікації електромагнітної та слабкої взаємодій у стандартній моделі належить Абдусу Саламу, Стівену Вайнбергу та згодом Шелдону Глашю. Після відкриття в ЦЕРНі існування нейтральних слабких струмів [211] [212] [213] [214] за посередництва  $Z$  Бозон, передбачений стандартною моделлю, фізики Салам, Глашю та Вайнберг отримали Нобелівську премію з фізики 1979 року за свою електрослабку теорію [215]. З тих пір відкриття нижнього кварка (1977), верхнього кварка (1995) та тау -нейтрино (2000) надали достовірності стандартній моделі.



### 21 століття

**Електромагнітні технології.** Існує ряд новітніх енергетичних технологій. До 2007 року твердотільні мікрометрові двошарові електричні конденсатори на основі прогресивних суперіонних провідників були призначені для низьковольтної електроніки, такої як наноелектроніка глибокої під напругою та пов'язані з нею технології (22-м технологічний вузол КМОП і не тільки). Крім того, нанопровідна батарея, літій-іонна батарея, була винайдена командою під керівництвом доктора І Цуя в 2007 році.

**Магнітний резонанс.** Відображаючи фундаментальну важливість та застосування магнітно -резонансної томографії [216] у медицині, Пол Лаутербер з Університету Іллінойсу в Урбана -Шампейн та сер Пітер Менсфілд з Університету Поттінгема були нагороджені Нобелівською премією з фізіології та медицини 2003 року за свої "відкриття" щодо магнітно -резонансної томографії ". Цитата Нобеля підтвердила уявлення Лаутербура про використання градієнтів магнітного поля для визначення просторової локалізації, відкриття, яке дозволило швидко отримати 2D зображення.

**Бездротова електрика.** Бездротова електрика - це форма бездротової передачі енергії, здатність подавати електричну енергію на віддалені об'єкти без проводів. Термін WiTcity був введений в 2005 році Дейвом Гердінгом, а пізніше був використаний для проекту, очолюваного професором Маріном Соляничем у 2007 році. [218] [219] Дослідники з Массачусетського технологічного інституту успішно продемонстрували здатність бездротового живлення лампочки потужністю 60 Вт, використовуючи дві 5-поворотні мідні котушки діаметром 60 см (24 дюйма), які знаходилися на відстані 2 м (7 футів), приблизно з коефіцієнтом корисної дії 45% [220]. ] Ця технологія потенційно може бути використана у багатьох сферах застосування, включаючи споживчі, промислові, медичні та військові. Його мета - зменшити залежність від батарей. Подальші застосування цієї технології включають передачу інформації - вона не заважатиме радіохвиллям і, отже, може бути використана як дешевий та ефективний пристрій зв'язку, не вимагаючи ліцензії чи дозволу уряду.

**Уніфіковані теорії.** Велика уніфікована теорія (ГУТ) - це модель у фізиці частинок, в якій при високій енергії електромагнітна сила зливається з двома іншими калібрувальними взаємодіями Стандартної моделі - слабкими та сильними ядерними силами. Було запропоновано багато кандидатів, але жоден не підтверджується безпосередньо експериментальними доказами. GUT часто розглядаються як проміжні кроки до "Теорії всього" (ТОЕ), передбачуваної теорії теоретичної фізики, яка повністю пояснює і пов'язує всі відомі фізичні явища і, в ідеалі, має силу передбачення для результатів будь -якого експерименту, який міг би здійснювати в принципі. Жодна така теорія ще не прийнята фізичною спільнотою.

**Відкриті проблеми.** Магнітний монопол у квантовій теорії магнітного заряду розпочався з роботи фізика Поля А.М. Дірака у 1931 р. Виявлення магнітних монополів є відкритою проблемою в експериментальній фізиці. У деяких теоретичних моделях магнітні монополи навряд чи будуть спостерігатися, оскільки вони надто масивні, щоб їх можна було створити в прискорювачах частинок, а також

надто рідкісні у Всесвіті, щоб з великою ймовірністю потрапити в детектор частинок.

Після більш ніж двадцяти років інтенсивних досліджень походження високо-температурної надпровідності все ще не з'ясовано, але, здається, замість механізмів притягання електрон-фононів, як у звичайній надпровідності, ми маємо справу з справжніми електронними механізмами (наприклад, за допомогою антиферромагнітних кореляцій), а замість спарювання s-хвилями суттєвими є пари d-хвиль [223]. Однією з цілей усіх цих досліджень є надпровідність кімнатної температури.

## ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ТА ЕНЕРГОРЕСУРСИ

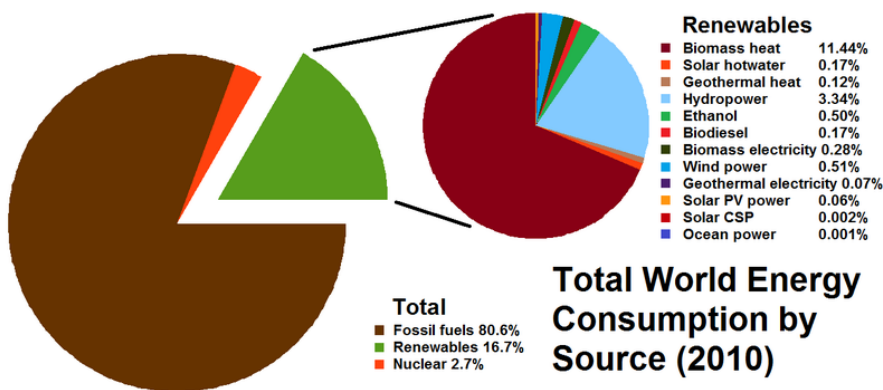
Розвиток енергетики — це сфера діяльності, орієнтована на отримання джерел енергії з природних ресурсів. Ці заходи включають виробництво традиційних, альтернативних та відновлюваних джерел енергії, а також для відновлення та повторного використання енергії, яка в іншому випадку була б витрачена даремно. Заходи з енергозбереження та ефективності зменшують попит на розвиток енергії та можуть принести користь суспільству, покращивши екологічні проблеми.

Суспільства використовують енергію для транспортування, виробництва, освітлення, опалення та кондиціонування повітря, а також для зв'язку, для промислових, комерційних та побутових потреб. Енергетичні ресурси можна класифікувати як первинні ресурси, де ресурс можна використовувати в основному у вихідному вигляді, або як вторинні ресурси, де джерело енергії необхідно перетворити у більш зручну для використання форму. Невідновлювані ресурси істотно виснажуються внаслідок використання людиною, тоді як поновлювані ресурси виробляються за рахунок поточних процесів, які можуть підтримувати невизначену експлуатацію людей.

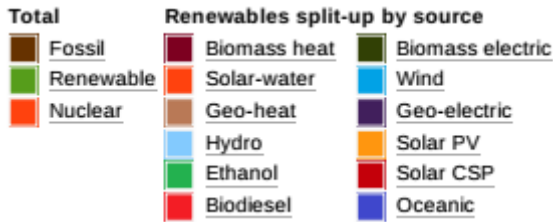
Тисячі людей зайняті в енергетичній промисловості. Звичайна промисловість включає нафтову промисловість, промисловість природного газу, електроенергетику та ядерну промисловість. Нові галузі енергетики включають промисловість відновлюваних джерел енергії, що включає альтернативне та стале виробництво, розподіл та продаж альтернативних видів палива.

### Розвиток енергетики

Схема глобальних джерел енергії у 2010 році



## Розділ 3



Загальний розподіл відновлюваних джерел за джерелом

Викопні

Поновлювані

Ядерний

Тепло біомаси

Сонячна вода

Геотепло

Гідро

Етанол

Біодизель

Електрична біомаса

Вітер

Геоелектричні

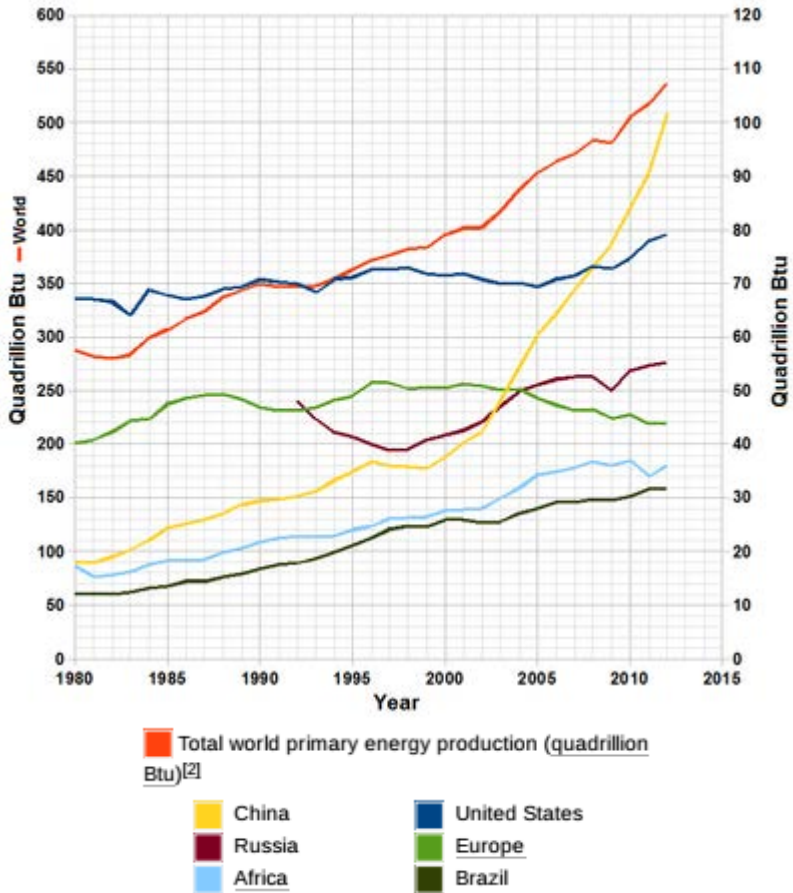
Сонячний PV

Сонячний CSP

Океанічний

**Світове загальне виробництво первинної енергії**

## Джерела енергії та енергоресурси



Загальне світове виробництво первинної енергії (квадрильон БТЕ) [2]

Китай

Росія

Африка

Сполучені Штати

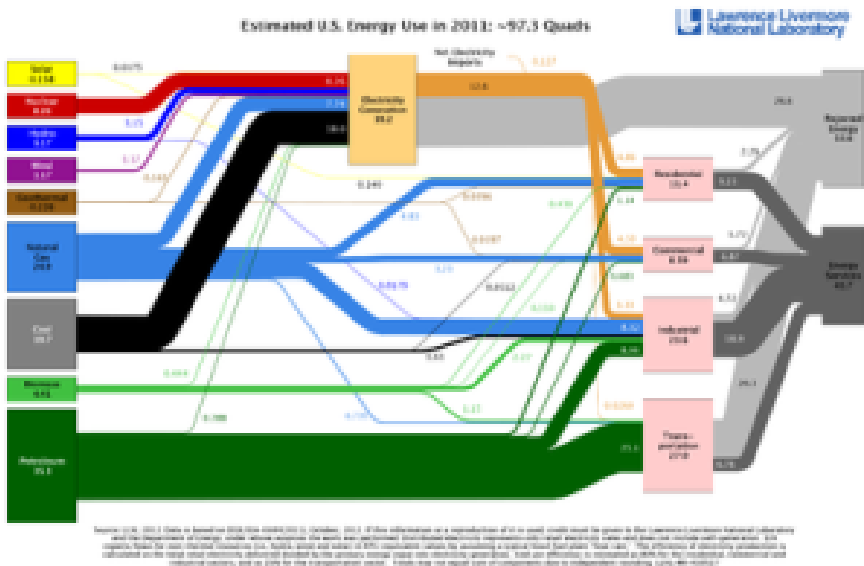
Європа

Бразилія

Зверніть увагу на різну вісь у для загальної (ліворуч) та регіональної кривої (праворуч)

Споживання/витрата енергії США у 2011 році

### Розділ 3



Energy flow charts show the relative size of primary energy resources and end uses in the United States, with fuels compared on a common energy unit basis (2011: 97.3 quads).<sup>[3]</sup>

#### Compounds and Radiant Energy

- |   |  |  |
|---|--|--|
| <span style="color: yellow;">■</span> Solar | <span style="color: purple;">■</span> Wind           | <span style="color: gray;">■</span> Coal           |
| <span style="color: red;">■</span> Nuclear  | <span style="color: brown;">■</span> Geothermal      | <span style="color: green;">■</span> Biomass       |
| <span style="color: blue;">■</span> Hydro   | <span style="color: lightblue;">■</span> Natural gas | <span style="color: darkgreen;">■</span> Petroleum |

#### Producing Electrical Currents/Utilizing Effects Transmitted

- |   |
|---|
| <span style="color: orange;">■</span> Electricity generation                            |
| <span style="color: pink;">■</span> Residential, commercial, industrial, transportation |
| <span style="color: lightgray;">■</span> Rejected energy (waste heat)                   |
| <span style="color: darkgray;">■</span> Energy services                                 |

*Орієнтовне споживання/витрата енергії США у 2011 р. Діаграми потоків енергії показують відносний розмір первинних енергоресурсів та кінцеве споживання в США, з порівнянням палива на основі загальної енергетичної одиниці.*

*Діаграми потоків енергії показують відносний розмір первинних енергоресурсів та кінцеве використання в Сполучених Штатах, з порівнянням палива на основі загальної енергетичної одиниці (2011: 97,3 квадратів). [3]*

*Сполуки та промениста енергія*

*Сонячна*

Ядерний

Гідро

Вітер

Геотермальні

Природний газ

Вугілля

Біомаса

Нафта

Виробництво електричних струмів/використання переданих ефектів

Виробництво електроенергії

Житлові, комерційні, промислові, транспортні

Відхилена енергія (відпрацьоване тепло)

Енергетичні послуги

### Класифікація ресурсів

Енергетичні ресурси можна класифікувати як **первинні ресурси**, придатні для безпосереднього використання без перетворення на іншу форму, і **вторинні ресурси**, де використовувана форма енергії вимагає значного перетворення з первинного джерела. Прикладами первинних енергетичних ресурсів є вітроенергетика, сонячна енергія, деревне паливо, викопне паливо, таке як вугілля, нафта та природний газ, а також уран. Вторинними ресурсами є такі, як електроенергія, водень або інше синтетичне паливо.

Інша важлива класифікація базується на часі, необхідному для відновлення енергетичного ресурсу. "Відновлювані" ресурси — це ті, які відновлюють свої можливості за час, значний для потреб людини. Прикладами є гідроелектростанція або вітроенергетика, коли природні явища, які є основним джерелом енергії, тривають і не вичерпуються людськими потребами. Невідновлювані ресурси — це ресурси, які істотно виснажуються внаслідок використання людиною і які не відновлюють свій потенціал протягом життя людини. Прикладом невідновлюваного джерела енергії є вугілля, яке природним чином не утворюється зі швидкістю, яка б підтримувала людське використання.

### Горючі корисні копалини

Джерела викопного палива (первинні невідновлювані викопні) спалюють вугілля або вуглеводневе паливо, які є залишками розкладання рослин і тварин. Існує три основні види викопного палива: вугілля, нафта та природний газ. Інше викопне паливо, скраплений нафтовий газ (*liquefied petroleum gas* — *LPG*), в основному отримують з виробництва природного газу. Тепло від спалювання викопного палива використовується або безпосередньо для опалення приміщень та технологічного опалення, або перетворюється на механічну енергію для транспортних засобів, промислових процесів або виробництва електроенергії. Ці викопні види палива є частиною вуглецевого циклу і таким чином дозволяють використовувати накопичену сонячну енергію сьогодні.



*Електростанція Moss Landing в Каліфорнії-це електростанція на викопному паливі, яка спалює природний газ у турбіні для виробництва електроенергії*

Використання викопного палива у 18-19 століттях стало основою промислової революції.

Викопне паливо становить основну частину сучасних первинних джерел енергії у світі. У 2005 році 81% світових потреб у енергії було задоволено з викопних джерел. Технології та інфраструктура вже існують для використання викопного палива. Рідке паливо, одержуване з нафти, доставляє значну кількість корисної енергії на одиницю ваги або об'єму, що є вигідним у порівнянні з такими джерелами низької густини енергії, як акумулятор. Викопне паливо наразі є економічним для децентралізованого використання енергії.





*(Горизонтальна) бурова установка для природного газу в Техасі*

Енергетична залежність від імпортованого викопного палива створює ризики енергетичної безпеки для залежних країн. Зокрема, залежність від нафти призвела до війни, фінансування радикалів, монополізації та соціально-політичної нестабільності.

Викопне паливо — це невідновлювані ресурси, які з часом скоротять виробництво та вичерпають його. Хоча процеси, що створюють викопне паливо, тривають, паливо споживається набагато швидше, ніж природні темпи поповнення. Видобуток палива стає все більш дорогим, оскільки суспільство споживає найбільш доступні паливні запаси. Видобуток викопного палива призводить до погіршення стану навколишнього середовища, такого як видобуток смуги та видалення вугілля на вершині гори.

Ефективність використання палива — це форма теплової ефективності, що означає ефективність процесу, що перетворює потенційну хімічну енергію, що міститься в паливі-носії, у кінетичну енергію або роботу. Економія палива — це енергоефективність конкретного транспортного засобу, що подається як відношення пройдені відстані на одиницю витраченого палива. Ефективність, що залежить від ваги (ККД на одиницю ваги), може бути визначена для вантажів, а також специфічність для пасажирів (ККД транспортного засобу на пасажирів). Неефективне атмосферне спалювання викопного палива в транспортних засобах, будівлях та електростанціях сприяє розвитку міських теплових островів.

Звичайний видобуток нафти досяг найбільшого консервативного результату між 2007 та 2010 роками. У 2010 році було підраховано, що для підтримки поточного рівня видобутку протягом 25 років буде потрібно інвестиції у невідновлювані ресурси у розмірі 8 трильйонів доларів США. У 2010 році уряди субсидували викопне паливо приблизно на 500 мільярдів доларів на рік. Викопне паливо також є джерелом викидів парникових газів, що викликає побоювання щодо глобального потепління, якщо споживання не скоротиться.

Спалювання викопного палива призводить до викиду забруднення в атмосферу. Викопне паливо — це переважно сполуки вуглецю. Під час горіння виділяється вуглекислий газ, а також оксиди азоту, сажа та інші дрібні частинки. Двоокис вуглецю є основним фактором, що сприяє останнім змінам клімату. Інші викиди від електростанції на викопному паливі включають діоксид сірки, окис вуглецю (CO), вуглеводні, леткі органічні сполуки, ртуть, миш'як, свинець, кадмій та інші важкі метали, включаючи сліди урану.

Типовий вугільний завод виробляє мільярди кіловат -годин на рік.

## Ядерна енергія

### Поділ ядер

Ядерна енергія — це використання поділу ядер для виробництва корисного тепла та електрики. Поділ урану виробляє майже всю економічно значущу ядерну енергію. Радіоізотопні термоелектричні генератори утворюють дуже малий компонент генерації енергії, переважно в спеціалізованих пристроях, таких як космічні апарати.

Атомні електростанції, за винятком морських реакторів, у 2012 році забезпечували близько 5,7% світової енергії та 13% світової електроенергії.

У 2013 році МАГАТЕ повідомляє, що існує 437 діючих ядерних енергетичних реакторів в 31 країні, хоча не кожен реактор виробляє електроенергію. Крім того, існує приблизно 140 військово-морських суден, які працюють з ядерним двигуном, що працюють від 180 реакторів. Станом на 2013 рік досягнення чистого приросту енергії від реакцій тривалого ядерного синтезу, за винятком природних джерел енергії синтезу, таких як Сонце, залишається постійною областю міжнародних фізичних та інженерних досліджень. Понад 60 років після перших спроб комерційне виробництво електроядерної енергії залишається малоімовірним до 2050 року.



*Американські кораблі з ядерним двигуном, крейсери (зверху вниз) USS Bainbridge, USS Long Beach та USS Enterprise, найдовше морське судно в історії та перший авіаносець на атомних двигунах. Знімок зроблений у 1964 році під час рекордного кругосвітнього плавання у 26540 нм (49190 км) по всьому світу за 65 днів без заправки. Члени екіпажу формулюють формулу еквівалентності мас-енергії Ейнштейна  $E = mc^2$  на льотному борту.*

Тривають дебати щодо використання ядерної енергетики. Прихильники, такі як Всесвітня ядерна асоціація, МАГАТЕ та екологи з ядерної енергії, стверджують, що ядерна енергетика є безпечним, стабільним джерелом енергії, що зменшує викиди вуглецю. Опоненти стверджують, що ядерна енергетика створює багато загроз для людей та навколишнього середовища.

Аварії на атомних електростанціях включають Чорнобильську катастрофу (1986 р.), ядерну катастрофу на Фукусімі Даїчі (2011 р.) та аварію на острові Три милі (1979 р.). Були також деякі аварії на атомних підводних човнах. З точки зору втрат життя на одиницю виробленої енергії, аналіз визначив, що ядерна енергетика спричинила меншу кількість смертей на одиницю виробленої енергії, ніж інші основні джерела виробництва енергії. Виробництво енергії з вугілля, нафти, природного газу та гідроенергетики спричинило більшу кількість летальних випадків на одиницю енергії, вироблену через забруднення повітря та наслідки енергетичних аварій. Однак економічні витрати від аварій на атомній енергетиці є високими, а їх ліквідація може зайняти десятиліття. Також значними є людські витрати на евакуацію постраждалого населення та втрату засобів до існування.

### Розділ 3

Порівняння прихованої смерті від раку ядерної зброї, такої як рак з іншими джерелами енергії, негайної смерті на одиницю виробленої енергії. Це дослідження не включає рак, пов'язаний з вичерпним паливом, та інші непрямі смерті, спричинені вживанням споживання вичерпного палива, у його класифікацію «важкої аварії», яка буде аварією з більш ніж 5 смертельними випадками.



*Російський атомний криголам «НС Ямал» у спільній науковій експедиції з ФНБ у 1994 році*

Станом на 2012 рік, за даними МАГАТЕ, у всьому світі було побудовано 68 реакторів цивільної ядерної енергії в 15 країнах, приблизно 28 з яких у Китайській Народній Республіці (КНР), з останнім ядерним енергетичним реактором станом на Травня 2013 року, який буде під'єднаний до електричної мережі, відбудеться 17 лютого 2013 року на атомній електростанції Хун'янхе в КНР. У Сполучених Штатах два нові реактори покоління III будуються на Фогтлі. Чинovníки ядерної промисловості США очікують, що до 2020 року в експлуатацію вступить п'ять нових реакторів, усі на існуючих заводах. У 2013 році чотири старі, неконкурентоспроможні реактори були назавжди закриті.

Останні експерименти з видобутку урану використовують полімерні канати, покриті речовиною, яка вибірково поглинає уран з морської води. Цей процес може зробити значний обсяг урану, розчиненого в морській воді, придатним для виробництва енергії. Оскільки поточні геологічні процеси доставляють уран до моря в кількостях, порівнянних із кількістю, яка буде видобута цим процесом, у певному сенсі морський уран стає стабільним ресурсом.

Атомна енергетика — це метод виробництва електроенергії з низьким вмістом вуглецю, з аналізом літератури щодо його загальної інтенсивності викидів у життєвому циклі, який виявив, що він подібний до відновлюваних джерел у порівнянні викидів парникових газів (ПГ) на одиницю виробленої енергії. З 1970-х років ядерне паливо витіснило близько 64 гігатонн парникових газів у еквіваленті вуглекислого газу (GtCO<sub>2</sub>-екв.), що в іншому випадку було б результатом спалювання нафти, вугілля чи природного газу на електростанціях з вичерпним паливом.

### Поступове припинення та відкат ядерної енергії

Японська ядерна аварія на Фукусімі -Дайчі 2011 року, яка сталася в конструкції реактора з 1960 -х років, спонукала до переосмислення політики ядерної безпеки та ядерної енергетики у багатьох країнах.



*Атомна катастрофа на Фукусімі Дайчі*

Німеччина вирішила закрити всі свої реактори до 2022 року, а Італія заборонила атомну енергетику. Слідом за Фукусімою, у 2011 році Міжнародне енергетичне агентство вдвічі скоротило свою оцінку додаткової атомної генеруючої потужності, яка буде побудована до 2035 року.

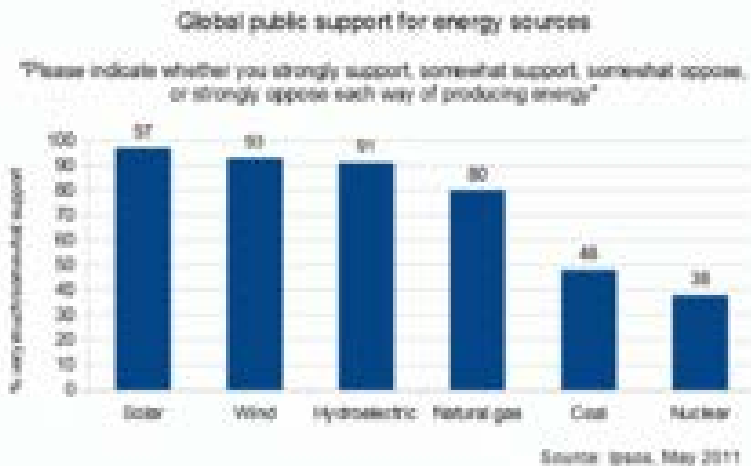
### Фукусіма

Після ядерної катастрофи у Фукусімі Дайчі 2011 року — другої за величиною ядерної катастрофи, яка перемістила 50 000 домогосподарств після витоку радіоактивних матеріалів у повітря, ґрунт і море та з подальшою радіаційною перевіркою, що призвела до заборони деяких поставок овочів та риби — було опубліковано глобальне опитування громадської підтримки, проведене компанією Ipsos (2011) щодо джерел енергії, і поділ ядерної енергії був визнаний найменш популярним

Економіка нових атомних електростанцій є спірною темою, оскільки існують різні точки зору на цю тему, а багатомільярдні інвестиції спрямовані на вибір джерела енергії. Атомні електростанції зазвичай мають високі капітальні витрати на будівництво електростанції, але низькі прямі витрати на паливо. В останні роки спостерігається уповільнення зростання попиту на електроенергію, і фінансування ускладнилося, що впливає на великі проекти, такі як ядерні реактори, з дуже великими авансовими витратами та тривалими циклами проектів, які несуть у собі велику кількість ризиків [62]. У Східній Європі ряд давно створених проектів намагаються знайти фінанси, зокрема Белене в Болгарії та додаткові реактори в Чернаводі в Румунії, і деякі потенційні спонсори відмовились [62]. Там, де доступний

### Розділ 3

дешевий газ, а його майбутні постачання відносно безпечні, це також створює серйозну проблему для ядерних проєктів. [62]



*Низька глобальна громадська підтримка ядерного поділу після Фукусіми (опитування Ipsos, 2011)*

Аналіз економіки ядерної енергетики повинен враховувати, хто несе ризики майбутньої невизначеності. На сьогодні всі діючі атомні електростанції були розроблені державними або регульованими монополіями на комунальні послуги [63] [64], де багато ризиків, пов'язаних з витратами на будівництво, експлуатаційними характеристиками, ціною на паливо та іншими факторами, несли споживачі, а не постачальники. Зараз багато країн лібералізували ринок електроенергії, де ці ризики та ризик виникнення дешевших конкурентів до відшкодування капітальних витрат несуть постачальники та оператори заводів, а не споживачі, що призводить до суттєво різної оцінки економіки нової ядерної енергетики рослин. [65]

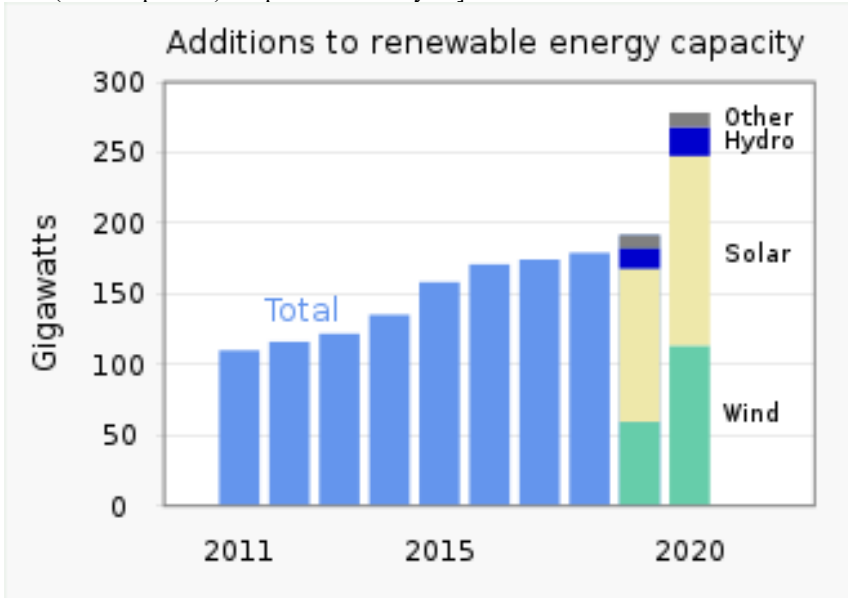
#### **Витрати**

Ймовірно, витрати на поточні та нові атомні електростанції зростуть у зв'язку зі збільшенням вимог до управління відпрацьованим паливом на місці та підвищеними загрозами щодо проектування. У той час як перші подібні проєкти, такі як ЕПР, що будуються, відстають від графіка та надбюджетних, із семи південнокорейських APR-1400, які зараз будуються у всьому світі, два-у Кореї на Ханульській атомній електростанції, а чотири-на найбільший проєкт будівництва атомної станції у світі станом на 2016 рік, в Об'єднаних Арабських Еміратах на запланованій АЕС Бараках. Перший реактор, Барака-1, завершено на 85% і згідно з графіком підключення до мережі протягом 2017 року. Два з чотирьох EPR, що будуються (у Фінляндії та Франції) значно відстають від графіка та значно перевищують вартість.

## Джерела енергії та енергоресурси

### Відновлювані джерела

Відновлювана енергія зазвичай визначається як енергія, що надходить із ресурсів, які природним чином поповнюються у межах періоду людського життя, таких як сонячне світло, вітер, дощ, припливи, хвилі та геотермальне тепло. Відновлювана енергія замінює звичайні види палива у чотирьох окремих областях: виробництво електроенергії, гаряча вода/опалення приміщень, моторне паливо та сільські (поза мережею) енергетичні послуги.]



*Збільшення потужностей відновлюваної енергії у 2020 році збільшилося більш ніж на 45% у порівнянні з 2019 роком, включаючи 90% зростання світової потужності вітру (зелене) та 23% розширення нових сонячних фотоелектричних установок (жовте).*

Близько 16% світового кінцевого споживання енергії в даний час надходить з відновлюваних ресурсів, при цьому 10% усієї енергії з традиційної біомаси, що використовується переважно для опалення, і 3,4% - з гідроелектроенергії. На нові відновлювані джерела енергії (невеликі гідроенергетики, сучасну біомасу, вітрову, сонячну, геотермальну та біопаливо) припадає ще 3% і вони швидко зростають. На національному рівні щонайменше 30 країн світу вже мають відновлювану енергію, що забезпечує понад 20% поставок енергії. Прогнозується, що національні ринки відновлюваної енергетики продовжуватимуть інтенсивно зростати в найближчє десятиліття і далі. Наприклад, вітрова енергія щорічно зростає на 30%, а в кінці 2012 року встановлена потужність у світі - 282 482 мегават (МВт).

Відновлювані джерела енергії існують на широких географічних територіях, на відміну від інших джерел енергії, які зосереджені в обмеженій кількості країн. Швидке впровадження відновлюваної енергії та енергоефективності призводить

до значної енергетичної безпеки, пом'якшення зміни клімату та економічної вигоди. У міжнародних дослідженнях громадської думки існує рішуча підтримка просування поновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія.

Хоча багато проектів з відновлюваних джерел енергії є масштабними, відновлювані технології також підходять для сільських та віддалених районів та країн, що розвиваються, де енергія часто має вирішальне значення для розвитку людства. Генеральний секретар Організації Об'єднаних Націй Пан Гі Мун заявив, що відновлювані джерела енергії здатні підняти найбідніші країни на нові рівні процвітання.

### Гідроелектроенергія

Гідроелектростанція - це електроенергія, вироблена гідроенергетикою; сила падаючої або проточної води. У 2015 році гідроенергетика виробляла 16,6% загальної електроенергії у світі та 70% усієї відновлюваної електроенергії, і очікується, що вона зростатиме приблизно на 3,1% щороку протягом наступних 25 років.



*Гребля Три ущелини потужністю 22 500 МВт у Китаї - найбільша у світі гідроелектростанція*

Гідроенергетика виробляється у 150 країнах, а Азіатсько-Тихоокеанський регіон виробляє 32 відсотки світової гідроенергетики у 2010 році. Китай є найбільшим виробником гідроелектроенергії, з 721 терават-годиною виробництва у 2010 році, що становить близько 17 відсотків споживання електроенергії у країні. Зараз є три гідроелектростанції потужністю більше 10 ГВт: гребля Три ущелини в Китаї, гребля Ітайпу через кордон Бразилії/Парагваю та гребля Гурі у Венесуелі.

Вартість гідроелектроенергії є відносно низькою, що робить її конкурентним джерелом відновлюваної електроенергії. Середня вартість електроенергії з гідроелектростанції потужністю більше 10 мегават становить від 3 до 5 центів США за кіловат-годину. Гідроенергія також є гнучким джерелом електроенергії, оскільки



## Джерела енергії та енергоресурси

заводи можуть дуже швидко підніматися вгору і вниз, щоб адаптуватися до мінливих потреб енергії. Однак запрудження перериває потік річок і може завдати шкоди місцевим екосистемам, а будівництво великих гребель та водосховищ часто передбачає витіснення людей та дикої природи. Після того, як буде побудований гідроелектротехнічний комплекс, проект не виробляє прямих відходів і має значно нижчий рівень викидів парникових газів вуглекислого газу, ніж електростанції, що працюють на викопному паливі.

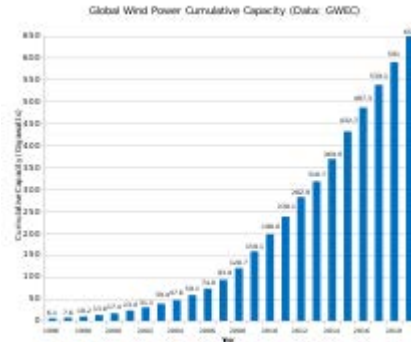
### Вітроенергетика

Вітроенергетика використовує силу вітру для приведення в рух лопатей вітрогенераторів. Ці турбіни викликають обертання магнітів, що створює електрику. Вітрові башти зазвичай будуються разом на вітропарках. Існують морські та берегові вітрові електростанції. Глобальна потужність вітроенергетики швидко зросла до 336 ГВт у червні 2014 року, а виробництво вітрової енергії становило близько 4% загального світового споживання електроенергії та стрімко зростає.



*Морська вітроелектростанція Burbo Bank на північному заході Англії*

## Розділ 3



### *Глобальне зростання потужності вітроенергетики*

Енергія вітру широко використовується в Європі, Азії та США. Кілька країн досягли відносно високого рівня розвитку вітроенергетики, наприклад, 21% стаціонарного виробництва електроенергії в Данії, 18% у Португалії, 16% в Іспанії, 14% в Ірландії і 9% у Німеччині у 2010 р. До 2011 р. часом понад 50% електроенергії у Німеччині та Іспанії надходило від вітру та сонячної енергії. Станом на 2011 рік 83 країни світу використовують комерційну енергію вітру.

Багато найбільших у світі наземних вітрових електростанцій розташовані в США, Китаї та Індії. Більшість найбільших у світі морських вітрових електростанцій розташовані в Данії, Німеччині та Великобританії. Двома найбільшими морськими вітровими електростанціями на даний момент є лондонський масив потужністю 630 МВт та Гвінт -і -Мор.

### Large onshore wind farms

Wind farm	Current capacity (MW)	Country	Notes
<u><a href="#">Alta (Oak Creek-Mojave)</a></u>	1,320	USA	[90]
<u><a href="#">Jaisalmer Wind Park</a></u>	1,064	India	[91]
<u><a href="#">Roscoe Wind Farm</a></u>	781	USA	[92]
<u><a href="#">Horse Hollow Wind Energy Center</a></u>	735	USA	[93][94]
<u><a href="#">Capricorn Ridge Wind Farm</a></u>	662	USA	[93][94]
<u><a href="#">Fântânele-Cogealac Wind Farm</a></u>	600	Romania	[95]
<u><a href="#">Fowler Ridge Wind Farm</a></u>	599	USA	[96]

### *Великі наземні вітрові електростанції*

### Сонячна енергія

Сонячна енергія, променисте світло та тепло від Сонця використовуються за допомогою ряду постійно розвиваються технологій, таких як сонячне опалення, сонячна фотоелектрика, сонячна теплова електроенергія, сонячна архітектура та штучний фотосинтез.



*Частина сонячного комплексу SEGS потужністю 354 МВт на півночі округу Сан -Бернардіно, Каліфорнія*



*Сонячна електростанція Andasol потужністю 150 МВт - це концентрована сонячна електростанція, розташована в Іспанії.*

Сонячні технології загалом характеризуються як пасивні сонячні або активні сонячні залежно від способу їх захоплення, перетворення та розподілу сонячної енергії. Активні сонячні методи включають використання фотоелектричних панелей та сонячних теплових колекторів для використання енергії. Пасивні сонячні технології включають орієнтацію будівлі на Сонце, вибір матеріалів зі сприятливою тепловою масою або світлорозсіювальними властивостями та проектування приміщень, які природним чином циркулюють повітря.

У 2011 році Міжнародне енергетичне агентство заявило, що "розвиток доступних, невичерпних та чистих сонячних енергетичних технологій матиме величезні довгострокові переваги.



*Сонячна ферма Топаз - одна з найбільших у світі сонячних електростанцій*

Це підвищить енергетичну безпеку країн, спираючись на корінні, невичерпні та переважно незалежні від імпорту ресурси, підвищити стійкість, зменшити забруднення, знизити витрати на пом'якшення зміни клімату та утримувати ціни на вичерпане паливо нижче, ніж інакше. Ці переваги є глобальними. Отже, додаткові витрати на стимули до раннього розгортання слід розглядати як навчання інвестиціям; їх потрібно розумно витратити та мають бути широко поширені". Більше 100 країн використовують сонячні фотоелектричні установки.

**Фотоелектрична енергія** (*Photovoltaics — PV*) — це метод генерування електричної енергії шляхом перетворення сонячного випромінювання в електрику постійного струму за допомогою напівпровідників, які виявляють фотоелектричний ефект. Для виробництва електроенергії використовуються сонячні панелі, що складаються з ряду сонячних батарей, що містять фотоелектричний матеріал. Матеріали, які в даний час використовуються для фотоелектрики, включають монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, аморфний кремній, телурид кадмію та селенід/сульфід міді -індію. Через зростання попиту на відновлювані джерела енергії виробництво сонячних батарей та фотоелектричних батарей за останні роки значно просунулося вперед.

Сонячна фотоелектрика є стабільним джерелом енергії. До кінця 2018 року в цілому по всьому світу було встановлено 505 ГВт, а в цьому році встановлено 100 ГВт.

Завдяки досягненням технологій та збільшенню масштабів виробництва та вдосконалення, вартість фотоелектричних батарей неухильно знижувалась з моменту виготовлення перших сонячних батарей, а зрівняльна вартість електроенергії з фотоелектричної енергії є конкурентоспроможною у порівнянні зі звичайними джерелами електроенергії розширення списку географічних регіонів. Чисті обліки та фінансові стимули, такі як пільгові тарифні ставки на електроенергію, вироблену на сонячній енергії, підтримують сонячні фотоелектричні установки у багатьох країнах. Час окупності енергії, також відомий як амортизація енергії, залежить від річної сонячної інсоляції та температурного профілю місцевості, а також від використовуваного типу PV-технології. Для звичайних кристалічних

фотоелектричних кремніїв тривалість окупності вище, ніж для тонкоплівкових технологій, таких як CdTe-PV або CPV-системи. Більше того, час окупності скоротився в останні роки через низку покращень, таких як ефективність використання сонячних батарей та більш економічні виробничі процеси. Станом на 2014 рік фотоелектричні батареї відновлюють в середньому енергію, необхідну для їх виробництва, за 0,7–2 роки. Це призводить до того, що близько 95% чистої енергії, виробленої сонячною фотоелектричною системою на даху протягом 30-річного терміну служби. Фотоелектричні установки можуть бути наземними (а іноді інтегрованими з сільським господарством та випасом) або вбудованими дах або стіни будівлі.

### Біопаливо

Біопаливо — це паливо, яке містить енергію від геологічно недавньої фіксації вуглецю. Ці види палива виробляються з живих організмів. Приклади цієї фіксації вуглецю трапляються у рослин та мікроводоростей



*Автобус, що працює на біодизелі*

Ці види палива виробляються шляхом перетворення біомаси (біомаса відноситься до недавно живих організмів, найчастіше це стосується рослин або матеріалів, отриманих з рослин). Ця біомаса може бути перетворена на зручні для енергії речовини, що містяться в трьох різних способах: термічна конверсія, хімічна конверсія та біохімічна конверсія. Це перетворення біомаси може призвести до палива у твердому, рідкому або газоподібному вигляді. Ця нова біомаса може бути використана для виробництва біопалива. Популярність біопалива зросла через зростання цін на нафту та необхідність енергетичної безпеки.

**Біоетанол** - це спирт, отриманий шляхом ферментації, переважно з вуглеводів, вироблених у культурах цукру або крохмалю, таких як кукурудза або цукровий очерет. Целюлозна біомаса, отримана з непродовольчих джерел, таких як дерева та трави, також розробляється як сировина для виробництва етанолу. Етанол може використовуватися як паливо для автомобілів у чистому вигляді, але зазвичай він використовується як добавка до бензину для збільшення октанового газу та покращення викидів автомобіля. Біоетанол широко використовується в США та

Бразилії. Поточний проект заводу не передбачає перетворення лігнінової частини рослинної сировини на компоненти палива шляхом бродіння.

**Біодизель** виробляють з рослинних олій та тваринних жирів. Біодизель може використовуватися як паливо для автомобілів у чистому вигляді, але зазвичай він використовується як добавка до дизельного палива для зменшення вмісту твердих частинок, окису вуглецю та вуглеводнів з автомобілів на дизельних двигунах. Біодизель виробляється з олій або жирів за допомогою переетерифікації і є найпоширенішим біопаливом у Європі. Однак тривають дослідження щодо виробництва відновлюваного палива з декарбокислювання.

У 2010 році у всьому світі виробництво біопалива досягло 105 мільярдів літрів (28 мільярдів галонів США), що на 17% більше, ніж у 2009 році, а біопаливо забезпечило 2,7% світового палива для автомобільного транспорту, більшу частину якого складали етанол та біодизель. Глобальне виробництво етанолового палива в 2010 році досягло 86 млрд. літрів (23 млрд. галонів США), при цьому Сполучені Штати та Бразилія стали провідними світовими виробниками, що разом становить 90% світового виробництва. Найбільшим у світі виробником біодизелю є Європейський Союз, на якого в 2010 році припадає 53% всього виробництва біодизельного палива. Станом на 2011 рік мандати на змішування біопалива існують у 31 країні на національному рівні та у 29 штатах чи провінціях. Міжнародне енергетичне агентство має на меті, щоб біопаливо задовольняло понад чверть світового попиту на транспортування палива до 2050 року, щоб зменшити залежність від нафти та вугілля.

### Геотермальна енергія

Геотермальна енергія — це теплова енергія, що генерується і зберігається на Землі. Теплова енергія - це енергія, яка визначає температуру речовини. Геотермальна енергія земної кори походить від початкового утворення планети (20%) та від радіоактивного розпаду мінералів (80%). Геотермічний градієнт, що є різницею температур між ядром планети та її поверхнею, забезпечує безперервний провід теплової енергії у вигляді тепла від ядра до поверхні. Прикметник геотермальний походить від грецьких коренів  $\gamma\eta$  (*ge*), що означає земля, і  $\theta\epsilon\rho\mu\omicron\varsigma$  (*thermos*), що означає гарячий.

Внутрішнє тепло Землі - це теплова енергія, що утворюється внаслідок радіоактивного розпаду та постійних втрат тепла від утворення Землі. Температура на кордоні ядро-мантія може досягати понад 4000 °C (7200 °F). [109] Висока температура і тиск у глибині Землі викликають розплавлення деяких порід і тверду мантію, що поводить себе пластично, в результаті чого частини мантії виступають вгору, оскільки вона легша за навколишню породу. Породи і вода нагріваються в корі, іноді до 370 °C (700 °F). [110]

З гарячих джерел геотермальна енергія використовувалася для купання з часів палеоліту та для опалення приміщень з часів Стародавньої Римської імперії, але зараз вона більш відома як виробництво електроенергії. У 2012 році 11400 мегават (МВт) геотермальної електроенергії в Інтернеті перебувають у мережі в 24 країнах світу [111]. Додаткові 28 гігават прямої геотермальної теплової потужності встановлені для централізованого теплопостачання, опалення приміщень, курортів,

промислових процесів, опріснення та сільськогосподарського застосування в 2010 році.



*Пара, що піднімається від геотермальної електростанції Нєсявеллір в Ісландії*

Геотермальна енергетика є економічно ефективною, надійною, сталою та екологічно чистою, але історично обмежувалася територіями поблизу меж тектонічних плит. Останні технологічні досягнення різко розширили діапазон та розміри життєздатних ресурсів, особливо для таких застосувань, як опалення будинків, відкривши потенціал для широкої експлуатації. Геотермальні свердловини викидають парникові гази, що затримуються глибоко в землі, але ці викиди значно менші за одиницю енергії, ніж викиди викопного палива. В результаті геотермальна енергетика має потенціал допомогти пом'якшити глобальне потепління, якщо її широко використовувати замість викопного палива.

Геотермальні ресурси Землі теоретично більш ніж достатні для забезпечення енергетичних потреб людства, але лише дуже невелика частка може бути вигідно використана. Буріння та розвідка глибоких ресурсів дуже дорогі. Прогнози на майбутнє геотермальної енергії залежать від припущень щодо технологій, цін на енергію, субсидій та процентних ставок. Пілотні програми, такі як замовник EWEB, вибирають програму Green Power [114], показують, що клієнти готові платити трохи більше за поновлюване джерело енергії, таке як геотермальна. Але в результаті державних досліджень та досвіду промисловості витрати на виробництво геотермальної енергії зменшилися на 25% за останні два десятиліття [115]. У 2001 році вартість геотермальної енергії становила від двох до десяти центів США за кВт-год. [116]

### Морська енергетика

Морська енергія або енергія океану відноситься до енергії, яку переносять океанські хвилі, припливи, солоність та різниці температур океану. Рух води у світовому океані створює величезний запас кінетичної енергії або енергії в русі. Цю енергію можна використати для виробництва електроенергії для живлення будинків, транспорту та промисловості.

Термін морська енергія охоплює як потужність хвилі, тобто потужність поверхневих хвиль, так і силу припливу, тобто отриману з кінетичної енергії великих мас рухомої води. Енергія морського вітру не є формою морської енергії, оскільки енергія вітру походить від вітру, навіть якщо вітрогенератори розміщені над водою. Світовий океан має величезну кількість енергії і близький найбільш концентрований населення. Енергія океану має потенціал забезпечити значну кількість нової відновлюваної енергії у всьому світі.

### **100% відновлювана енергія**

Стимул використовувати 100% відновлювану енергію для електроенергії, транспорту або навіть загального постачання первинної енергії у всьому світі був викликаний глобальним потеплінням та іншими екологічними, а також економічними проблемами. Використання відновлюваної енергії зросло набагато швидше, ніж хтось очікував. [117] Міжурядова комісія з питань зміни клімату заявила, що існує декілька фундаментальних технологічних обмежень для інтеграції портфеля технологій відновлюваної енергії для задоволення більшості загального світового попиту на енергію. [118] На національному рівні щонайменше 30 країн світу вже мають відновлювану енергію, що забезпечує понад 20% поставок енергії. Також професори С. Пакала і Роберт Х. Соколов розробили серію "стабілізаційних клінів", які можуть дозволити нам підтримувати якість життя, уникаючи катастрофічних змін клімату, і "поновлювані джерела енергії" в сукупності становлять найбільшу кількість їх "клінів" [119].

Марк З. Якобсон каже, що виробництво всієї нової енергії з використанням вітрової, сонячної та гідроенергетичної енергії до 2030 року є можливим, а існуючі механізми постачання енергії можуть бути замінені до 2050 року. Перешкоди на шляху реалізації плану поновлюваних джерел енергії вважаються "насамперед соціальними та політичними, не технологічний чи економічний". Якобсон каже, що витрати на енергію за допомогою вітрової, сонячної, водної системи повинні бути подібними до сьогоднішніх енергетичних витрат. [120]

Так само у Сполучених Штатах незалежна Національна дослідницька рада зазначила, що "існує достатньо внутрішніх відновлюваних ресурсів, щоб відновлювана електроенергія відіграла значну роль у майбутньому виробництві електроенергії і, таким чином, допомагала вирішувати питання, пов'язані зі зміною клімату, енергетичною безпекою та ескалацією" витрат на енергію ... Відновлювані джерела енергії є привабливим варіантом, оскільки відновлювані ресурси, наявні у Сполучених Штатах, взяті разом, можуть забезпечити значно більшу кількість електроенергії, ніж загальний поточний чи прогнозований внутрішній попит ». [121]

Серед критиків підходу "100% відновлюваної енергії" Вацлав Сміл та Джеймс Е. Хансен. Сміл і Хансен стурбовані змінною потужністю виробництва сонячної та вітрової електроенергії, але Еморі Ловінс стверджує, що електромережа може впоратися так само, як вона регулярно підтримує непрацюючі вугільні та атомні електростанції робочими [122].



## Джерела енергії та енергоресурси

Google витратив 30 мільйонів доларів на проект "Відновлювана енергія дешевше вугілля" на розвиток відновлюваної енергії та запобігання катастрофічним змінам клімату. Проект був скасований після висновку, що найкращий сценарій швидкого прогресу у відновлюваних джерелах енергії може призвести лише до викидів на 55 % нижче прогнозів викопного палива на 2050 рік.

### Підвищена енергоефективність



*Інтегрована компактна люмінесцентна лампа спірального типу, яка була популярна серед споживачів Північної Америки з моменту її впровадження в середині 1990-х років [124]*

Основна стаття: Ефективне використання енергії

Хоча підвищення ефективності використання енергії не є саморозвитком енергії, це можна розглядати як тему розвитку енергії, оскільки воно робить наявні джерела енергії доступними для роботи [125]: 22

Ефективне використання енергії зменшує кількість енергії, необхідної для надання продуктів та послуг. Наприклад, утеплення будинку дозволяє будівлі споживати менше енергії опалення та охолодження для підтримки комфортної температури. Встановлення люмінесцентних ламп або природних мансардних вікон зменшує кількість енергії, необхідної для освітлення, порівняно з лампочками розжарювання. Компактні люмінесцентні лампи споживають на дві третини менше енергії і можуть працювати в 6-10 разів довше, ніж лампи розжарювання. Покращення енергоефективності найчастіше досягається шляхом прийняття ефективної технології або виробничого процесу [126].

Зменшення споживання енергії може заощадити гроші споживачів, якщо економія енергії компенсує вартість енергоефективної технології. Зменшення споживання енергії зменшує викиди. За даними Міжнародного енергетичного агентства, поліпшення енергоефективності в будівлях, промислових процесах та транспорті

## Розділ 3

може зменшити світові потреби в енергії до 2050 року на третину та допомогти контролювати глобальні викиди парникових газів [127].

Енергоефективність та відновлювані джерела енергії є двома стовпами політики сталої енергетики. [128] У багатьох країнах також вважається, що енергоефективність має переваги для національної безпеки, оскільки вона може бути використана для зменшення рівня імпорту енергії з іноземних країн та може уповільнити темпи виснаження внутрішніх енергоресурсів.

Було виявлено, "що для країн ОЕСР вітрові, геотермальні, гідротехнічні та ядерні підприємства мають найнижчі показники небезпеки серед джерел енергії у виробництві".

### Спосіб передавання



#### *Піднесена ділянка трубопроводу Аляски*

Хоча нові джерела енергії рідко відкриваються або стають можливими завдяки новій технології, технологія розподілу постійно розвивається. [130] Наприклад, використання паливних елементів в автомобілях є передбачуваною технологією доставки. [131] У цьому розділі представлені різні технології доставки, які мали значення для історичного розвитку енергетики. Усі вони певним чином покладаються на джерела енергії, перелічені в попередньому розділі.

#### **Доставка та трубопроводи**

Вугілля, нафту та їх похідні доставляються човном, залізницею або автомобільним транспортом. Нафта та природний газ також можуть доставлятися по трубопроводу, а вугілля - по шламопроводу. Паливо, таке як бензин та скраплений газ, також можна доставляти через літаки. Для правильної роботи трубопроводи

природного газу повинні підтримувати певний мінімальний тиск. Вищі витрати на транспортування та зберігання етанолу часто є непомірними. [132]

### Дротова передача енергії



*Електрична мережа - опори та кабелі розподіляють електроенергію*

Основна стаття: Електрична мережа

Електричні мережі - це мережі, які використовуються для передачі та розподілу електроенергії від джерела виробництва до кінцевого споживача, коли вони можуть знаходитися на відстані сотень кілометрів. Джерела включають електрогенераційні установки, такі як ядерний реактор, вугільна електростанція тощо. Для підтримки постійного потоку електроенергії використовується комбінація підстанцій та ліній електропередачі. Мережі можуть постраждати від тимчасових відключень електроенергії та відмов, часто через пошкодження погоди. Під час деяких екстремальних погодних явищ у космосі сонячний вітер може перешкоджати передачі. Сітки також мають заздалегідь визначену вантажопідйомність або навантаження, які неможливо безпечно перевищити. Коли вимоги до потужності перевищують наявні, збої неминучі. Для запобігання проблемам потужність потім нормується.

Індустріально розвинені країни, такі як Канада, США та Австралія, є одними з найбільших споживачів електроенергії на душу населення у світі, що можливо завдяки широко розповсюдженій мережі розподілу електроенергії. Мережа США є однією з найсучасніших, хоча обслуговування інфраструктури стає проблемою. CurrentEnergy надає в режимі реального часу огляд пропозиції та попиту на електроенергію в Каліфорнії, Техасі та на північному сході США. Африканські країни з

## Розділ 3

невеликими електричними мережами мають відповідно низьке річне споживання електроенергії на душу населення. Одна з найпотужніших електромереж у світі постачає електроенергію до штату Квінсленд, Австралія.

### Бездротова передача енергії

Бездротова передача енергії-це процес, за допомогою якого електрична енергія передається від джерела живлення до електричного навантаження, яке не має вбудованого джерела живлення, без використання з'єднувальних проводів. Наявна в даний час технологія обмежена невеликими відстанями та відносно низьким рівнем потужності.

Для обертання колекторів сонячної енергії потрібна бездротова передача енергії на Землю. Запропонований спосіб передбачає створення великого пучка радіохвиль мікрохвильової частоти, який би був спрямований на колекторну антену на Землі. Для забезпечення безпеки та прибутковості такої схеми існують серйозні технічні проблеми.

### Зберігання



*Електростанція Ffestiniog в Уельсі, Великобританія. Накопичувальна гідроелектроенергія (PSH) використовується для накопичення енергії мережі.*

Збереження енергії здійснюється за допомогою пристроїв або фізичних носіїв, які зберігають енергію для виконання корисних операцій пізніше. Пристрій, що зберігає енергію, іноді називають акумулятором.

Усі форми енергії - це потенційна енергія (наприклад, хімічна, гравітаційна, електрична, перепад температур, прихована теплота тощо) або кінетична енергія (наприклад, імпульс). Деякі технології забезпечують лише короткочасне накопичення енергії, а інші можуть бути дуже довгостроковими, наприклад, використання газу з використанням водню або метану та накопичення тепла чи холоду між протилежними сезонами у глибоких водоносних горизонтах або підстилах. Годинники з намотуванням зберігають потенційну енергію (в даному випадку механічну, під час натягу пружини), акумулятор зберігає легко конвертовану хімічну енергію для роботи мобільного телефону, а гідроелектрична гребля зберігає енергію у резервуарі як гравітаційну потенціальну енергію. Резервуари для зберігання льоду зберігають лід (теплову енергію у формі прихованого тепла) вночі для задоволення пікових потреб у охолодженні. Викопне паливо, таке як вугілля та бензин, зберігає

## Джерела енергії та енергоресурси

давню енергію, отриману від сонячного світла організмами, які згодом загинули, поховались і з часом потім перетворювалися на ці види палива. Навіть їжа (яка виробляється за тим же процесом, що і викопне паливо) - це форма енергії, що зберігається у хімічній формі.

### Історія



*Енергетичні генератори минулого та сьогодення в Доелі, Бельгія: вітряк млин XVII століття Шелдемолен та атомна електростанція Доел XX століття*

Починаючи з доісторичних часів, коли людство відкрило вогонь для розігріву та смаження страв, до Середньовіччя, в якому населення будувало вітряні млини для подрібнення пшениці, до нашої ери, коли нації можуть отримати електрику, розщеплюючи атом. Людина нескінченно шукала джерела енергії.

За винятком ядерної, геотермальної та припливної, всі інші джерела енергії - від поточної сонячної ізоляції або від викопних залишків рослин і тварин, які спиралися на сонячне світло. Зрештою, сама енергія Сонця є результатом ядерного синтезу Сонця. Геотермальна енергія з гарячої, затверділої породи над магмою ядра Землі є результатом розпаду радіоактивних матеріалів, присутніх під земною корою, а ядерне поділ спирається на техногенне поділ важких радіоактивних елементів у земній корі; в обох випадках ці елементи були створені при вибухах над-нових до утворення Сонячної системи.

З початку промислової революції питання майбутнього поставок енергії викликає інтерес. У 1865 році Вільям Стенлі Джевонс опублікував «Вугільне питання», в якому він побачив, що запаси вугілля виснажуються і що нафта є неефективною заміною. У 1914 р. Бюро шахт США заявило, що загальний видобуток склав 5,7 млрд барелів (910 000 000 м3). У 1956 році геофізик М. Кінг Хабберт

приходить до висновку, що видобуток нафти в США досягне свого піку між 1965 і 1970 роками, і що на основі даних 1956 року видобуток нафти досягне свого піку "протягом півстоліття". У 1989 р., За прогнозом Коліна Кемпбелла [133] У 2004 р., За оцінками ОПЕК, за значних інвестицій до 2025 р. Видобуток нафти зросте майже вдвічі [134]

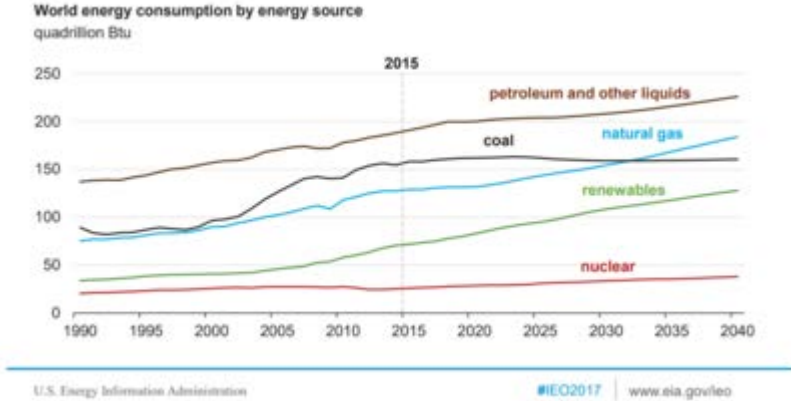
#### Стійкість

Екологічний рух підкреслив сталість використання та розвитку енергії [135]. Відновлювана енергія є стійкою у її виробництві; доступний запас не зменшиться в оглядовому майбутньому - мільйонах чи мільярдах років. "Стійкість" також відноситься до здатності навколишнього середовища справлятися з відходами, особливо із забрудненням повітря. Джерела, які не мають прямих відходів (такі як вітер, сонячна енергія та гідроенергетика), розглядаються тут. Зі зростанням світового попиту на енергію зростає потреба у використанні різних джерел енергії. Збереження енергії є альтернативним або доповнюючим процесом розвитку енергії. Це зменшує попит на енергію за рахунок ефективного її використання.

Деякі спостерігачі стверджують, що ідея "енергетичної незалежності" є нереальною та непрозорою концепцією [136]. Альтернативна пропозиція "енергостійкості" - це мета, узгоджена з економічними, безпековими та енергетичними реаліями. Поняття стійкості в енергетиці було детально описано в книзі 1982 року Brittle Power: Energy Strategy for National Security [137]. Автори стверджували, що просто перехід на внутрішню енергетику не буде безпечним за своєю суттю, оскільки справжньою слабкістю є часто взаємозалежна та вразлива енергетична інфраструктура країни. Ключові аспекти, такі як газопроводи та електрична мережа, часто є централізованими і легко піддаються збоям. Вони дійшли висновку, що "стійке енергопостачання" необхідне як для національної безпеки, так і для навколишнього середовища. Вони рекомендують зосередитись на децентралізації енергоефективності та відновлюваної енергії [138].

У 2008 році колишній голова та генеральний директор корпорації Intel Ендрю Гроув приділив увагу енергостійкості, стверджуючи, що повна незалежність неможлива з огляду на світовий ринок енергоносіїв. [139] Він описує енергостійкість як здатність пристосовуватися до перебоїв у постачанні енергії. З цією метою він пропонує США більше використовувати електроенергію [140]. Електроенергію можна виробляти з різних джерел. Різноманітне постачання енергії буде менше впливати на порушення постачання будь-якого одного джерела. Він вважає, що ще однією особливістю електрифікації є те, що електроенергія є "липкою" - тобто електроенергія, вироблена в США, повинна залишатися там, оскільки її не можна транспортувати за кордон. За словами Гроува, ключовим аспектом просування електрифікації та енергостійкості буде перетворення автомобільного парку США з бензинового на електричний. Це, в свою чергу, вимагатиме модернізації та розширення електромереж. Як зазначали такі організації, як Інститут реформ, досягнення, пов'язані з розробкою інтелектуальної мережі, сприятимуть здатності сітки масово поглинати транспортні засоби, що підключаються до неї, щоб заряджати свої батареї [141].

### Справжнє і майбутнє



Перспективи - Світове споживання енергії паливом (станом на 2011 рік) [142]



Рідке паливо в т.ч. Біопаливо Вугілля Природний газ  
Відновлювані види палива Ядерне паливо

Збільшення частки споживання енергії країнами, що розвиваються [143]

Індустріально розвинені країни  
Нації, що розвиваються  
ЄЕ/Колишній Радянський Союз

Екстраполяції з поточних знань на майбутнє пропонують вибір енергетичного майбутнього. [144] Передбачення паралельні гіпотезі Мальтузіанської катастрофи. Численні сценарії, засновані на складних моделях, започатковані компанією «Межі зростання». Підходи до моделювання пропонують способи аналізу різноманітних стратегій та, сподіваємось, знайти шлях до швидкого та сталого розвитку людства. Короткострокові енергетичні кризи також є проблемою розвитку енергетики. Екстраполяції не мають правдоподібності, особливо коли вони передбачають постійне зростання споживання нафти. [Необхідна цитата]

Виробництво енергії зазвичай вимагає енергетичних інвестицій. Буріння нафти або будівництво вітрової електростанції вимагає енергії. Залишки ресурсів вичерпного палива часто стає все важче видобувати та конвертувати. Таким чином, вони можуть потребувати дедалі більших інвестицій у енергію. Якщо інвестиції перевищують вартість енергії, виробленої ресурсом, це більше не є ефективним джерелом енергії. Ці ресурси більше не є джерелом енергії, але їх можна використовувати як цінність як сировину. Нова технологія може знизити енергетичні інвестиції, необхідні для видобування та конвертації ресурсів, хоча і в кінцевому підсумку Останнім часом основна фізика встановлює межі, які не можна перевищувати.

Між 1950 і 1984 роками, коли Зелена революція змінила сільське господарство по всьому світу, світове виробництво зерна зросло на 250%. Енергію для Зеленої революції забезпечувало викопне паливо у вигляді добрив (природний газ), пестицидів (нафта) та зрошення на основі вуглеводнів [145]. Пік світового видобутку вуглеводнів (пік нафти) може призвести до значних змін і вимагати стабільних методів видобутку [146]. Одне бачення сталого енергетичного майбутнього передбачає, що всі людські структури на земній поверхні (тобто будівлі, транспортні засоби та дороги) здійснюють штучний фотосинтез (використовуючи сонячне світло для розщеплення води як джерела водню та поглинаючи вуглекислий газ для отримання добрив) ефективніше, ніж рослини. [147]

З огляду на економічну діяльність сучасної космічної галузі [148] [149] та пов'язані з нею приватні космічні польоти з обробними галузями, які виходять на орбіту Землі або за її межі, доставка їх у ці регіони потребуватиме подальшого розвитку енергії [150] [151] Дослідники передбачали використання космічної сонячної енергії для збору сонячної енергії для використання на Землі. Космічна сонячна енергія досліджується з початку 1970-х років. Космічна сонячна енергія вимагатиме побудови колекторних конструкцій у космосі. Перевагою перед наземною сонячною енергією є більша інтенсивність світла і відсутність погоди, яка б переривала збір електроенергії.



## ВИКОПНЕ ПАЛИВО

### ВИКОПНЕ ПАЛИВО

Викопне паливо (*fossil fuel*) — це паливо, утворене природними процесами, такими як анаеробне розкладання похованих мертвих організмів, що містить органічні молекули, що походять від стародавнього фотосинтезу [1], які виділяють енергію при згорянні. Такі організми та утворене ними викопне паливо зазвичай мають вік мільйонів років, а іноді і більше 650 мільйонів років.

Викопне паливо містить високий відсоток вуглецю і включає нафту, вугілля та природний газ. Загальноживані похідні викопного палива включають гас і пропан. Викопне паливо варіюється від легких матеріалів з низьким співвідношенням вуглецю до водню (наприклад, метану), до рідин (наприклад, нафти), до нелетких матеріалів, що складаються з майже чистого вуглецю, наприклад, вугілля антрациту. Метан можна знайти лише на родовищах вуглеводнів, пов'язаних з нафтою, або у формі клатратів метану. Хоча торф має багато властивостей для викопного палива, включаючи його розкладену органічну структуру та виділення парникових газів після використання, дискутується, чи можна вважати його справжнім викопним паливом.

Станом на 2018 рік до основних первинних джерел енергії у світі належали нафта (34%), вугілля (27%) та природний газ (24%), що становить 85% частки викопного палива у споживанні первинної енергії у світі. Не викопні джерела включали ядерну (4,4%), гідроелектростанцію (6,8%) та інші відновлювані джерела (4,0%, включаючи геотермальні, сонячні, припливні, вітрові, деревні та відходи). Частка відновлюваних джерел (включаючи традиційну біомасу) у загальному світовому кінцевому споживанні енергії становила 18% у 2018 році.

Більшість смертей від забруднення атмосферного повітря спричинені продуктами згоряння викопного палива: за оцінками, це забруднення коштує понад 3% світового ВВП, і що відмова від викопного палива врятувала б 3,6 мільйона життів щороку.

Використання викопного палива завдає серйозної шкоди довкіллю. При спалюванні викопного палива виробляється близько 35 мільярдів тонн (35 гігатонн) вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) на рік. Природні процеси на Землі можуть поглинути лише невелику частину цієї кількості, тому спостерігається чисте збільшення на багато мільярдів тонн атмосферного вуглекислого газу на рік. CO<sub>2</sub> — це парниковий газ, який збільшує радіаційну силу та сприяє глобальному потеплінню та підкисленню океану. Триває глобальний рух у напрямку виробництва низьковуглецевої сталої енергії, щоб допомогти зменшити глобальні викиди парникових газів.

### Походження викопного палива

Теорія про те, що викопне паливо утворилося із скам'янілих залишків мертвих рослин під впливом тепла і тиску в земній корі протягом мільйонів років, була вперше висунута Андреасом Лібавієм "в його Алхімії 1597 року [Алхімія]", а пізніше Михайлом Ломоносовим "ще 1757 і, безумовно, до 1763". Вперше термін "викопне

паливо" зустрічається в працях німецького хіміка Каспара Ноймана, в англійському перекладі 1759 р. Оксфордський словник англійської мови зазначає, що у фразі "викопне паливо" прикметник "викопне" означає ", отриманий при копанні; знайдений закопаний у землі", який датується принаймні 1652 р. перед англійським іменником "викопне" "почали відноситися насамперед до давно мертвих організмів на початку 18 століття.

Водні фітопланктон і зоопланктон, які загинули і осадилися у великих кількостях в умовах без кислоти мільйони років тому, почали утворювати нафту та природний газ в результаті анаеробного розкладання. З геологічним часом ця органічна речовина, змішана з брудом, поховалася під подальшими важкими шарами неорганічного осаду. В результаті висока температура і тиск викликали хімічну зміну органічної речовини спочатку у воскоподібний матеріал, відомий як кероген, який міститься в горючих сланцях, а потім з більшою кількістю тепла перетворюється на рідкі та газоподібні вуглеводні в процесі, відомому як катагенез. Незважаючи на ці теплові перетворення (які збільшують густину енергії порівняно з типовою органічною речовиною за рахунок видалення атомів кисню), енергія, що виділяється при згорянні, все ще має фотосинтетичне походження.

Наземні рослини схильні утворювати вугілля та метан. Багато вугільних родовищ відносяться до карбонового періоду історії Землі. Наземні рослини також утворюють кероген III типу, джерело природного газу. Хоча викопне паливо постійно формується природними процесами, вони класифікуються як невідновлювані ресурси, тому що їм потрібні мільйони років, а відомі життєздатні запаси виснажуються набагато швидше, ніж генеруються нові.

У будь-якому паливі існує широкий спектр органічних сполук. Конкретна суміш вуглеводнів надає паливу його характерні властивості, такі як густину, в'язкість, температура кипіння, температура плавлення тощо. Деякі види палива, наприклад природний газ, містять лише газоподібні компоненти з дуже низьким кипінням. Інші, такі як бензин або дизельне паливо, містять компоненти з більш високою температурою кипіння.

### Вугілля

**Вугілля** — це горюча чорна або коричнево-чорна осадова порода, утворена у вигляді пластів гірських порід, які називаються вугільними пластами. Вугілля — це переважно вуглець з різною кількістю інших елементів, головним чином водню, сірки, кисню та азоту. Вугілля утворюється, коли мертва рослина речовина розпадається на торф і перетворюється у вугілля під впливом тепла та тиску глибокого поховання протягом мільйонів років. Великі родовища вугілля походять із колишніх водно-болотних угідь, так званих вугільних лісів, які охоплювали більшу частину тропічних земель Землі протягом часів пізнього карбону (Пенсильванія) та пермського періоду. Однак багато значних родовищ вугілля молодші за це і походять з мезозойської та кайнозойської епох.

Вугілля в основному використовується як паливо. Хоча вугілля відоме і використовується тисячі років, його використання було обмежене аж до промислової революції. З винаходом парової машини споживання вугілля зросло. Станом на 2016 рік вугілля залишається важливим паливом, оскільки воно постачало

приблизно чверть світової первинної енергії та дві п'яті електроенергії. Деякі виробництва чавуну та сталі та інші промислові процеси спалюють вугілля.

Видобуток та використання вугілля спричиняє багато передчасних смертей та багатьох хвороб. Вугільна промисловість завдає шкоди навколишньому середовищу, у тому числі через зміну клімату, оскільки вона є найбільшим антропогенним джерелом вуглекислого газу, 14,4 гігатонни (Гт) у 2018 році, що становить 40% загальних викидів викопного палива та понад 25% загальних глобальних викидів парникових газів. У рамках світового енергетичного переходу багато країн скоротили або повністю ліквідували використання вугільної енергії, і Генеральний секретар ООН попросив уряди припинити будівництво нових вугільних заводів до 2020 року. Максимальне споживання вугілля припало на 2013 рік, але для досягнення мети Паризької угоди щодо утримання глобального потепління значно нижче 2 ° C (3,6 ° F) споживання вугілля необхідно скоротити вдвічі з 2020 по 2030 рік.

Найбільший споживач та імпортер вугілля - Китай. Китай видобуває майже половину світового вугілля, за ним йде Індія - приблизно десята частина. Близько третини світового експорту вугілля припадає на Австралію, за нею йдуть Індонезія та Росія.

### Типи вугілля

Оскільки геологічні процеси з плином часу тиснуть на мертвий біотичний матеріал, за відповідних умов його метаморфічний клас або ранг послідовно зростає до:

- Торф, попередник вугілля;
- Буре вугілля, найнижче вугілля, найбільш шкідливе для здоров'я, яке використовується майже виключно як паливо для виробництва електроенергії;
- Джет, компактна форма бурого вугілля, іноді полірована; використовується як декоративний камінь з часів верхнього палеоліту;
- Суббітумінове вугілля, властивості якого коливаються між властивостями бурого вугілля та властивостями бітумного вугілля, використовується переважно як паливо для виробництва електроенергії парою;
- Бітумне вугілля, щільна осадова порода, зазвичай чорна, але іноді темно-коричнева, часто з чітко вираженими смугами яскравого та тьмяного матеріалу. Він використовується насамперед як паливо для виробництва електроенергії парою та для виробництва коксу. Відомий у Великобританії як парове вугілля і історично використовувався для видобутку пари в паровозах та кораблях;
- Антрацит, найвищий ранг вугілля, - це більш тверде, глянсове чорне вугілля, яке використовується в основному для опалення житлових та комерційних приміщень;
- Графіт важко запалюється і зазвичай не використовується як паливо; його найбільше використовують у олівцях або порошок для змащення;
- Каннельне вугілля (іноді його ще називають «свічковим вугіллям») — це різновид дрібнозернистого вугілля високого рангу із значним вмістом водню, що складається переважно з ліпнітіту

Існує кілька міжнародних стандартів на вугілля. Класифікація вугілля зазвичай базується на вмісті летких речовин. Однак найважливішою відмінністю є теплове вугілля (також відоме як парове вугілля), яке спалюється для виробництва електроенергії за допомогою пари; та металургійне вугілля (також відоме як коксівне вугілля), яке спалюється при високій температурі для отримання сталі.

Закон Гільта - це геологічне спостереження про те, що (на невеликій території) чим глибше знаходиться вугілля, тим вищий його ранг (або марка). Він застосовується, якщо температурний градієнт повністю вертикальний; проте метаморфізм може викликати бічні зміни рангу, незалежно від глибини. Наприклад, деякі вугільні пласти вугільного родовища Мадрида, штат Нью-Мексико, частково були перетворені в антрацит шляхом контактного метаморфізму з магматичного порога, тоді як решта пластів залишилася у вигляді бітумного вугілля.

### Густина енергії вугілля

Густина енергії вугілля становить приблизно 24 мегadžоулі на кілограм (приблизно 6,7 кіловат-годин на кг). Для вугільної електростанції з коефіцієнтом корисної дії 40% для оцінки потужності лампочки потужністю 100 Вт протягом одного року потрібно приблизно 325 кг (717 фунтів) вугілля.

27,6% світової енергії постачалося вугіллям у 2017 році, а Азія використовувала майже три чверті його.

### Газифікація вугілля

Газифікація вугілля - це процес виробництва з вугілля, води, повітря та/або кисню синтетичного газу — суміші, що складається переважно з чадного газу (CO), водню (H<sub>2</sub>), вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), природного газу (CH<sub>4</sub>) та водяної пари (H<sub>2</sub>O).

Історично вугілля газифікували для отримання вугільного газу, також відомого як "міський газ". Вугільний газ є горючим і використовувався для опалення та освітлення міст до появи масштабного видобутку природного газу з нафтових свердловин.

У сучасній практиці великомасштабні установки газифікації вугілля призначені переважно для виробництва електроенергії або для виробництва хімічних силовин. Водень, отриманий при газифікації вугілля, може бути використаний для різних цілей, таких як виробництво аміаку, забезпечення енергії водневої економіки або модернізація викопного палива.

Альтернативно, синтезований газ, отриманий з вугілля, може бути перетворений у паливо для транспортування, таке як бензин та дизельне паливо, шляхом додаткової обробки, або у метанол, який сам по собі може використовуватися як паливо для транспортування або добавка до палива, або який може бути перетворений у бензин.

Природний газ при газифікації вугілля можна охолоджувати до тих пір, поки він не зріджить для використання як паливо у транспортному секторі.

**Підземна газифікація вугілля.** Підземна газифікація вугілля (*Underground coal gasification — UCG*) — це промисловий процес, який перетворює вугілля в промисловий газ. UCG — це процес газифікації на місці, який

проводиться в шахтах не видобутого вугілля з використанням окислювачів і пари. Вироблений газ надходить на поверхню через свердловини, пробурені з поверхні.

Переважаючими газами у виробленому з вугілля газу є метан, водень, окис вуглецю та вуглекислий газ. Співвідношення змінюються залежно від тиску пласта, глибини вугілля та балансу окислювачів. Отриманий газ може спалюватися для виробництва електроенергії. Крім того, вихід газу може бути використаний для виробництва синтетичного природного газу, або водню та окису вуглецю, які можуть бути використані як хімічна сировина для виробництва палива (наприклад, дизельного палива), добрив, вибухових речовин та інших продуктів.

Ця технологія може бути застосована до вугільних ресурсів, які інакше є збитковими або технічно складними для видобутку традиційними методами видобутку. USG пропонує альтернативу звичайним методам видобутку вугілля для деяких ресурсів. Це було пов'язано з низкою проблем з боку екологічних активістів.

### Перетворення вугілля на рідке паливо

Перетворення вугілля на рідке паливо (*Coal liquefaction*) — це процес перетворення вугілля в рідкі вуглеводні: рідке паливо та нафтохімікати. Цей процес часто називають "вугіллям до X" або "вуглицем до X", де X може представляти собою багато різних продуктів на основі вуглеводнів. Однак найпоширенішим ланцюжком процесів є "Вугілля до рідкого палива" (*Coal to Liquid Fuels — CTL*).

### Методи перетворення вугілля на рідке паливо (Методи зрідження вугілля)

Специфічні технології зрідження вугілля зазвичай діляться на дві категорії: процеси прямого (*direct coal liquefaction — DCL*) та непрямого зрідження вугілля (*indirect coal liquefaction — ICL*). Прямі процеси ґрунтуються на таких підходах, як карбонізація, піроліз та гідрування.

Непрямі процеси зрідження вугілля зазвичай передбачають газифікацію вугілля до суміші чадного газу та водню, часто відомого як синтез -газ або просто синтез -газ. За допомогою процесу Фішера – Тропша синтез -газ перетворюється на рідкі вуглеводні.

Навпаки, прямі процеси зрідження перетворюють вугілля в рідину безпосередньо, не вимагаючи проміжних етапів, руйнуючи органічну структуру вугілля із застосуванням розчинника-донора водню, часто при високих тисках і температурах. Оскільки рідкі вуглеводні, як правило, мають більш високе молярне співвідношення водень-вуглець, ніж вугілля, у технологіях ICL та DCL необхідно застосовувати процеси гідрування або відкидання вуглецю.

У промислових масштабах (тобто тисячі барелів на день) завод зрідження вугілля зазвичай вимагає багатомільярдних капітальних вкладень.

**Процеси піролізу та карбонізації.** Існує ряд процесів карбонізації. Перетворення карбонізації зазвичай відбувається шляхом піролізу або деструктивної перегонки. Він виробляє вугільну смолу, що конденсується, нафтові та водні пари, неконденсований синтетичний газ та твердий залишок - вугілля.

Типовим прикладом карбонізації є процес Карріка. У цьому низькотемпературному процесі карбонізації вугілля нагрівається при температурі від 680 ° F (360 ° C) до 1380 ° F (750 ° C) за відсутності повітря. Ці температури оптимізують видобуток вугільних смол, багатіших на більш легкі вуглеводні, ніж звичайна вугільна смола. Однак будь-яка рідина, що виробляється, є переважно побічним продуктом, а основним продуктом є напівкокс — тверде і бездимне паливо.

Рідкі виходи піролізу та процесу Карріка зазвичай вважаються занадто низькими для практичного використання для виробництва синтетичного рідкого палива. Одержані вугільні смоли та олії з піролізу, як правило, вимагають подальшої обробки, перш ніж вони зможуть бути використані як моторне паливо; їх обробляють гідроочищенням для видалення видів сірки та азоту, після чого вони остаточно переробляються на рідке паливо.

Таким чином, економічна життєздатність цієї технології викликає сумніви.

**Процеси гідрування.** Одним з основних методів прямого перетворення вугілля в рідину шляхом процесу гідрування є процес Бергіуса, розроблений Фрідріхом Бергіусом у 1913 р. У цьому процесі сухе вугілля змішується з важкою нафтою, переробленою у процесі. Зазвичай до суміші додають каталізатор. Реакція відбувається при тиску водню від 400 ° C (752 ° F) до 500 ° C (932 ° F) і від 20 до 70 МПа

Існує також ряд двостадійних процесів прямого зрідження; однак після 1980-х років лише каталітичний двоступеневий процес зрідження, модифікований із процесу Н-вугілля; процес видобутку рідкого розчинника британським вугіллям; та Японії був розроблений процес зрідження бурого вугілля.

### Непрямі процеси перетворення

Процеси непрямого зрідження вугілля (ICL) працюють у дві стадії. На першому етапі вугілля перетворюється на синтез-газ (очищену суміш газу CO та H<sub>2</sub>). На другому етапі синтез-газ перетворюється на легкі вуглеводні за допомогою одного з трьох основних процесів: синтезу Фішера – Тропша, синтезу метанолу з подальшим перетворенням на бензин або нафтохімічні речовини та метанізації. Фішер -Тропш - найдавніший з процесів ICL.

У процесі синтезу метанолу синтез-газ перетворюється на метанол, який згодом полімеризується в алкани над цеолітовим каталізатором.

Реакція метанізації перетворює синтез-газ у замісний природний газ (СПГ).

В іншому застосуванні газифікації водень, видобутий із синтетичного газу, реагує з азотом з утворенням аміаку. Потім аміак реагує з діоксидом вуглецю з утворенням сечовини.

### Дослідження та розробка зрідження вугілля

Сполучені Штати мають активну програму сприяння використанню альтернативних видів палива, а використання великих внутрішніх запасів вугілля США для виробництва палива шляхом зрідження вугілля матиме очевидні економічні переваги та переваги для безпеки. Але з їх вищим вуглецевим слідом, паливо зі зрідженого вугілля стикається зі значною проблемою скорочення викидів парникових газів протягом життєвого циклу до конкурентного рівня, що вимагає продовження

досліджень та розвитку технології зрідження для підвищення ефективності та скорочення викидів. Необхідно буде реалізувати ряд напрямків досліджень та розробок, серед яких:

- Збирання та зберігання вуглецю, включаючи покращене вилучення нафти та методи розробки CCS для компенсації викидів як у результаті синтезу, так і утилізації рідкого палива з вугілля,

- Суміші вугілля/біомаси/природного газу для зрідження вугілля: Використання нейтральної вуглецю біомаси та багатого воднем природного газу як спільної сировини у процесах зрідження вугілля має значний потенціал для виведення викидів парникових газів у життєвий цикл у конкурентні діапазони,

- Водень з відновлюваних джерел енергії: потреба у водні для процесів зрідження вугілля може забезпечуватися за рахунок відновлюваних джерел енергії, включаючи вітер, сонячну енергію та біомасу, що значно зменшує викиди, пов'язані з традиційними методами синтезу водню (такими як риформінг парового метану або газифікація вугілля), і

Покращення процесу, такі як інтенсифікація процесу Фішера-Тропша, гібридні процеси зрідження та більш ефективні технології поділу повітря, необхідні для виробництва кисню (наприклад, сепарація кисню на основі керамічної мембрани).

Щороку дослідник або розробник конверсії вугілля отримує нагороду промисловості за отримання Всесвітньої премії Carbon To X.

З точки зору комерційного розвитку, конверсія вугілля зазнає значного прискорення. Географічно більшість активних проєктів та нещодавно розпочатих операцій розташовані в Азії, переважно в Китаї, тоді як американські проєкти були відкладені або скасовані через розробку сланцевого газу та сланцевої нафти.

### Обробка вугілля перед спалюванням

Очищення вугілля є результатом застосування технології модернізації вугілля, яка видаляє вологу та деякі забруднювачі з вугілля нижчого рангу, такого як суббітумінове та буре вугілля, та підвищує їх теплотворну здатність. Технології переробки вугілля — це, як правило, процедури попереднього поліпшення та/або процеси, які змінюють характеристики вугілля до його спалювання. Метою технологій поліпшення характеристик вугілля до спалювання є підвищення ефективності та зменшення викидів при спалюванні вугілля. Залежно від ситуації, технологія попередньої переробки може бути використана замість або як доповнення до технологій після спалювання для контролю викидів від котлів, що працюють на вугіллі. Першочерговою перевагою очищеного вугілля є здатність зменшити чистий обсяг викидів вуглецю, що викидається в даний час від генераторів електроенергії, та зменшила б кількість викидів, які пропонуються управляти за допомогою нових методологій поглинання вуглецю. Технології поліпшення характеристик вугілля були розроблені насамперед у США, кілька подібних технологій були досліджені, розроблені та випробувані у Вікторії, Австралія, включаючи технологію ущільненого вугілля (Холодний процес), розроблену для зміни хімічних зв'язків бурого вугілля для створення продукту, який є чистішим, стабільним (не схильним до самозаймання), експортується і має достатньо високу теплотворну здатність, щоб бути еквівалентом чорного вугілля.

### Електростанції на вугіллі

Вугілля, спалене як тверде паливо на вугільних електростанціях для виробництва електроенергії, називається тепловим вугіллям. Вугілля також використовується для отримання дуже високих температур шляхом спалювання. Рання смертність через забруднення повітря оцінюється у 200 на ГВт-рік, проте вона може бути вищою навколо електростанцій, де скрубери не використовуються, або меншою, якщо вони знаходяться далеко від міст. Зусилля у всьому світі щодо скорочення використання вугілля змусили деякі регіони перейти на природний газ та електроенергію з низьковуглецевих джерел.



*Електростанція Castle Gate біля Хелпер, штат Юта, США*

Коли вугілля використовується для виробництва електроенергії, його зазвичай розтирають, а потім спалюють у печі з котлом. Тепло печі перетворює котельну воду в пару, яка потім використовується для обертання турбін, які обертають генератори та створюють електрику. Термодинамічна ефективність цього процесу коливається приблизно від 25% до 50% залежно від попереднього горіння, технології турбіни (наприклад, надкритичного парогенератора) та віку установки.

Було побудовано кілька електростанцій з інтегрованим газифікаційним комбінованим циклом (*integrated gasification combined cycle — IGCC*), які більш ефективно спалюють вугілля. Замість того, щоб подрібнювати вугілля і спалювати його безпосередньо як паливо в парогенераторному котлі, вугілля газифікується для утворення синтетичного газу, який спалюється в газовій турбіні для виробництва електроенергії (так само, як природний газ спалюється в турбіні). Гарячі вихлопні гази з турбіни використовуються для підйому пари в парогенераторі, що відновлює тепло, що живить додаткову парову турбіну. Загальний коефіцієнт корисної дії при використанні для забезпечення комбінованого тепла та електроенергії може досягати 94%. Електростанції з інтегрованим газифікаційним комбінованим циклом



(IGCC) викидають менше забруднення місцевості, ніж звичайні установки на вугільному паливі; проте технологія збору та зберігання вуглецю після газифікації та перед спалюванням досі виявилася надто дорогою для використання з вугіллям. Інші способи використання вугілля — це паливо вугільно-водяної суспензії (*coal-water slurry fuel* — CWS), розроблене в Радянському Союзі. Однак вони не широко використовуються через брак прибутку.

У 2017 році 38% світової електроенергії надходило з вугілля, такий самий відсоток, як 30 років тому. У 2018 році глобальна встановлена потужність становила 2 ТВт (з них 1 ТВт - у Китаї), що становило 30% від загальної потужності виробництва електроенергії. Найбільш залежною великою країною є Південна Африка, де понад 80% електроенергії виробляється вугіллям, але тільки Китай виробляє більше половини світової вугільної електроенергії.

Максимальне використання вугілля було досягнуто в 2013 р. У 2018 році коефіцієнт потужності електростанцій, що працюють на вугіллі, становив у середньому 51%, тобто вони працювали близько половини своїх наявних годин роботи.

### Шкода здоров'ю людини

Використання вугілля як палива спричиняє погане самопочуття та смерть людей. Видобуток та переробка вугілля спричиняє забруднення повітря та води. Заводи, що працюють на вугіллі, виділяють оксиди азоту, діоксид сірки, забруднення твердими частинками та важкі метали, які негативно впливають на здоров'я людини. Видобуток метану з вугільних пластів важливий, щоб уникнути аварій при видобутку корисних копалин.

Смертельний лондонський смог був спричинений насамперед інтенсивним використанням вугілля. За оцінками, у всьому світі вугілля щороку спричиняє 800 000 передчасних смертей, переважно в Індії та Китаї.

Спалювання вугілля є основним викидачем діоксиду сірки, який створює частинки PM<sub>2,5</sub>, найнебезпечнішу форму забруднення повітря.

Викиди вугільного диму викликають астму, інсульти, зниження інтелекту, закупорку артерій, серцеві напади, застійну серцеву недостатність, серцеві аритмії, отруєння ртуттю, закупорку артерій та рак легенів.

Щорічні витрати на охорону здоров'я в Європі від використання вугілля для виробництва електроенергії оцінюються до 43 млрд євро.

У Китаї покращення якості повітря та здоров'я людей зростає із посиленням політики щодо клімату, головним чином тому, що енергія країни так сильно залежить від вугілля. І була б чиста економічна вигода.

Вдихання вугільного пилу викликає у вугільників пневмоконіоз або "чорні легені", тому що через вугільний пил легені буквально чорніють, які звичайно мають рожевий колір. Тільки в Сполучених Штатах вважається, що 1500 колишніх працівників вугільної промисловості щорічно гинуть від наслідків вдихання вугільного пилу.

Щорічно виробляється величезна кількість вугільної золи та інших відходів. Використання вугілля щорічно утворює сотні мільйонів тонн золи та інших відходів. До них відносяться летуча зола, донна зола та осад сульфуровання димових

газів, що містить ртуть, уран, торій, миш'як та інші важкі метали, поряд з неметалами, такими як селен.

Близько 10% вугілля складає зола: вугільна зола небезпечна і токсична для людини та деяких інших живих істот. Вугільна зола містить радіоактивні елементи уран і торій. Вугільна зола та інші тверді побічні продукти згоряння зберігаються локально і витікають різними способами, що піддають людей, що живуть поблизу вугільних заводів, радіації та токсичним впливам навколишнього середовища.

### **Вплив вугільної промисловості на навколишнє середовище**

Видобуток вугілля та заправка вугіллям електростанцій та промислові процеси можуть завдати значної екологічної шкоди.

Видобуток вугілля впливає на водні системи. Наприклад, видобуток корисних копалин впливає на рівень ґрунтових вод і ґрунтових вод та їх кислотність. Розкиди легкої золи, такі як розтік шламу золи вугільної золи на Кінгстонському заводі, також можуть забруднити землю та водні шляхи та зруйнувати будинки. Електростанції, які спалюють вугілля, також споживають велику кількість води. Це може вплинути на течії річок та мати наслідковий вплив на інші види використання землі. У районах дефіциту води, таких як пустеля Тар у Пакистані, видобуток вугілля та вугільні електростанції будуть використовувати значну кількість води.

Одним з найбільш ранніх відомих впливів вугілля на кругообіг води були кислотні дощі. У 2014 р. було виділено приблизно 100 Тг/с діоксиду сірки ( $\text{SO}_2$ ), більше половини з яких — від спалювання вугілля. Після вивільнення діоксид сірки окислюється до  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , яка розсіює сонячне випромінювання, отже, його збільшення в атмосфері впливає охолоджуюче на клімат. Це благотворно маскує деякі види потепління, викликані збільшенням парникових газів. Однак сірка осідає з атмосфери у вигляді кислотних дощів протягом кількох тижнів, тоді як вуглекислий газ залишається в атмосфері протягом сотень років. Викид  $\text{SO}_2$  також сприяє широкому підкисленню екосистем.

Несправні вугільні шахти також можуть викликати проблеми. Просідання може статися над тунелями, завдаючи шкоди інфраструктурі або посівам. Видобуток кам'яного вугілля також може спричинити тривалі пожежі, і було підраховано, що в будь-який момент горять тисячі вугільних пластів. Наприклад, Бреннендер Берг горить з 1668 року і все ще горить у 21 столітті.

Виробництво коксу з вугілля виробляє аміак, кам'яновугільну смолу та газоподібні сполуки як побічні продукти, які у разі їх скидання на сушу, повітря або водні шляхи можуть забруднювати навколишнє середовище. Сталеплавильний завод "Вайалла" є одним із прикладів коксохімічного підприємства, де рідкий аміак скидався у морське середовище.

### Природний газ

*Природний газ*, який іноді називають *викопним газом*, іноді просто *газ* — це суміш вуглеводневих газів, що міститься в природі, що складається з метану і зазвичай містить різну кількість інших вищих алканів, а іноді і невеликий відсоток вуглекислого газу, азоту, сірководню або гелію. Природний газ є безбарвним, без запаху та вибухонебезпечним, тому для раннього виявлення витоків додається сірчаний запах (подібний до запаху тухлих яєць). Природний газ утворюється, коли шари рослинної та тваринної речовини розкладаються і піддаються інтенсивному нагріванню та тиску під поверхнею Землі протягом мільйонів років. Енергія, яку рослини спочатку отримували від Сонця, зберігається у вигляді хімічних зв'язків у газі. Природний газ — це викопне паливо.

Природний газ — це невідновлюваний вуглеводень, який використовується як джерело енергії для опалення, приготування їжі та виробництва електроенергії. Він також використовується як паливо для автомобілів та як хімічна сировина у виробництві пластмас та інших комерційно важливих органічних хімікатів.

Видобуток та споживання природного газу є основним і зростаючим чинником зміни клімату. Він сам по собі є потужним парниковим газом, коли викидається в атмосферу, і при спалюванні створює вуглекислий газ. Природний газ можна ефективно спалювати для виробництва тепла та електроенергії, виділяючи менше відходів та токсинів у місці їх використання щодо інших видів викопного та біомаси. Тим не менш, вентиляція та спалювання газу, а також ненавмисні викиди у всьому світі по всьому ланцюгу поставок можуть призвести до подібного вуглецевого сліду в цілому.

Природний газ міститься в глибоких підземних породах або пов'язаний з іншими пластами вуглеводнів у шарах вугілля і як клатрати метану. Нафта — це ще одне викопне паливо, знайдене поблизу та з природним газом. Більшість природного газу з часом створюється за двома механізмами: біогенним та термогенним. Біогенний газ створюється метаногенними організмами в болотах, на звалищах і в дрібних відкладах. Глибше в землі, при більшій температурі та тиску, термогенний газ створюється з похованого органічного матеріалу.

При видобутку нафти газ іноді спалюють у вигляді факелу. Перш ніж природний газ можна буде використовувати як паливо, більшість видів газу, але не всі, необхідно переробити для видалення домішок, включаючи воду, щоб відповідати специфікаціям товарного природного газу. До побічних продуктів цієї обробки належать етан, пропан, бутани, пентани та вуглеводні з більш високою молекулярною масою, сірководень (який може бути перетворений у чисту сірку), вуглекислий газ, водяна пара, а іноді гелій та азот.

Природний газ іноді неофіційно називають просто "газом", особливо якщо його порівнюють з іншими джерелами енергії, такими як нафта або вугілля.

У 19 столітті природний газ переважно отримували як побічний продукт виробництва нафти. Невеликі легкі газові вуглецеві ланцюги вийшли з розчину, коли видобуті рідини зазнали зниження тиску з резервуара на поверхню, подібно до того, як закрили пляшку безалкогольного напою, де вуглекислий газ витікає. Газ часто розглядали як побічний продукт, небезпеку та проблему утилізації на активних родовищах нафти. Вироблені великі обсяги не могли бути використані, поки

не були побудовані відносно дорогі трубопроводи та сховища для доставки газу на споживчі ринки.

До початку 20 -го століття більшість природного газу, пов'язаного з нафтою, просто видаляли або спалювали на нафтових родовищах. Підприємства для видалення газу та спалювання все ще практикуються в сучасний час, але у всьому світі тривають зусилля щодо їх припинення та заміни іншими комерційно вигідними та корисними альтернативами. Небажаний газ (або безжиттєвий газ без ринку) часто повертається у пласт „нагнітальними” свердловинами в очікуванні можливого майбутнього ринку або для повторного підвищення тиску пласта, що може підвищити швидкість видобутку нафти з інших свердловин. У регіонах з високим попитом на природний газ (наприклад, у США) трубопроводи споруджуються тоді, коли економічно доцільно транспортувати газ від свердловини до кінцевого споживача.

На додаток до транспортування газу по трубопроводах для використання у виробництві електроенергії, іншим кінцевим використанням природного газу є експорт у вигляді зрідженого природного газу, або перетворення природного газу в інші рідкі продукти за технологіями *газу в рідину* (*gas to liquids — GTL*). Технології GTL можуть перетворювати природний газ у рідкі продукти, такі як бензин, дизельне паливо або реактивне паливо. Було розроблено різноманітні технології GTL, включаючи Фішера – Тропша (*Fischer–Tropsch — F–T*), метанол до бензину (*methanol to gasoline — MTG*) та синтез-газ до бензину плюс (*syngas to gasoline plus STG+*). F – T виробляє синтетичну нафту, яку можна додатково переробляти в готову продукцію, тоді як MTG може виробляти синтетичний бензин з природного газу. STG+ може виробляти бензин, дизельне паливо, реактивне паливо та ароматичні хімікати безпосередньо з природного газу шляхом одноконтурного процесу. У 2011 році в Катарі запрацювала 140 000 барелів компанії Royal Dutch Shell (22 000 м<sup>3</sup>) на добу.

Природний газ може бути "асоційованим" (знаходиться на нафтових родовищах) або "не асоційованим" (ізолюваний на родовищах природного газу), а також міститься у вугільних пластах (у вигляді вугільного метану). Іноді він містить значну кількість етану, пропану, бутану та пентану — важчі вуглеводні, видалені для комерційного використання до того, як метан буде продаватися як споживче паливо або хімічна сировина для рослин. Перед транспортуванням природного газу також слід видалити такі вуглеводні, як вуглекислий газ, азот, гелій (рідко) та сірководень.

Природний газ, видобутий із нафтових свердловин, називається обсадним газом (незалежно від того, чи дійсно він видобутий у кільцевому кільці та через вихідний отвір колодязя) або попутним газом. Промисловість природного газу видобуває дедалі більшу кількість газу зі складних видів ресурсів: кислий газ, вуглеводневий газ, сланцевий газ та вугільний метан.

Існують певні розбіжності щодо того, яка країна має найбільші розвідані запаси газу. Джерела, які вважають, що Росія має на сьогодні найбільші розвідані запаси, включають ЦРУ США (47600 км<sup>3</sup>), Адміністрацію енергетичної інформації США (47800 км<sup>3</sup>), та ОПЕК (48700 км<sup>3</sup>). Однак компанія BP (*British Petroleum*) зараховує Росії лише 32 900 км<sup>3</sup>, що б поставило її на друге місце, трохи відстаючи

від Ірану (33100 до 33800 км<sup>3</sup>, залежно від джерела). З Газпромом Росія часто є найбільшим у світі видобувачем природного газу. Найбільші перевірені ресурси (у кубічних кілометрах) — це 183 300 (2013) у світі, Іран 33 600 (2013), Росія 32 900 (2013), Катар 25 100 (2013), Туркменістан 17 500 (2013) та США 8500 (2013) ).

За оцінками, існує близько 900 000 км<sup>3</sup> "нетрадиційного" газу, такого як сланцевий газ, з яких 180 000 км<sup>3</sup> можна відновити. У свою чергу, багато досліджень MIT, Black & Veatch та DOE передбачають, що на природний газ у майбутньому буде припадати більша частина виробництва електроенергії та тепла.

Найбільшим у світі родовищем газу є морське газоконденсатне південно-парсове/північно-купольне газове родовище, яке ділиться між Іраном та Катаром. За оцінками, у ньому є 51 000 кубічних кілометрів природного газу та 50 мільярдів барелів (7,9 мільярда кубометрів) конденсату природного газу.

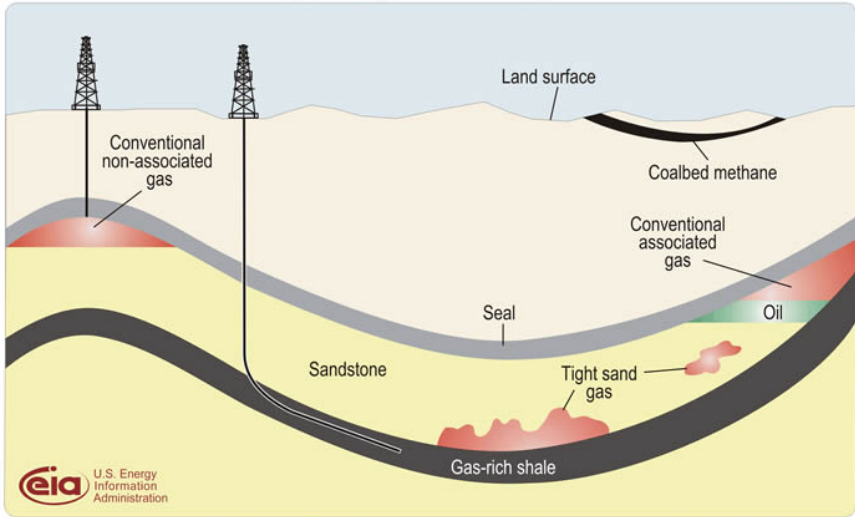
Оскільки природний газ не є чистим продуктом, оскільки пластовий тиск падає, коли з полю видобувають попутний газ у надкритичних (тиск/температура) умовах, компоненти з більш високою молекулярною масою можуть частково конденсуватися при ізотермічному розгерметизації-ефект називається ретроградна конденсація . Утворюється таким чином рідина може затримуватися, коли пори газового балона вичерпуються. Одним із способів вирішення цієї проблеми є повторне нагнітання висушеного газу без конденсату для підтримки підземного тиску та дозволу повторного вивільнення дозування та вилучення конденсату. Частіше рідина конденсується на поверхні, і одним із завдань газової установки є збирання цього конденсату. Отримана рідина називається рідиною природного газу (NGL) і має комерційну цінність.

### Сланцевий газ

Сланцевий газ — природний газ, що виробляється зі сланців. Оскільки сланцева проникність материнської породи занадто низька, щоб дозволити потоку газу в економічних кількостях, свердловини сланцевого газу залежать від тріщин, що дозволяють газу витікати. Ранні сланцеві газові свердловини залежали від природних тріщин, через які протікав газ; майже всі свердловини сланцевого газу сьогодні потребують тріщин, штучно створених за допомогою гідророзриву пластів. З 2000 року сланцевий газ став основним джерелом природного газу в США та Канаді. Через збільшення видобутку сланцевого газу Сполучені Штати у 2014 році були виробником природного газу номер один у світі. Видобуток сланцевого газу в Сполучених Штатах описували як "революцію сланцевого газу" і як "одну з визначних подій у 21 столітті".

Після збільшення видобутку у Сполучених Штатах, розвідка сланцевого газу розпочинається в таких країнах, як Польща, Китай та ПАР. Китайські геологи визнали басейн Сичуань перспективною метою для буріння сланцевого газу через схожість сланців з тими, які виявилися продуктивними в США. Видобуток із свердловини Вей Вей 201 становить  $1 \times 10^4$ – $2 \times 10^4$  м<sup>3</sup> на добу. Наприкінці 2020 року Китайська національна нафтова корпорація вимагала щоденного видобутку 20 мільйонів кубометрів газу зі своєї демонстраційної зони Чаннінг-Вейюань.

## Schematic geology of natural gas resources



*Розташування сланцевого газу порівняно з іншими видами родовищ газу*

**Міський газ.** Міський газ - це легкозаймисте газоподібне паливо, що виробляється шляхом руйнівної перегонки вугілля. Він містить різноманітні теплотворні гази, включаючи водень, окис вуглецю, метан та інші леткі вуглеводні, разом з невеликою кількістю некалорійних газів, таких як вуглекислий газ та азот, і використовується подібно до природного газу. Це історична технологія і, як правило, економічно не конкурентоспроможна з іншими джерелами паливного газу сьогодні.

Більшість міських «газових будинків», розташованих на сході США наприкінці 19-початку 20 століть, були простими коксовими печами з побічними продуктами, які нагрівали бітумне вугілля у герметичних камерах. Газ, вигнаний з вугілля, збирався і розподілявся по мережах труб до житлових будинків та інших будівель, де він використовувався для приготування їжі та освітлення. (Газове опалення набуло широкого поширення лише в останній половині 20 -го століття.) Вугільна смола (або асфальт), що збиралася в днищах газових печей, часто використовувалася для покрівлі та інших гідроізоляційних цілей, а також у суміші з піском. а гравій використовували для мощення вулиць.

**Кристалізований природний газ – гідрати.** Величезна кількість природного газу (насамперед метану) існує у вигляді гідратів під осадом на шельфах континентів на морі та на суші в арктичних регіонах, де спостерігається вічна мерзлота, наприклад у Сибіру. Для утворення гідратів потрібна комбінація високого тиску і низької температури.

У 2010 році вартість видобутку природного газу з кристалізованого природного газу оцінювалася в два рази дорожче за видобуток природного газу зі звичайних джерел і навіть дорожче з морських родовищ.

У 2013 році Японська національна корпорація з нафти, газу та металів (JOGMEC) оголосила, що вони вилучили комерційно значущу кількість природного газу з гідрату метану.

### Зберігання та транспортування природного газу

Через його низьку щільність нелегко зберігати природний газ або транспортувати його автомобілем. Трубопроводи природного газу недоцільні в океанах, оскільки газ потрібно охолоджувати та стискати, оскільки тертя в трубопроводі викликає нагрівання газу. Багато існуючих трубопроводів в Америці близькі до досягнення своїх можливостей, що спонукає деяких політиків, що представляють північні штати, говорити про потенційний дефіцит. Велика вартість торгівлі означає, що ринки природного газу в усьому світі набагато менш інтегровані, що спричиняє значні різниці в цінах між країнами. У Західній Європі мережа газопроводів уже щільна. Нові трубопроводи плануються або будуються у Східній Європі та між газовими родовищами в Росії, Близькому Сході та Північній Африці та Західній Європі.

Щоразу, коли газ купується або продається на пунктах передачі зберігання, укладаються правила та угоди щодо якості газу. Вони можуть включати гранично допустиму концентрацію  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  і  $\text{H}_2\text{O}$ . Зазвичай якісний газ для продажу, який був оброблений для видалення забруднення, торгується на основі "сухого газу" і вимагає, щоб він був комерційно вільним від неприємних запахів, матеріалів та пилу чи інших твердих чи рідких речовин, воску, смол та гумоутворюючих компонентів, які можуть пошкодити або негативно вплинути на роботу обладнання за течією передачі місяця зберігання.

Транспортери СПГ транспортують *скраплений природний газ (СПГ)* через океани, тоді як автоцистерни можуть перевозити зріджений або стиснений природний газ (СПГ) на менші відстані. Морські перевезення на судах-перевізниках СПГ, які зараз розробляються, можуть бути конкурентоспроможними для транспортування СПГ у певних умовах.

Газ перетворюється на рідину на заводі зрідження та повертається у форму газу на заводі з регазифікації на термінали. Використовується також обладнання для регазифікації судна. СПГ є кращою формою для транспортування природного газу на великі відстані, тоді як трубопровід є переважним для транспортування на відстані до 4000 км (2500 миль) над сушею та приблизно наполовину цієї відстані від берега.

*Стиснений природний газ (compressed natural gas — CNG)* транспортується під високим тиском, зазвичай вище 200 бар (20000 кПа; 2900 psi). Компресори та декомпресійне обладнання є менш капіталомісткими і можуть бути економічними при менших розмірах агрегатів, ніж установки зрідження/регазифікації. Вантажівки та перевізники природного газу можуть транспортувати природний газ безпосередньо до кінцевих споживачів або до пунктів розподілу, таких як трубопроводи.

У минулому природний газ, який був видобутий під час видобутку нафти, не міг бути прибутковим для продажу, а просто спалювався на нафтовому родовищі в процесі спалювання. Зараз спалювання в багатьох країнах є незаконним. Крім того, зростання попиту за останні 20-30 років зробило видобуток газу, пов'язаного з нафтою, економічно вигідним. Як додатковий варіант, газ тепер іноді повторно закачують у пласт для покращення видобутку нафти шляхом підтримки тиску, а також затоплення, що не зміщується або не зміщується. Збереження, повторне закачування або спалювання природного газу, пов'язаного з нафтою, насамперед залежить від близькості до ринків (трубопроводів) та регуляторних обмежень.

Природний газ можна опосередковано експортувати за рахунок поглинання іншої фізичної продукції. Недавнє дослідження показує, що розширення видобутку сланцевого газу в США спричинило падіння цін щодо інших країн. Це спричинило бум експорту енергоємного виробничого сектору, внаслідок чого середня доларова одиниця експорту промислового виробництва США майже втричі збільшила свій енергетичний вміст між 1996 та 2012 роками.

Наприкінці 1970 -х років у Саудівській Аравії була винайдена "майстерна система газопостачання", яка припинила будь-яку необхідність спалювання. Супутникове спостереження, однак, показує, що спалювання факелів та вентиляція все ще практикуються в деяких країнах, що добувають газ.

Природний газ використовується для виробництва електроенергії та тепла для опріснення. Подібним чином, деякі звалища, які також скидають метанові гази, були створені для захоплення метану та виробництва електроенергії.

Природний газ часто зберігається під землею у вичерпаних газових резервуарах з попередніх газових свердловин, соляних куполів або в резервуарах у вигляді зрідженого природного газу. Газ закачується в період низького попиту і видобувається, коли попит зростає. Зберігання поблизу кінцевих користувачів допомагає задовольнити нестабільні потреби, але таке зберігання може бути не завжди практичним.

Оскільки на 15 країн світу припадає 84% видобутку у всьому світі, доступ до природного газу став важливою проблемою міжнародної політики, і не намагаються контролювати трубопроводи. У перше десятиліття XXI століття "Газпром", державна енергетична компанія в Росії, вела суперечки з Україною та Білоруссю щодо ціни на природний газ, що викликало побоювання, що постачання газу до частин Європи може бути припинено за політичні причини. США готуються до експорту природного газу.

**Плавучий зріджений природний газ.** Плавучий завод зі зрідженим природним газом (*floating liquefied natural gas — FLNG*) — це плавуче виробниче сховище та розвантажувальне підприємство, яке здійснює операції зі зрідженого природного газу (СПГ) для розробки ресурсів природного газу на морі. Плаваючи над морським родовищем природного газу, завод СПГ виробляє, зріджує, зберігає та передає СПГ (і, можливо, скраплений газ та конденсат) у морі, перш ніж перевізники доставлять його безпосередньо на ринки.

Плавучий скраплений природний газ (*FLNG*) — це інноваційна технологія, розроблена для того, щоб мати змогу освоїти морські ресурси газу, які в іншому випадку залишалися б невикористаними через екологічні чи економічні фактори, які



в даний час роблять їх недоцільним для розробки наземного виробництва *FLNG*. Технологія *FLNG* також забезпечує ряд екологічних та економічних переваг:

- Екологічний - оскільки вся обробка проводиться на газовому родовищі, немає вимоги щодо довгих трубопроводів до берега, компресійних установок для перекачування газу до берега, днопоглиблювальних та причальних споруд та будівництва на суші заводу з переробки СПГ, що значно зменшує екологічні показники слід. Уникнення будівництва також сприяє збереженню морського та прибережного середовища. Крім того, екологічні порушення будуть зведені до мінімуму під час виведення з експлуатації, оскільки об'єкт можна легко відключити та вилучити, перш ніж відремонтувати та перерозподілити в іншому місці.

- Економічний - Якщо перекачування газу до берега може бути непомірно дорогим, *FLNG* робить розробку економічно вигідною. В результаті це відкриє для країн нові бізнес-можливості для розробки морських родовищ газу, які в іншому випадку залишилися б незатребуваними, наприклад, тих, що знаходяться в Східній Африці.

Багато газових і нафтових компаній розглядають економічні та екологічні переваги плавучого зрідженого природного газу (*FLNG*).

### Вироблення електроенергії

Природний газ є основним джерелом виробництва електроенергії за рахунок когенерації, газових турбін і парових турбін.

Когенерація або комбінація тепла та електроенергії (ТЕЦ) — це використання теплового двигуна або електростанції для одночасного виробництва електроенергії та корисного тепла.

Природний газ також добре підходить для комбінованого використання у поєднанні з відновлюваними джерелами енергії, такими як вітер чи сонячна енергія, і для доповнення електростанцій з піковим навантаженням, що працюють разом з гідроелектростанціями. Більшість пікових систем електростанції та деякі генератори двигунів поза мережею використовують природний газ. Особливо високого ККД можна досягти шляхом поєднання газових турбін з паровою турбіною в режимі комбінованого циклу. Природний газ згорає чистіше, ніж інші види палива, такі як нафта та вугілля. Оскільки при спалюванні природного газу утворюється і вода, і вуглекислий газ, він виробляє менше вуглекислого газу на одиницю вивільненої енергії, ніж вугілля, яке виробляє переважно вуглекислий газ. При спалюванні природного газу виробляється лише близько половини вуглекислого газу на кіловат-годину (кВт-год), яке виробляє вугілля. При транспортуванні спалювання природного газу виробляє приблизно на 30% менше вуглекислого газу, ніж спалювання нафти. Адміністрація енергетичної інформації США повідомляє про викиди у світі за 2012 рік у мільйонах тонн вуглекислого газу:

- Природний газ: 6799
- Нафта: 11 695
- Вугілля: 13 787

Виробництво електроенергії на вугіллі викидає близько 2000 фунтів (900 кг) вуглекислого газу за кожен вироблений мегават-годину (МВт-год), що майже вдвічі більше вуглекислого газу, що виділяється при виробництві природного газу. Через

цю вищу ефективність викидів вуглецю при виробництві природного газу, оскільки паливна суміш у Сполучених Штатах змінилася з метою скорочення вугілля та збільшення видобутку природного газу, викиди вуглекислого газу несподівано скоротилися. Показники, виміряні у першому кварталі 2012 року, були найнижчими з усіх, зареєстрованих за перший квартал будь-якого року з 1992 року.

Виробництво електроенергії за допомогою комбінованого циклу з використанням природного газу в даний час є найчистішим доступним джерелом електроенергії з використанням вуглеводневого палива, і ця технологія широко і все ширше використовується, оскільки природний газ можна отримувати за все більш прийнятних витрат. Технологія паливних елементів може врешті-решт забезпечити більш чисті варіанти перетворення природного газу в електроенергію, але поки вона не є конкурентоспроможною за ціною. Електроенергія та тепло місцевого виробництва з використанням комбінованої теплової та електростанції, що працює на природному газі (ТЕЦ або Когенераційна установка), вважається енергоефективним та швидким способом скорочення викидів вуглецю.

Енергія природного газу зростає з 740 ТВт-год у 1973 році до 5140 ТВт-год у 2014 -му, що виробляє 22% загальної світової електроенергії. Приблизно вдвічі менше, ніж виробляється з вугіллям. Зусилля у всьому світі щодо скорочення використання вугілля змусили деякі регіони перейти на природний газ.

### Нафта

**Нафта** (*petroleum, oil*), або **сиря нафта**, є природною жовтувато-чорною рідиною, яка зустрічається в геологічних формаціях під поверхнею Землі. Її зазвичай переробляють на різні види палива. Компоненти нафти розділяють за допомогою техніки, яка називається фракційною перегонкою, тобто поділом рідкої суміші на фракції, що відрізняються температурою кипіння, за допомогою дистиляції, зазвичай за допомогою колонки з фракціонуванням. Нафта складається з природних вуглеводнів різної молекулярної маси і може містити різні органічні сполуки. Назва нафти охоплює як природну сировину, що переробляється, так і нафтопродукти, які складаються з рафінованої сирової нафти. Вископне паливо, нафта утворюється, коли велика кількість мертвих організмів, переважно зоопланктону та водоростей, ховається під осадовою породою і піддається як інтенсивному нагріванню, так і тиску.

Нафта переважно видобувається шляхом буріння нафти. Буріння проводиться після вивчення структурної геології, аналізу осадових басейнів та характеристики водосховищ. Нещодавні вдосконалення технологій також призвели до використання інших нетрадиційних запасів, таких як нафтові піски та горючі сланці. Після видобутку нафта очищується і найлегше шляхом дистиляції поділяється на численні продукти для безпосереднього використання або використання у виробництві, такі як бензин (бензин), дизельне паливо та гас до асфальту та хімічні реактиви, які використовуються для виготовлення пластмас, пестицидів та фармацевтичних препаратів. Нафта використовується для виробництва найрізноманітніших матеріалів, і за оцінками, у світі споживається близько 100 мільйонів барелів щодня. Видобуток нафти може бути надзвичайно прибутковим і мати важливе значення для економічного розвитку в 20-му столітті, коли деякі країни, так звані "нафтові

держави", набувають значної економічної та міжнародної могутності через контроль над видобутком нафти.

Видобуток нафти має значні негативні екологічні та соціальні наслідки. Найбільш важливо, що видобуток, переробка та спалювання нафтового палива вивільняють велику кількість парникових газів, тому нафта є одним із основних факторів, що сприяють зміні клімату. Крім того, частина нафтової промисловості активно пригнічувала науку та політику, спрямовану на запобігання кліматичній кризі. Інші негативні наслідки для навколишнього середовища включають екологічний вплив розвідки та експлуатації запасів нафти, таких як розливи нафти, а також забруднення повітря та води на місцях утилізації. Всі ці впливи на навколишнє середовище мають прямі наслідки для здоров'я людини. Крім того, нафта також стала джерелом конфліктів, що призводять як до воєн під керівництвом держави, так і до інших видів конфліктів (наприклад, доходи від нафти фінансують Ісламську державу Ірак та Левант). Очікується, що видобуток нафти досягне піку нафти до 2040 року, оскільки глобальна економіка зменшує залежність від нафти в рамках пом'якшення кліматичних змін та переходу до відновлюваної енергії та електрифікації. Очікується, що це матиме значний економічний вплив, який, на думку зацікавлених сторін, слід передбачити справедливим переходом та вирішенням проблемних активів нафтової промисловості.

### Склад нафти

Нафта включає не тільки сиру нафту, а й усі рідкі, газоподібні та тверді вуглеводні. За умов поверхневого тиску та температури легші вуглеводні метан, етан, пропан і бутан існують у вигляді газів, тоді як пентан та важчі вуглеводні - у вигляді рідин або твердих речовин. Однак у підземному нафтовому пласті пропорції газу, рідини та твердого тіла залежать від умов надр та від фазової діаграми нафтової суміші.

Нафтовими свердловинами видобувається переважно сира нафта з деякою кількістю природного газу, розчиненого в ній. Оскільки на поверхні тиск нижчий, ніж під землею, частина газу вийде з розчину і буде відновлена (або спалена) у вигляді попутного газу або розчину. Газова свердловина видобуває переважно природний газ. Однак, оскільки температура під землею вища, ніж на поверхні, газ може містити важчі вуглеводні, такі як пентан, гексан та гептан у газоподібному стані. При поверхневих умовах вони конденсуються з газу з утворенням «конденсату природного газу», часто скороченого до конденсату. Конденсат за зовнішнім виглядом нагадує бензин і за складом схожий на деякі летючі легкі нафти.

Частка легких вуглеводнів у нафтовій суміші сильно варіюється між різними нафтовими родовищами, починаючи від 97 відсотків за вагою у більш легких нафтах і закінчуючи лише 50 відсотками у важких нафтах та бітумах.

Вуглеводні в сирій нафті — це переважно алкани, циклоалкани та різні ароматичні вуглеводні, тоді як інші органічні сполуки містять азот, кисень та сірку та незначну кількість металів, таких як залізо, нікель, мідь та ванадій. Багато нафтових резервуарів містять живі бактерії. Точний молекулярний склад сирій нафти змінюється в широких межах від формації до формації, але частка хімічних елементів змінюється у досить вузьких межах таким чином:

## Розділ 0

### Склад нафти за вагою

Хімічні елементи	Діапазон відсотків елемента
Вуглець	від 83 до 85%
Водень	10-14%
Азот	0,1-2%
Кисень	від 0,05 до 1,5%
Сірка	від 0,05 до 6,0%
Метали	<0,1%

Сира нафта сильно змінюється за зовнішнім виглядом залежно від її складу. Зазвичай вона чорна або темно-коричнева (хоча може бути жовтувата, червонувата або навіть зеленувата). У резервуарі він зазвичай зустрічається у поєднанні з природним газом, який, будучи легшим, утворює "газову шапку" над нафтою, і солоня вода, яка, важча за більшість форм сирової нафти, зазвичай опускається під нею. Сиру нафту також можна знайти у напівтвердій формі, змішаній з піском та водою, як, наприклад, у нафтових пісках Атабаска в Канаді, де її зазвичай називають сирим бітумом. У Канаді бітум вважається клейкою чорною смолоподібною формою сирової нафти, яка настільки густа і важка, що її потрібно нагріти або розбавити, перш ніж вона потече. Венесуела також має велику кількість нафти в нафтових пісках Оріноко, хоча вуглеводні, що потрапили в них, є більш текучими, ніж у Канаді, і зазвичай їх називають надважкою нафтою. Ці ресурси нафтових пісків називаються нетрадиційними, щоб відрізнити їх від нафти, яку можна видобувати традиційними методами нафтових свердловин. Канада та Венесуела містять приблизно 3,6 трильйона барелів ( $570 \times 10^9 \text{ м}^3$ ) бітуму та надважкої нафти, що приблизно вдвічі перевищує світові запаси звичайної нафти.

Нафта використовується переважно для переробки на мазут та бензин — обох важливих джерел "первинної енергії". 84 відсотка за обсягом вуглеводнів, присутніх у нафті, перетворюються на паливо, багате енергією (паливо на основі нафти), включаючи бензин, дизельне паливо, реактивне опалення та інші мазути, та зріджений нафтовий газ. Найлегші сорти сирової нафти дають найкращі зразки цієї продукції, але оскільки світові запаси легкої та середньої нафти виснажуються, нафтопереробним заводам все частіше доводиться переробляти важку нафту та бітум та використовувати більш складні та дорогі методи виробництва продукції. Оскільки важкі нафти містять занадто багато вуглецю і не мають достатньої кількості водню, ці процеси зазвичай передбачають видалення вуглецю з молекул або додавання до них водню, а також використання текучого каталітичного крекінгу для перетворення довгих, більш складних молекул нафти в коротші, простіші в палива.

Завдяки високій густині енергії, легкому транспортуванню та відносній кількості, нафта стала найважливішим джерелом енергії у світі з середини 1950-х років. Нафта також є сировиною для багатьох хімічних продуктів, включаючи фармацевтичні препарати, розчинники, добрива, пестициди та пластмаси; 16 % яких не використовуються для виробництва енергії, а перетворюються на ці інші матеріали. Нафта міститься в пористих породах гірських порід у верхніх товщах деяких областей земної кори. Також є нафта в нафтових пісках (дьюгольові піски). Відомі запаси нафти зазвичай оцінюються приблизно в  $190 \text{ км}^3$  (1,2 трлн. барелів) без

## Викопне паливо

нафтових пісків, або 595 км<sup>3</sup> (3,74 трлн. Барелів) з нафтовими пісками. В даний час споживання нафти становить близько 84 мільйонів барелів ( $13,4 \times 10^6$  м<sup>3</sup>) на добу, або 4,9 км<sup>3</sup> на рік, що дає залишок нафти лише близько 120 років, якщо поточний попит залишається статичним. Останні дослідження, однак, припускають, що ця цифра становить близько 50 років.

### Транспортування нафти

Нафта і нафтопродукти транспортуються залізничними вагонами, вантажівками, цистернами та трубопровідними мережами. Спосіб переміщення нафтопродуктів залежить від об'єму переміщення та його призначення. Найбільші проблеми з переміщенням нафтопродуктів — це забруднення та ймовірність пролиття. Нафта дуже важко піддається очищенню і дуже токсична для живих тварин та їх оточення.

### Методи транспортування нафти

**Морські судна.** Морські судна та баржі можуть перевозити цю нафту по всьому світу. Оскільки ці судна можуть перевозити багато палива, сума, яку він витрачає за барель на переміщення цієї нафти, дуже дешева. Ці танкери також є єдиним практичним способом переміщення сирої нафти через Світовий океан.



*Заправка нафтових танкерів на нафтовому терміналі Аль-Баїрах в Іраку*

Зазвичай більші танкери використовуються для транспортування цього палива у глобальному масштабі, переносячи паливо з одного континенту на інший. Баржі більше схожі на танкісти, але менших розмірів і не мають жодного способу руху, щоб їх перемістити. Їх часто штовхають або буксирують буксирами. Це робить баржі дуже неефективними для транспортування цієї нафти на великі відстані. Баржі

також не застосовуються для подорожей по бурхливому морю, тому їх використовують у більш спокійних водах. Однак ці баржі зазвичай використовуються для транспортування палива на короткі відстані.

**Трубопроводи.** Трубопроводи, що використовуються для транспортування нафти від свердловин до нафтопереробних заводів і сховищ, вважаються найбільш економічно ефективним способом транспортування нафти на суші.



*Транс-алаяська трубопровідна система прорізає пустелю Аляски. Спеціальні опори теплообмінника захищають вічну мерзлоту від танення*

Спочатку нафта збирається у гирлі свердловини або на деякій ділянці, де нафта зберігається. З гирла свердловини вона перекачується по землі через трубу і скидається в пункт призначення, який зазвичай є нафтопереробним заводом (НПЗ). Однак трубопроводи можна використовувати таким же чином, щоб доставляти вже очищене паливо, таке як бензин, дизельне та навіть реактивне паливо з НПЗ до підприємств розподілу або споживача. Ці трубопроводи є не просто суцільною лінією прямої труби, а мають різні компоненти на трубопроводі. Ці трубопроводи мають насоси-підсилювачі для утримання палива на великій відстані, оглядові зони, щоб переконатися, що у паливо не потрапляє забруднювачів, і навіть інші пункти збору та доставки по дорозі. Хоча встановлення цих трубопроводів коштує чималих грошей і часу, експлуатаційні витрати значно менші, ніж використання будь-якого іншого виду транспорту. Кількість робочої сили, необхідної для переміщення цієї нафти, також не така вже й велика. Трубопроводи пропонують найбільш ефективний спосіб транспортування цієї нафти по суші. Незважаючи на те, що ці труби надзвичайно економічно ефективні, є деякі обставини, коли це не відповідає дійсності, і логічніше використовувати інший метод. Прикладом цього є

те, що дешевше і логічніше використовувати судно для переміщення нафти через Атлантичний океан, ніж трубопровід.

**Залізничні вагони.** Залізничні цистерни — це ще один спосіб переміщення сирової нафти по суші. Нафта завантажується в вагони-цистерни і переміщується дизель-поїздом по рейкам до нафтопереробного заводу або запланованого призначення поїзда.



*Вагони -цистерни з маркуванням UN номер 1267 - Сира нафта, перетинають Альтуну, штат Пенсільванія, на нафтопереробний завод*

Поїзди можуть перевозити величезну кількість цієї нафти за допомогою кількох вагонів-цистерн. Хоча кожен залізничний вагон містить набагато менше нафти, ніж велике морське танкерне судно, при багаторазовому використанні багато нафти можна транспортувати. Наприклад, вагон-цистерна DOT-111 є дуже поширеним вагоном-цистерною і може вмістити 131 кубічний метр (820 барелів; 35000 галлонів США). Якби було витягнуто десять вагонів-цистерн, поїзд міг би перевозити 1310 кубометрів нафти, тому обсяг швидко зростає. Локомотив, який використовується для тяги цих вагонів, має величезну кількість кінських сил і може бути підключений до інших локомотивів для збільшення потужності, що робить залізничний вагон досить економічно ефективним способом переміщення цієї нафти. Ці залізничні вагони, як і трубопроводи, можуть використовуватися для транспортування рафінованого палива замість сирової нафти з НПЗ до розподільчого заводу. Залізничні вагони - це поширений спосіб переміщення цього палива на велику відстань до районів, де вони не мають прокладених трубопроводів.

**Порівняння переваг і недоліків трубопроводів і залізничних вагонів-цистерн.** Громадські дебати навколо компромісів між трубопровідними та залізничними перевезеннями розвиваються протягом останнього десятиліття, оскільки кількість сирової нафти, що перевозиться залізницею, зростає. Дискусія активізувалася у 2013 році після смертельної катастрофи Лак-Мегантік у Квебеку, коли вантажний потяг зійшов з рейок і розлив 5,56 мільйонів

## Розділ 0

літрів сирої нафти, що призвело до вибухів та пожеж, які зруйнували більшу частину ядра міста. Того ж року поїзд перевозив пропан і нафту зійшов з рейок поблизу Гейнфорда, провінція Альберта, що призвело до двох вибухів, але без травм та смертей. Ці аварії на залізниці, серед інших прикладів, викликали занепокоєння, що регулювання залізничного транспорту є неадекватним для масштабних відвантажень сирої нафти. Також відбуваються збої в трубопроводах, наприклад, у 2015 р. трубопровід Nexen прорвався і витекло 5 млн. літрів сирої нафти приблизно на 16 000 м<sup>2</sup> на підприємстві компанії Long Lake Oilsands на південь від Форт -Мак -Мері. Незважаючи на те, що як трубопровідний, так і залізничний транспорт, як правило, досить безпечні, жоден із видів транспорту не є без ризику. Численні дослідження, однак, показують, що трубопроводи є більш безпечними, виходячи з кількості подій (аварій та інцидентів), зважених проти кількості транспортованої продукції. Між 2004 і 2015 роками ймовірність залізничних аварій у Канаді була в 2,6 рази більшою, ніж для трубопроводів на перевезений обсяг нафтових еквівалентів. Продукти природного газу в 4,8 рази частіше траплялися на залізничному транспорті порівняно з аналогічними товарами, що перевозяться трубопроводами. Критики ставлять під сумнів, чи є ймовірність, що трубопроводи, що перевозять розведений бітум з нафтових пісків Альберти, піддадуться корозії та спричинять інциденти, але дані свідчать про те, що ризик корозії нічим не відрізняється від ризику інших видів сирої нафти.

**Автоцистерни.** Автоцистерни використовуються більше як залізничні вагони, але зазвичай вони перевозять очищене паливо на автозаправну станцію (АЗС).



*Подвійний автоцистерна в Австралії*



Вантажівки зазвичай використовуються для перевезення нафти менших потужностей на короткі відстані. Як і залізничні вагони, ці вантажівки можуть перевозити кілька різних форм цієї нафти, включаючи нафту у формі сирої нафти від нафтових родовищ до нафтопереробних заводів, коли немає інших засобів транспорту, таких як трубопровід чи залізниця. Однак ці вантажівки часто доставляють це паливо на АЗС або доставляють паливо безпосередньо до споживача. Вони також використовуються в ситуаціях, коли було б нелогічно використовувати залізничні вагони, трубопроводи та судна-цистерни. Оскільки АЗС не вимагають великої кількості палива і, як правило, практично не можуть бути підключені до залізниць, вантажівки дають змогу раціонально та економічно ефективно витратити паливо споживачам. Загальні розміри їх резервуарів коливаються від 1,5 до 28,4 кубічних метрів (від 400 до 7500 галонів США).

### Нафтова промисловість

Нафтова промисловість включає глобальні процеси розвідки, видобутку, переробки, транспортування (часто нафтовими танкерами та трубопроводами) та збуту нафтопродуктів. Найбільші за обсягом продукти промисловості — мазут та бензин (бензин). Нафта також є сировиною для багатьох хімічних продуктів, включаючи фармацевтичні препарати, розчинники, добрива, пестициди, синтетичні ароматизатори та пластмаси. Надзвичайна грошова вартість нафти та її продуктів призвела до того, що вона стала відома як "чорне золото". Галузь зазвичай поділяється на три основні складові: висхідну, середню та нижню. У висхідному напрямку щодо розвідки та видобутку сирої нафти середній потік охоплює транспортування та зберігання сирої нафти, а у нижній течії - переробку сирої нафти в різні кінцеві продукти.

Нафта є життєво важливою для багатьох галузей промисловості та необхідна для підтримки індустріальної цивілізації в її нинішній конфігурації, що робить її надзвичайно важливою для багатьох країн. Нафта становить значний відсоток світового споживання енергії, починаючи від мінімуму в 32% для Європи та Азії та до 53% для Близького Сходу.

Інші моделі споживання інших географічних регіонів такі: Південна та Центральна Америка (44%), Африка (41%) та Північна Америка (40%). Світ споживає 36 мільярдів барелів (5,8 км<sup>3</sup>) нафти на рік [1], найбільшими споживачами є розвинені країни. Сполучені Штати спожили 18% нафти, виробленої в 2015 році [2]. Виробництво, розповсюдження, переробка та роздрібна торгівля нафтою в цілому представляє найбільшу промисловість світу за вартістю долара.

Такі уряди, як уряд Сполучених Штатів, надають великі державні субсидії нафтовим компаніям із значними податковими пільгами практично на кожному етапі розвідки та видобутку нафти, включаючи витрати на оренду нафтових родовищ та бурове обладнання [3].

В останні роки вдосконалені методи видобутку нафти-особливо багатоступінчасте буріння та гідророзрив пласта ("фракінг")-вийшли на передові позиції галузі, оскільки ця нова технологія відіграє вирішальну та суперечливу роль у нових методах видобутку нафти. [ 4]

### Пік видобутку нафти

Пік видобутку нафти, в строгому сенсі, описує момент, коли видобуток нафти досягає значення більшого, ніж у будь-який час у минулому чи майбутньому. У більш широкому сенсі цей термін описує уявлення про те, що такий момент буде досягнутий у недалекому майбутньому, після якого видобуток нафти впаде в тимчасовий спад. Це пов'язано з окремою концепцією виснаження нафти; хоча світові запаси нафти є кінцевими, обмежуючим фактором є не те, чи існує нафта, а чи можна її видобувати економічно за певної ціни. Довгострокове зниження видобутку нафти може бути спричинене як вичерпанням доступних запасів, так і скороченням попиту, що знижує ціну відносно вартості видобутку, що може бути викликано скороченням викидів вуглецю.

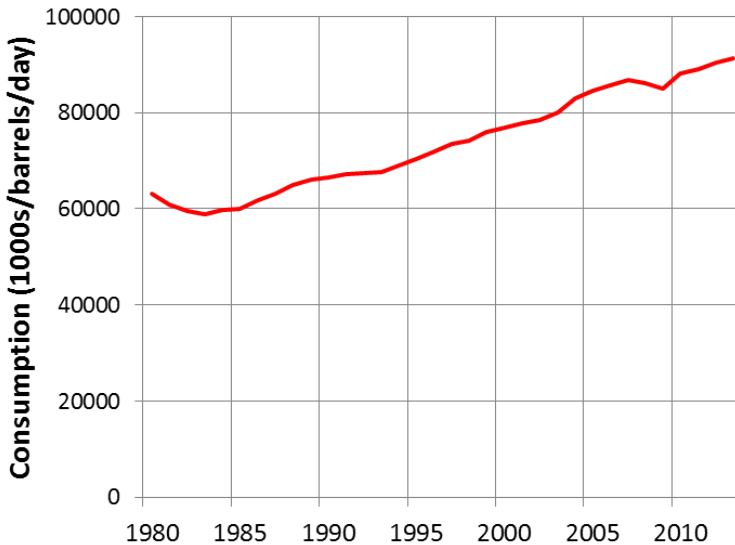
Протягом минулого століття були зроблені численні прогнози щодо термінів піку нафти, перш ніж вони були сфальсифіковані подальшим зростанням швидкості видобутку нафти. М. Кінг Хабберт часто приписується введенням цього поняття у роботі 1956 р., де представлена формальна теорія та передбачається, що видобуток США досягне свого піку між 1965 і 1971 рр. Первісні прогнози Хабберта щодо світового піку видобутку нафти виявилися передчасними, а станом на 2021 рік - прогнози року найвищого діапазону нафти з 2019 по 2040 рік. Ці прогнози залежать від майбутніх економічних тенденцій, технологічного розвитку та зусиль суспільств та урядів щодо пом'якшення зміни клімату.

Прогнози майбутнього видобутку нафти, зроблені в 2007 та 2009 роках, свідчили або про те, що пік вже настав, що видобуток нафти був на порозі піку, або що це відбудеться незабаром. Через десятиліття світовий видобуток нафти виріс і досяг нового максимуму у 2018 році, оскільки розвиток технологій видобутку дозволив розширити виробництво нафти в США.

### Попит на нафту

Сторона попиту піку нафти з плином часу стосується загальної кількості нафти, яку світовий ринок вирішив би споживати за будь-якої ринкової ціни. Гіпотеза про те, що пік нафти буде обумовлений скороченням доступності легкодобувної нафти, означає, що ціни з часом зростатимуть, щоб відповідати попиту зі зменшенням пропозиції. Навпаки, розвиток подій з 2010 року породив ідею пікової нафти, що визначається попитом. Основна ідея полягає в тому, що у відповідь на технологічні досягнення та тиск на скорочення викидів вуглекислого газу попит на нафту за будь-якої ціни знизиться. У цьому контексті розвиток електромобілів створює можливість того, що з плином часу важливість первинного використання нафти, транспортування, зменшиться.

## Викопне паливо



*Глобальне споживання нафти 1980–2013 рр*

Попит на енергію розподілений між чотирма широкими секторами: транспортом, житловим, комерційним та промисловим [45] [46]. З точки зору споживання нафти, транспорт - це найбільший сектор і той, де спостерігався найбільший попит за останні десятиліття. Це зростання значною мірою відбулося внаслідок нового попиту на транспортні засоби особистого користування, що працюють на двигунах внутрішнього згоряння. [47] Цей сектор також має найвищі показники споживання, на які припадає приблизно 71% нафти, що використовується у Сполучених Штатах у 2013 році [48]. та 55% споживання нафти у всьому світі, як зафіксовано у звіті Гірша. Тому транспорт особливо цікавить тих, хто прагне пом'якшити вплив пікової нафти.

Хоча зростання попиту є найвищим у країнах, що розвиваються [49], США є найбільшим у світі споживачем нафти. Між 1995 і 2005 роками споживання США зросло з 17 700 000 барелів на добу (2 810 000 м<sup>3</sup>/добу) до 20 700 000 барелів на день (3 290 000 м<sup>3</sup>/д), що на 3 000 000 барелів на добу (480 000 м<sup>3</sup>/д). Для порівняння, Китай збільшив споживання з 3 400 000 барелів на добу (540 000 м<sup>3</sup>/добу) до 7 000 000 барелів на день (1 100 000 м<sup>3</sup>/добу), збільшившись на 3 600 000 барелів на день (570 000 м<sup>3</sup>/д) за той самий період часу. [50] Адміністрація енергетичної інформації (ОВНС) заявила, що споживання бензину в Сполучених Штатах, можливо, досягло свого піку в 2007 році, частково через зростання інтересу та мандатів на використання біопалива та енергоефективності. [51] [52]

У міру розвитку країн промисловість та підвищення рівня життя збільшують споживання енергії, а використання нафти є важливою складовою. Процвітаючі економіки, такі як Китай та Індія, швидко стають великими споживачами нафти. [53] Наприклад, у 2015 році Китай випередив США як найбільший у світі імпортер

сирої нафти [54]. Очікується, що зростання споживання нафти продовжиться; однак, не за попередніми темпами, оскільки прогнозується, що економічне зростання Китаю зменшиться у порівнянні з високими темпами на початку XXI століття [55]. Очікується, що імпорт нафти Індії збільшиться більш ніж утричі порівняно з рівнем 2005 року до 2020 року, збільшившись до 5 мільйонів барелів на день ( $790 \times 103$  м<sup>3</sup>/добу) [56].

### Важливість викопного палива



*Нафтохімічний завод у Грейнджемуті, Шотландія, Великобританія*

Викопне паливо має велике значення, оскільки воно може спалюватися (окислюватися до вуглекислого газу та води), виробляючи значну кількість енергії на одиницю маси. Використання вугілля як палива передувало записаній історії. Вугілля використовувалося для запуску печей для виплавки металевих руд. Хоча напівтверді вуглеводні з просочувань також спалювалися у давнину, їх переважно використовували для гідроізоляції та бальзамування.

Комерційна експлуатація нафти почалася в 19 столітті, переважно для заміни олій з тваринних джерел (зокрема, китової) для використання в масляних лампах.

Природний газ, який колись спалювався як непотрібний побічний продукт виробництва нафти, сьогодні вважається дуже цінним ресурсом. Родовища природного газу також є основним джерелом гелію.

Важка сира нафта, яка є набагато більш в'язкою, ніж звичайна нафта, і нафтові піски, де бітум виявляється змішаним з піском і глиною, почали набувати все більшого значення як джерела викопного палива на початку 2000-х років. Горючі

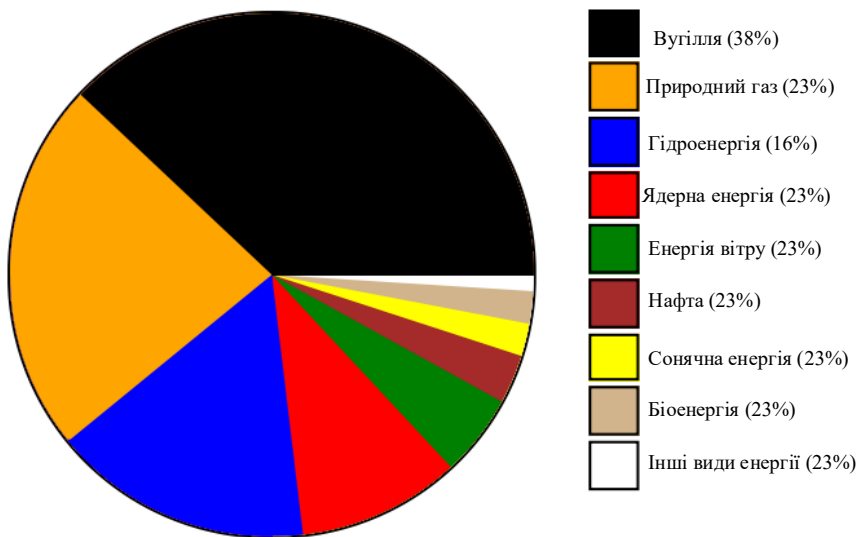
## Викопне паливо

сланці та подібні матеріали — це осадові породи, що містять кероген, складну суміш високомолекулярних органічних сполук, які при нагріванні (піролізі) дають синтетичну сиру нафту. Завдяки додатковій обробці їх можна використовувати замість інших відомих викопних видів палива. Зовсім недавно було деінвестування від використання таких ресурсів через їх високу вартість вуглецю щодо більш легко переробних запасів.

До другої половини 18 століття вітряки та водяні млини забезпечували енергією, необхідною для таких робіт, як подрібнення борошна, розпилування деревини або перекачування води, тоді як спалювання дров чи торфу забезпечувало тепло для побуту. Широкомасштабне використання викопного палива, спочатку вугілля, а згодом нафти, в парових машинах спричинило промислову революцію. У той же час широко розповсюджувалися газові вогні з використанням природного газу або вугільного газу. Винахід двигуна внутрішнього згоряння та його використання в автомобілях та вантажних автомобілях значно збільшило попит на бензин та дизельне паливо, обидва виготовлені з викопного палива. Інші види транспорту, залізничні та авіаційні, також потребують викопного палива. Інше основне використання викопного палива — виробництво електроенергії та сировина для нафтохімічної промисловості. Дьоготь, що залишився при видобутку нафти, використовується при будівництві доріг.

### Електростанції на викопному паливі

Електростанція на викопному паливі — це теплова електростанція, яка спалює викопне паливо, таке як вугілля або природний газ, для виробництва електроенергії.



*Світове виробництво електроенергії за різними джерелами у 2018 р. Загальна генерація складала  $26,7 \cdot 10^{12}$  кВт-год.*

Електростанції на викопному паливі мають механізми для перетворення теплової енергії горіння в механічну, яка потім керує електричним генератором. Основним двигуном може бути парова турбіна, газова турбіна або, на невеликих заводах, поршневі газові двигуни. Усі електростанції використовують енергію, що видобувається з газу, що розширюється, або пару, або гази згоряння. Хоча існують різні методи перетворення енергії, усі методи перетворення теплових електростанцій мають ефективність, обмежену ефективністю Карно, і тому виробляють відхід теплоти.

Електростанції на викопному паливі забезпечують більшу частину електричної енергії, що використовується у світі. Деякі електростанції, що працюють на викопних копалинах, призначені для безперервної роботи як електростанції з базовим навантаженням, тоді як інші використовуються як електростанції. Однак, починаючи з 2010-х років, у багатьох країнах електростанції, призначені для постачання базового навантаження, експлуатуються як генерація, що відправляється, щоб збалансувати зростання генерації за рахунок змінної поновлюваної енергії.

Побічні продукти експлуатації електростанцій на викопному паливі повинні враховуватися при їх проектуванні та роботі. Димові гази від спалювання викопного палива містять вуглекислий газ і водяну пару, а також такі забруднюючі речовини, як оксиди азоту (NO<sub>x</sub>), оксиди сірки (SO<sub>x</sub>), а для вугільних установок — ртуть, сліди інших металів та частки золи. Зазвичай весь вуглекислий газ та деякі інші забруднення викидаються в повітря. Потрібно також видалити тверду золу з котлів на вугіллі.

Електростанції, що працюють на викопному паливі, є основними викидами вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), парникового газу, який є основним фактором глобального потепління. Результати нещодавнього дослідження показують, що чистий прибуток, доступний для акціонерів великих компаній, міг би спричинити значне зменшення відповідальності за викиди парникових газів, пов'язані лише з природними катаклізмами у Сполучених Штатах від однієї електростанції на вугіллі. Однак станом на 2015 рік жоден із таких випадків не присудив збитків у Сполучених Штатах. На одиницю електричної енергії буре вугілля викидає майже вдвічі більше CO<sub>2</sub>, ніж природний газ, а чорне вугілля виділяє дещо менше, ніж буре. Станом на 2019 рік уловлювання та зберігання викидів вуглецю не є економічно вигідним для електростанцій з викопним паливом. Станом на 2019 рік збереження глобального потепління нижче 1,5 °C все ще можливе, але тільки за умови, що більше не будуть побудовані електростанції з викопним паливом і деякі існуючі електростанції з викопним паливом будуть закриті завчасно, разом з іншими заходами, такими як відновлення лісів.

### **Перетворення теплової енергії у електричну**

На електростанції з викопного палива хімічна енергія, що зберігається у викопному паливі, такому як вугілля, мазут, природний газ або горючі сланці та кисень повітря, послідовно перетворюється на теплову, механічну та, нарешті, електричну енергію. Кожна електростанція на викопному паливі — це складна система, розроблена на замовлення. Для більш ефективного використання землі, природних ресурсів та робочої сили на одному місці можуть бути побудовані декілька

генеруючих агрегатів. Більшість теплових електростанцій у світі використовують викопне паливо, чисельність яких перевищує ядерні, геотермальні, на біомасі або концентровані сонячні електростанції.

Другий закон термодинаміки стверджує, що будь-який замкнений цикл може перетворити лише частину тепла, виробленого під час горіння, на механічну роботу. Залишок тепла, який називається відходом тепла, повинен викидатись у більш прохолодне середовище під час зворотної частини циклу. Частка тепла, що виділяється в охолоджуюче середовище, повинна бути рівною або більшою, ніж співвідношення абсолютних температур системи охолодження (навколишнє середовище) та джерела тепла (печі горіння). Підвищення температури печі підвищує ефективність, але ускладнює конструкцію, насамперед шляхом вибору сплавів, що використовуються для будівництва, що робить піч дорожчою. Відпрацьоване тепло не може бути перетворене в механічну енергію без ще більш холодної системи охолодження. Однак він може бути використаний на когенераційних установках для опалення будівель, виробництва гарячої води або для нагрівання матеріалів у промислових масштабах, наприклад, на деяких нафтопереробних заводах, заводах та на підприємствах хімічного синтезу.

Типовий коефіцієнт теплової ефективності для електричних генераторів загального користування становить близько 37% для вугільних та нафтових електростанцій та 56-60% (LEV) для газових установок з комбінованим циклом. Заводи, призначені для досягнення максимальної ефективності при роботі на потужності, будуть менш ефективними при роботі поза проектом (тобто занадто низькі температури.)

Практичні станції з викопним паливом, що працюють як теплові двигуни, не можуть перевищувати межі циклу Карно для перетворення теплової енергії на корисну роботу. Паливні елементи не мають таких самих термодинамічних меж, як вони не є тепловими двигунами.

Ефективність установки з викопного палива може бути виражена у вигляді її теплової швидкості, вираженої у ВТУ/кіловат -час або мегаджоулі/кіловат -годину.

### Типи електростанцій на викопному паливі

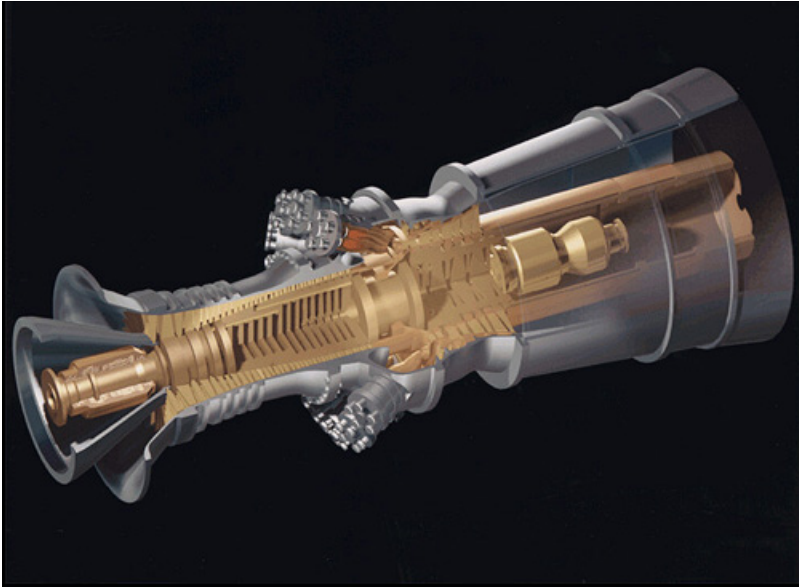
**Паротурбінні електростанції.** На паротурбінній електростанції паливо спалюється в печі, а гарячі гази течуть через котел. У котлі вода перетворюється на пару; можуть бути включені додаткові ступені нагрівання для перегріву пари. Гаряча пара надходить через регулюючі клапани до турбіни. У міру розширення і охолодження пари його енергія передається лопатям турбіни, які обертають генератор. Відпрацьована пара має дуже низький тиск та вміст енергії; ця водяна пара подається через конденсатор, який відводить тепло від пари. Потім конденсат закачується в котел, щоб повторити цикл.

Викиди з котла включають вуглекислий газ, оксиди сірки, а у випадку вугільної летючої золи — негорючі речовини палива. Відпрацьоване тепло з конденсатора передається або в повітря, або іноді в ставок-охолоджувач, озеро або річку.

**Газова електростанція.** Один тип електростанції на викопному паливі використовує газову турбіну спільно з парогенератором з рекуперацією тепла (HRSG). Його називають електростанцією з комбінованим циклом, оскільки він

## Розділ 0

поєднує цикл Брейтона газової турбіни з циклом Ранкіна HRSG. Турбіни заправляються природним газом або мазутом.



*Газова турбіна генератора електроенергії GE серії 480 мегават*





*Електростанція Currant Creek поблизу Мона, штат Юта, - це електростанція на природному газі.*

**Електростанції на поршневих двигунах.** Генераторні установки на дизельних двигунах часто використовуються для забезпечення первинної потужності в громадах, не підключених до поширеної електромережі. Аварійні (резервні) системи живлення можуть використовувати поршневі двигуни внутрішнього згоряння, що працюють на мазуті або природному газі. Генератори в режимі очікування можуть служити в якості аварійного джерела живлення для заводу чи центру обробки даних, а також можуть працювати паралельно з місцевою комунальною системою для зменшення пікових витрат електроенергії від комунального підприємства. Дизельні двигуни можуть виробляти сильний крутний момент при відносно низьких частотах обертання, що, як правило, бажано під час керування генератором генератора, але дизельне паливо при тривалому зберіганні може бути предметом проблем, що виникають внаслідок накопичення води та хімічного розкладання. Рідко використовувані генераторні установки можуть бути відповідно встановлені як природний газ або скраплений газ для мінімізації вимог до обслуговування паливної системи.

Двигуни внутрішнього згоряння з іскровим запалюванням, що працюють на бензині (бензині), пропані або скрапленому газі, зазвичай використовуються як переносні тимчасові джерела живлення для будівельних робіт, аварійного живлення або для відпочинку.

Поршневі двигуни зовнішнього згоряння, такі як двигун Стірлінга, можуть працювати на різних видах викопного палива, а також на відновлюваному паливі або промисловому відході тепла. Установки двигунів Стірлінга для виробництва електроенергії відносно рідкісні.

Історично перші центральні станції використовували поршневі парові двигуни для приводу генераторів. Зі збільшенням розміру електричного навантаження, яке обслуговуватиметься, поршневі установки ставали занадто великими та громіздкими для економічного встановлення. Парова турбіна швидко витіснила всі поршневі двигуни в обслуговуванні центральній станції.

**Запаси викопного палива**

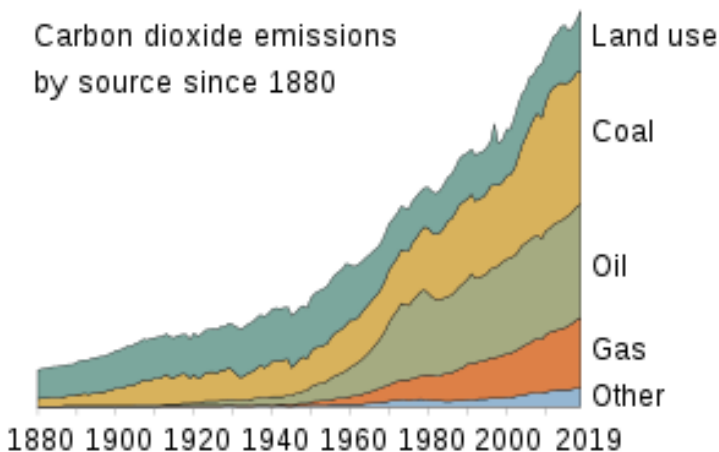


*Нафтова свердловина в Мексиканській затоці*

Рівні первинних джерел енергії - це запаси в землі. Потoki - це виробництво викопного палива з цих запасів. Найважливіші первинні джерела енергії — це викопні джерела енергії на основі вуглецю.

**Вплив навколишнього середовища**

Використання викопного палива було центральним у промисловій революції. За останні кілька століть викопне паливо допомогло досягти значних покращень рівня життя по всій планеті.



*Глобальний вуглецевий проект показує, як доповнення до CO<sub>2</sub> з 1880 р. Викликані різними джерелами, що нарастають один за одним.*

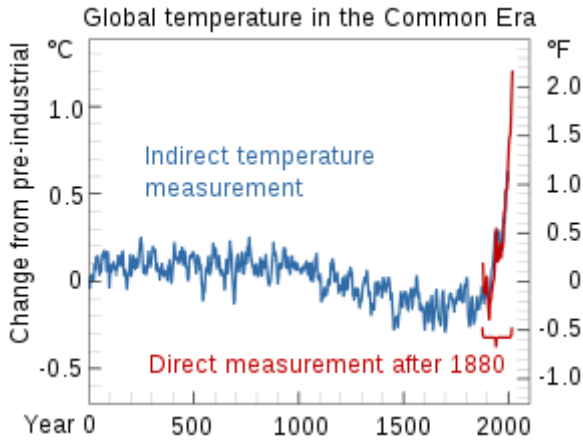
Тим не менш, спалювання викопного палива має ряд негативних зовнішніх ефектів — шкідливий вплив на навколишнє середовище, де наслідки виходять за межі людей, які використовують паливо. Фактичні наслідки залежать від палива, про яке йдеться. Усі викопні види палива виділяють CO<sub>2</sub>, коли вони горять, тим самим прискорюючи зміну клімату. Спалювання вугілля, а також меншою мірою нафта та її похідні, сприяють утворення твердих частинок атмосфери, смогу та кислотних дощів.

Зміна клімату значною мірою обумовлена викидом парникових газів, таких як CO<sub>2</sub>, а спалювання викопного палива є основним джерелом цих викидів. Хоча зміна клімату може мати позитивні наслідки в деяких частинах світу, в інших частинах це вже негативно впливає на екосистеми. Це включає сприяння вимирання видів та зменшення здатності людей виробляти їжу, тим самим додаючи проблему голоду. Постійне підвищення глобальної температури призведе до подальших негативних наслідків як для екосистем, так і для людей, оскільки Всесвітня організація охорони здоров'я заявила, що зміна клімату є найбільшою загрозою для здоров'я людей у 21 столітті.

При спалюванні викопного палива утворюються сірчана та азотна кислоти, які потрапляють на Землю під час кислотних дощів, впливаючи як на природні території, так і на навколишнє середовище. Пам'ятники та скульптури з мармуру та вапняку особливо вразливі, оскільки кислоти розчиняють карбонат кальцію.

Викопне паливо також містить радіоактивні матеріали, переважно уран і торій, які викидаються в атмосферу. У 2000 році близько 12 000 тонн торію та 5 000 тонн урану було вивільнено у всьому світі від спалювання вугілля [34]. За оцінками, протягом 1982 р. Спалювання вугілля в США викинуло в атмосферу в 155 разів більше радіоактивності, ніж аварія на Трі -Майл -Айленді [35].

## Розділ 0



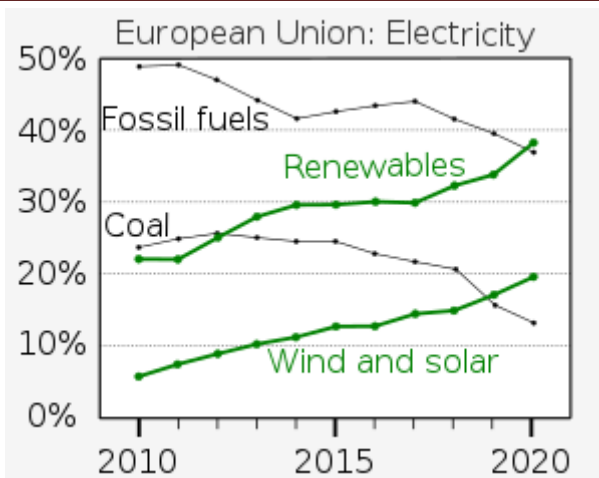
Реконструкція глобальної температури поверхні за останні 2000 років з використанням даних проксі з кілець дерев, коралів та ядер льоду синього кольору. Дані безпосередньо спостережень мають червоний колір, усі дані показують 5-річну ковзаючу середню.

При спалюванні вугілля також утворюється велика кількість донної золи та золи. Ці матеріали використовуються в самих різних сферах застосування, використовуючи, наприклад, близько 40% виробництва США [36].

Окрім наслідків спалювання, збирання, переробка та розповсюдження викопного палива також мають вплив на довкілля. Методи видобутку вугілля, особливо видалення вершин та видобуток смуг, мають негативний вплив на навколишнє середовище, а буріння нафти на морі становить небезпеку для водних організмів. Свердловини викопного палива можуть сприяти викиду метану за рахунок викидів викидних газів. Нафтопереробні заводи також мають негативний вплив на навколишнє середовище, включаючи забруднення повітря та води. Транспортування вугілля вимагає використання локомотивів з дизельним двигуном [чому?], Тоді як сиру нафту зазвичай транспортують суднами-цистернами, що вимагає спалювання додаткового викопного палива.

Щоб протидіяти негативному впливу викопного палива, докладено чимало зусиль для його пом'якшення. Це включає рух до використання альтернативних джерел енергії, таких як відновлювана енергія. Екологічне регулювання використовує різноманітні підходи для обмеження цих викидів; наприклад, правила проти викиду в атмосферу відходів, таких як зола. Інші зусилля включають економічні стимули, такі як збільшення податків на викопне паливо та субсидії на альтернативні технології енергетики, такі як сонячні панелі. [26]

У грудні 2020 року Організація Об'єднаних Націй опублікувала звіт, в якому говориться, що, незважаючи на необхідність скорочення викидів парникових газів, різні уряди «подвоюють» [розмову] щодо викопного палива, в деяких випадках відволікаючи понад 50% свого фінансування стимулювання відновлення COVID-19 на виробництво викопного палива, а не альтернативна енергія.



У 2020 році відновлювані джерела енергії вперше випередили викопне паливо як основне джерело електроенергії Європейського Союзу [29].

Генеральний секретар ООН Антоніу Гутерріш заявив, що "Людство веде війну з природою. Це суїцид. Природа завжди завдає удару у відповідь - і вона вже робить це із зростанням сили та люті". Однак Гутерріш також сказав, що все ще є підстави для надії, передбачаючи план Джо Байдена щодо приєднання США до інших великих викидів, таких як Китай та ЄС, у прийнятті цілей щодо досягнення чистого нульового рівня викидів до 2050 року [37] [38] [39].

### Хвороби та смерті, спричинені викопним паливом

Забруднення навколишнього середовища викопним паливом впливає на людину, оскільки тверді частинки та інше забруднення повітря від спалювання викопного палива спричиняють хвороби та смерть при вдиханні. Ці наслідки для здоров'я включають передчасну смерть, гостру респіраторну хворобу, загострення астми, хронічний бронхіт та зниження функції легенів. Більш схильні до ризику бідні, голодні, дуже молоді та дуже старі люди, а також люди з наявними захворюваннями дихальних шляхів та іншими захворюваннями. Загальна кількість смертей від забруднення повітря у світі досягає 7 мільйонів щорічно.

Хоча всі джерела енергії за своєю суттю мають несприятливі наслідки, дані показують, що викопне паливо спричиняє найвищі рівні викидів парникових газів і є найнебезпечнішим для здоров'я людини. На відміну від цього, сучасні відновлювані джерела енергії виглядають безпечнішими для здоров'я людини та чистішими. Коефіцієнт смертності від аварій та забруднення повітря в ЄС становить наступний за терават-годину: вугілля (24,6 смертей), нафта (18,4 смертей), природний газ (2,8 смертей), біомаса (4,6 смертей), гідроенергетика (0,02 смертей), ядерна енергія (0,07 смертей), вітрова енергія (0,04 смертей) та сонячна енергія (0,02 смертей). Викиди парникових газів від кожного джерела енергії вимірюються в тонах: вугілля (820 тон), нафту (720 тон), природний газ (490 тон), біомаса (78-230 тон),

гідроенергетика (34 тони), ядерна енергія (3 тони), вітру (4 тони) та сонячної енергії (5 тон).

Як показують дані, вугілля, нафта, природний газ та біомаса спричиняють вищі смертності та викиди парникових газів, ніж гідроенергетика, ядерна енергія, вітер та сонячна енергія. Вчені припускають, що 1,8 мільйона життів були врятовані шляхом заміни джерел викопного палива ядерною енергією.

### Поступове припинення використання викопного палива

Поступове припинення використання викопного палива — це поступове скорочення використання викопного палива до нуля. Це частина поточного переходу на відновлювану енергію. Поточні зусилля щодо відмови від викопного палива передбачають заміну викопного палива стабільними джерелами енергії в таких секторах, як транспорт та теплопостачання. Альтернативи викопному паливу включають електрифікацію, зелений водень та авіаційне біопаливо.

Хоча нафта і природний газ також поступово припиняються у хімічних процесах (тобто виробництві нових будівельних блоків для пластмас ...), оскільки кругова економіка та економіка на біологічній основі (тобто біопластик, ...) розвиваються для зменшити забруднення пластиком, це не вважається частиною відмови від викопного палива, оскільки в цих випадках нафта і газ не використовуються як паливо.

### Вугілля



*Електростанції, що працюють на вугіллі, забезпечували 30% споживаної електроенергії в США у 2016 році [4]. Це Замок Ворота Замку поблизу Хелпер, штат Юта.*

Пік споживання вугілля досяг у 2013 році, але для досягнення мети Паризької угоди щодо утримання глобального потепління значно нижче  $2^{\circ}\text{C}$  ( $3,6^{\circ}\text{F}$ ) споживання вугілля необхідно скоротити вдвічі з 2020 до 2030 року. Однак станом на 2017 рік вугілля постачало більше чверті світової первинної енергії та близько 40% викидів парникових газів від викопного палива. Поступове припинення використання вугілля має короткострокові переваги для здоров'я та навколишнього середовища, які перевищують витрати, і без цього неможливо досягти цілі  $2^{\circ}\text{C}$  Паризької угоди, але деякі країни все ще віддають перевагу вугіллю, і там є багато розбіжностей щодо того, як швидко його слід припинити.

Станом на 2018 рік 30 країн та багато субнаціональних урядів та підприємств стали членами Альянсу з вугілля «Потужна енергія минулого», кожна з яких зробила декларацію щодо просування переходу від зменшення виробництва вугілля.

## Викопне паливо

Проте станом на 2019 рік країни, які використовують найбільше вугілля, не приєдналися, а деякі країни продовжують будувати та фінансувати нові електростанції на вугіллі. Справедливий перехід від вугілля підтримується Європейським банком реконструкції та розвитку.

У 2019 році Генеральний секретар ООН заявив, що країни повинні припинити будівництво нових вугільних електростанцій з 2020 року або зіткнутися з «тотальною катастрофою».

У 2020 році, хоча Китай побудував деякі електростанції, у всьому світі більше енергії вугілля було припинено, ніж побудовано: Генеральний секретар ООН заявив, що країни ОЕСР повинні припинити виробництво електроенергії з вугілля до 2030 року, а решта світу — до 2040 року.

### Нафта



*Розлив нафти Deepwater Horizon 2010 року скидає 4,9 млн барелів (780 000 м<sup>3</sup>)*

Нафта переробляється на мазут, дизельне паливо та бензин. Продукти переробки призначені переважно для транспортування звичайними автомобілями, вантажівками, поїздами, літаками та кораблями. Популярними альтернативами є транспорт на людях, громадський транспорт, електромобілі та біопаливо.

### Природний газ

Природний газ широко використовується для виробництва електроенергії і має інтенсивність викидів близько 500 г/кВт -год. Опалення також є основним джерелом викидів вуглекислого газу. Витоки також є великим джерелом атмосферного метану.

У деяких країнах природний газ використовується як тимчасове "мостове паливо" для заміни вугілля, в свою чергу замінюється відновлюваними джерелами або водневою економікою. Однак це "мостове паливо" може значно розширити використання викопного палива або волоконних активів, таких як газові електростанції, побудовані у 2020-х роках, оскільки середній термін служби заводу становить 35 років. Хоча активи природного газу, ймовірно, будуть втрачені пізніше, ніж активи нафти та вугілля, можливо, лише до 2050 року, деякі інвестори стурбовані ризиком репутації.



*Свердловина природного газу в Німеччині*

Поступове припинення використання природного газу в деяких регіонах, наприклад, із збільшенням використання водню Європейською мережею операторів систем передачі газу (ENTSOG) та змінами до будівельних норм для зменшення використання газового опалення.

### **Причини відмови**

Причини відмови від викопного палива наступні:

- зменшити смертність та хвороби, спричинені забрудненням повітря
- обмежити зміну клімату
- зменшити субсидії на енергію

### **Енергетичний сектор**

У 2014 році глобальний дохід енергетичного сектору становив близько 8 трильйонів доларів США [46], приблизно 84% викопного палива, 4% ядерного та 12% відновлюваного (включаючи гідроелектростанції) [47].

У 2014 році на біржах по всьому світу було зареєстровано 1469 нафтогазових компаній із сукупною ринковою капіталізацією 4,65 трлн доларів США. [48] У 2019 році Саудівська Арамко була зареєстрована, і вона досягла оцінки у 2 трильйони доларів США у свій другий день торгів [49], після найбільшого у світі первинного публічного розміщення акцій [50].

### **Економічні наслідки**

За оцінками, забруднення повітря з викопного палива у 2018 році коштуватиме 2,9 трлн доларів США, або 3,3% світового ВВП [7].

### **Субсидія**

За оцінками Міжнародного енергетичного агентства, у 2019 році дотації світового уряду на викопне паливо становили 320 мільярдів доларів. [51]

У звіті 2015 року було вивчено 20 компаній, що займаються викопним паливом, і було виявлено, що, хоча вони є дуже прибутковими, приховані економічні витрати для суспільства також були великими [52] [53]. Звіт охоплює період 2008–2012 рр. І зазначає, що: «Для всіх компаній і за всі роки економічні витрати для суспільства на їхні CO<sub>2</sub> викиди були більшими, ніж їх прибуток після сплати податків, за єдиним винятком ExxonMobil у 2008 р. "[52]: 4 У випадку компаній, що працюють лише з вугіллям, вплив гірший:" економічні витрати для суспільства



перевищують загальний дохід у усі роки, причому ця вартість коливається від майже 2 до 9 доларів за 1 долар доходу ". [52]: 5 У цьому випадку загальний дохід включає" зайнятість, податки, закупівлі поставок та непрямі зайнятість ". [52]: 4

Ціни на викопне паливо, як правило, нижчі за їх фактичні витрати або їх "ефективні ціни", якщо враховувати економічні зовнішні фактори, такі як витрати на забруднення повітря та глобальне знищення клімату. Викопні види палива субсидуються у 2015 році у розмірі 4,7 трлн доларів, що еквівалентно 6,3% світового ВВП 2015 року та, за оцінками, зростає до 5,2 трлн доларів у 2017 році, що еквівалентно 6,5% світового ВВП. Найбільшими п'ятьма субсидіями у 2015 році були такі: Китай із субсидіями на викопне паливо у розмірі 1,4 трлн доларів, США - 649 млрд доларів, Росія - 551 млрд доларів, Європейський Союз - 289 млрд доларів та Індія - 209 млрд доларів. Якби не було субсидій на викопне паливо, глобальні викиди вуглецю скоротилися б приблизно на 28% у 2015 році, смертність від забруднення повітря зменшилася б на 46%, а доходи уряду зросли на 2,8 трлн доларів або на 3,8% ВВП [54]. ]

Урядові субсидії США включають фінансування, надане Експортно-імпортним банком США (USEIB), агентством федерального уряду США, для закордонних проектів великих нафтохімічних корпорацій. За часів адміністрації президента США Обами, USEIB надало близько 34 мільярдів доларів на фінансування 70 проектів з викопного палива по всьому світу, включаючи Квінсленд, Австралію, Мпумалангу, Південно-Африканську Республіку та Мадх'я -Прадеш, Індія. [55]

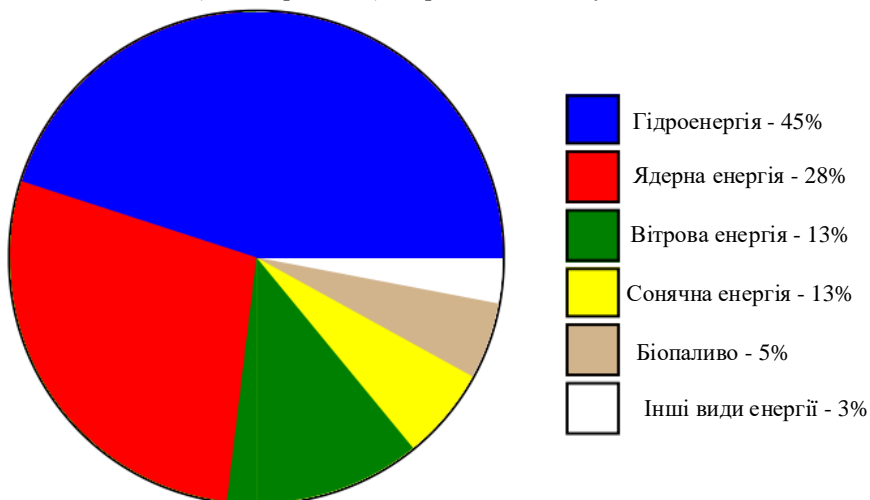
### **Вплив державної субсидії**

Основним наслідком державного субсидування на нафтохімічну продукцію стало збільшення видобутку, включаючи збільшення інвестицій у нові свердловини. Орієнтовна ціна на нафту в 50 доларів за барель, податкові пільги та інші державні субсидії США зробили прибутковими майже половину інвестицій у видобуток нової нафти. За оцінками, ця урядова дотація США призведе до збільшення видобутку американської нафти на 17 мільярдів барелів протягом наступних кількох десятиліть. Це збільшення споживання нафти еквівалентно 6 мільярдам тонн вуглекислого газу і складає цілих 20% американського видобутку нафти до 2050 року, припускаючи загальний бюджет викидів вуглецю, що обмежує середнє глобальне потепління до 2 ° С. [56]

## ПОНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

**Поновлювана енергія (Renewable energy)** — це корисна енергія, яка збирається з відновлюваних ресурсів, які природним чином поповнюються у межах людського періоду, включаючи вуглецево-нейтральні джерела, такі як сонячне світло, вітер, дощ, припливи, хвилі та геотермальне тепло. Цей тип джерела енергії відрізняється від викопного палива, яке використовується набагато швидше, ніж поповнюється. Хоча більшість відновлюваних джерел енергії — це стійка енергія, деякі — ні, наприклад, частина біомаси є нестійкою.

Відновлювана енергія часто забезпечує енергію у чотирьох важливих сферах: виробництві електроенергії, нагріванні/охолодженні повітря та води, транспортуванні та сільських (поза мережевих) енергетичних послугах.



*Розподіл виробництва відновлюваної електроенергії (+ядерна) станом на 2018 рік.*

Згідно зі звітом REN21 за 2017 рік, відновлювані джерела внесли 19,3% у глобальне споживання енергії людьми та 24,5% у виробництво електроенергії у 2015 та 2016 роках відповідно. Це споживання енергії ділиться на 8,9% від традиційної біомаси, 4,2% як теплової енергії (сучасна біомаса, геотермальне та сонячне тепло), 3,9% від гідроелектроенергії, а решта 2,2% - це електроенергія від вітру, сонячної, геотермальної та інших форм біомаса. У 2017 році світові інвестиції у відновлювані джерела енергії склали 279,8 млрд. доларів США, причому на Китай припадає 45% світових інвестицій, а США та Європа - близько 15%. За оцінками, у всьому світі було 10,5 мільйонів робочих місць, пов'язаних з галузями відновлюваної енергетики, при цьому сонячна фотоелектрична енергія є найбільшим роботодавцем з відновлюваних джерел енергії. Системи відновлюваної енергії швидко стають ефективнішими та дешевшими, а їх частка у загальному споживанні енергії зростає. Станом на 2019 рік більше двох третин світової потужності

електроенергії, що встановлюється, відновлюється. Зростання споживання вугілля та нафти може припинитися до 2020 року через збільшення споживання відновлюваних джерел та природного газу. Станом на 2020 рік у більшості країн фотоелектрична сонячна енергія та вітер на суші є найдешевшими формами будівництва нових електростанцій.

На національному рівні щонайменше 30 країн світу вже мають відновлювану енергію, що забезпечує понад 20 відсотків їх енергопостачання. Прогнозується, що національні ринки відновлюваної енергетики продовжуватимуть інтенсивно зростати в найближче десятиліття і далі. Принаймні дві країни, Ісландія та Норвегія, вже генерують всю свою електроенергію за допомогою відновлюваної енергії, а багато інших країн поставили собі за мету досягти 100% відновлюваної енергії в майбутньому. Щонайменше 47 країн світу вже мають понад 50 відсотків електроенергії з відновлюваних ресурсів. Відновлювані джерела енергії існують на широких географічних територіях, на відміну від викопного палива, яке зосереджено в обмеженій кількості країн. Швидке впровадження поновлюваних джерел енергії та технологій енергоефективності призводить до значної енергетичної безпеки, пом'якшення зміни клімату та економічної вигоди. У міжнародних дослідженнях громадської думки існує рішуча підтримка просування поновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія.

Хоча багато проектів з відновлюваних джерел енергії є масштабними, відновлювані технології також підходять для сільських та віддалених районів та країн, що розвиваються, де енергія часто має вирішальне значення для розвитку людства. Оскільки більшість технологій відновлюваної енергії забезпечують електроенергією, розгортання відновлюваної енергії часто застосовується разом із подальшою електрифікацією, що має ряд переваг: електрику можна перетворювати на тепло, перетворювати в механічну енергію з високим ККД, і вона чиста в точці споживання. Крім того, електрифікація відновлюваною енергією є більш ефективною, а отже, призводить до значного скорочення потреб у первинній енергії.

У 2017 році інвестиції у відновлювані джерела енергії становили 279,8 млрд. доларів США у всьому світі, на Китай припадає 126,6 млрд. доларів США, або 45% світових інвестицій. Китай став найбільшим у світі інвестором, виробником та споживачем відновлюваної енергії у всьому світі, виготовляючи найсучасніші сонячні панелі, вітрові турбіни та гідроелектростанції", а також став найбільшим у світі виробником електромобілів та автобусів.

**Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії.**  
*Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (International Renewable Energy Agency — IRENA) — це міжурядова організація, уповноважена сприяти співпраці, розвивати знання та сприяти впровадженню та сталому використанню відновлюваної енергії. Це перша міжнародна організація, яка зосереджується виключно на відновлюваній енергетиці, задовольняючи потреби як у промислово-розвинених країнах, так і в країнах, що розвиваються. Вона була заснована в 2009 році, її статут набрав чинності 8 липня 2010 року. Штаб-квартира агентства розташована в місті Масдар, Абу-Дабі. Генеральним директором IRENA є Франческо Ла Камера, громадянин Італії. IRENA є офіційним спостерігачем Організації Об'єднаних Націй.*



*Логотип Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії*

IRENA прагне стати головною рушійною силою у просуванні переходу до використання відновлюваної енергії у глобальному масштабі:

Виступаючи в ролі глобального голосу щодо відновлюваних джерел енергії, IRENA надаватиме практичні поради та підтримку як промислово розвиненим країнам, так і країнам, що розвиваються, допомагатиме їм покращувати свої нормативні рамки та нарощувати потенціал. Агентство сприятиме доступу до всієї відповідної інформації, включаючи достовірні дані про потенціал відновлюваної енергії, найкращі практики, ефективні фінансові механізми та найсучасніші технологічні знання.

IRENA надає консультації та підтримку урядам щодо політики у галузі відновлюваних джерел енергії, розбудови потенціалу та передачі технологій. IRENA також координуватиме роботу з існуючими організаціями з відновлюваних джерел енергії, такими як REN21.

### Огляд

Потоки відновлюваної енергії включають природні явища, такі як сонячне світло, вітер, припливи та відпливи, зростання рослин та геотермальне тепло, як пояснює Міжнародне енергетичне агентство (IEA):

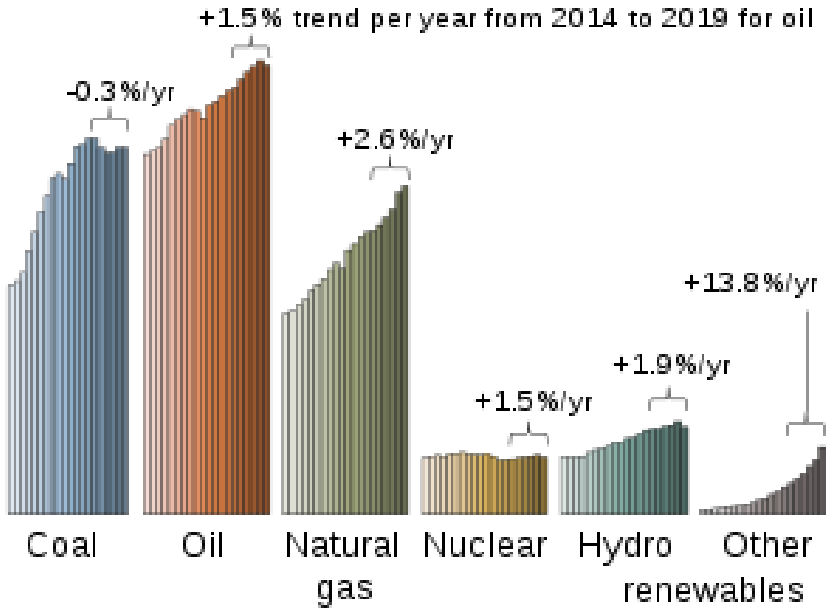
Відновлювана енергія походить від природних процесів, які постійно поповнюються. У різних формах поновлювальна енергія походить безпосередньо від Сонця або від тепла, що виділяється глибоко в землі. У визначення входить електрична та теплова енергія, вироблена з сонячної енергії, вітру, океану, гідроенергетики, біомаси, геотермальних ресурсів, а також біопалива та водню, отриманого з відновлюваних ресурсів.

Відновлювані джерела енергії та значні можливості для енергоефективності існують на широких географічних територіях, на відміну від інших джерел енергії, які зосереджені в обмеженій кількості країн. Швидке впровадження відновлюваної енергії та енергоефективності та технологічна диверсифікація джерел енергії призведуть до значної енергетичної безпеки та економічних вигод. Це також зменшило б забруднення навколишнього середовища, таке як забруднення повітря, спричинене спалюванням викопного палива, та покращило б здоров'я населення, зменшило б передчасну смертність через забруднення та заощадило пов'язані з цим

## Розділ 0

витрати на охорону здоров'я, які становлять кілька сотень мільярдів доларів щорічно лише в США.

### Global energy consumption, 2000 to 2019



*Вугілля, нафта та природний газ залишаються основними світовими джерелами енергії, навіть якщо поновлювані джерела енергії почали стрімко зростати.*

Численні аналізи американських стратегій декарбонізації виявили, що кількісно оцінені переваги для здоров'я можуть значно компенсувати витрати на впровадження цих стратегій. Очікується, що поновлювані джерела енергії, які отримують свою енергію прямо або опосередковано від Сонця, такі як гідро і вітер, будуть здатні постачати людству енергію ще майже 1 мільярд років, після чого очікуване збільшення тепла від Сонця очікується, що поверхня Землі стане занадто гарячою для існування рідкої води.

Занепокоєння щодо зміни клімату та глобального потепління, а також постійне падіння витрат на деяке обладнання для відновлюваних джерел енергії, таке як вітрогенератори та сонячні батареї, сприяють збільшенню використання відновлюваних джерел енергії. Нові державні витрати, регулювання та політика допомогли галузі пережити світову фінансову кризу краще, ніж багато інших секторів. Однак, за даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії, у 2019 році загальна частка відновлюваних джерел енергії в суміші енергії (включаючи електроенергію, тепло та транспорт) повинна зростати в шість разів швидше, щоб утримати зростання середніх глобальних температур "значно нижче" 2,0 ° C (3,6 ° F) протягом нинішнього століття, порівняно з доіндустріальними рівнями.

## Поновлювальні джерела енергії

Станом на 2011 рік, невеликі сонячні фотоелектричні системи забезпечують електроенергією кілька мільйонів домогосподарств, а мікрогідроенергія, сконфігурована в міні-мережах, обслуговує набагато більше. Понад 44 мільйони домогосподарств використовують біогаз, вироблений у побутових котлах, для освітлення та/або приготування їжі, а понад 166 мільйонів домогосподарств покладаються на нове покоління більш ефективних кухонних плит на біомасі. Восьмий Генеральний секретар Організації Об'єднаних Націй Пан Гі Мун заявив, що відновлювані джерела енергії здатні підняти найбідніші країни на новий рівень процвітання. На національному рівні щонайменше 30 країн світу вже мають відновлювану енергію, що забезпечує понад 20% поставок енергії. Прогнозується, що національні ринки відновлюваної енергетики продовжуватимуть інтенсивно зростати в найближче десятиліття і після цього, і близько 120 країн мають різні політичні цілі щодо довгострокової частки відновлюваної енергії, включаючи 20% всієї електроенергії, виробленої для Європейського Союзу до 2020 року. Деякі країни мають набагато вищі довгострокові цілі політики — до 100% відновлюваних джерел енергії. За межами Європи різноманітна група з 20 і більше інших країн націлена на частку відновлюваної енергії у період 2020–2030 років, що коливається від 10% до 50%.

Відновлювана енергія часто витісняє звичайні види палива у чотирьох сферах: виробництво електроенергії, гаряча вода/опалення приміщень, транспорт та сільськи (поза мережею) енергетичні послуги:

**Вироблення енергії.** За прогнозами, до 2040 р. відновлювана енергія зрівняється з електроенергією з вугілля та природного газу. Кілька юрисдикцій, включаючи Данію, Німеччину, штат Південна Австралія та деякі штати США, досягли високої інтеграції змінних відновлюваних джерел енергії. Наприклад, у 2015 році енергія вітру задовольняла 42% попиту на електроенергію в Данії, 23,2% у Португалії та 15,5% в Уругваї. Взаємний зв'язок енергосистем різних країн дають змогу цим країнам збалансувати електроенергетичні системи, дозволяючи імпорт та експорт відновлюваної енергії. Інноваційні гібридні системи виникли між країнами та регіонами.

**Опалення.** Нагрівання води на сонячних батареях робить важливий внесок у відновлюване тепло в багатьох країнах, особливо в Китаї, який зараз має 70% загальної кількості (180 ГВт). Більшість із цих систем встановлені у багатоквартирних будинках і задовольняють частину потреб гарячої води приблизно у 50–60 мільйонів домогосподарств Китаю. У всьому світі загальна кількість встановлених систем сонячного нагріву води задовольняє частину потреб водяного опалення понад 70 мільйонів домогосподарств. Використання біомаси для опалення також продовжує зростати. У Швеції національне використання енергії біомаси перевищило використання нафти. Прямі геотермальні джерела для опалення також швидко зростають. Найновішим доповненням до опалення є геотермальні теплові насоси, які забезпечують як опалення, так і охолодження, а також згладжують криву попиту на електроенергію і, отже, є зростаючим національним пріоритетом.

**Транспорт.** Біоетанол - це спирт, отриманий шляхом бродіння, переважно з вуглеводів, вироблених у цукрових або крохмальних культурах, таких як кукурудза, цукрова тростина або солодке сорго. Целюлозна біомаса, отримана з непродовольчих джерел, таких як дерева та трави, також розробляється як сировина для

## Розділ 0

виробництва етанолу. Етанол може використовуватися як паливо для транспортних засобів у чистому вигляді, але зазвичай він використовується як добавка до бензину для збільшення октанової суміші та покращення викидів транспортних засобів. Біоетанол широко використовується в США та Бразилії.



*Автобус, що працює на біодизелі*

Біодизель може використовуватися як паливо для автомобілів у чистому вигляді, але зазвичай він використовується як добавка до дизельного палива для зменшення вмісту твердих частинок, окису вуглецю та вуглеводнів з автомобілів на дизельних двигунах. Біодизель виробляється з олій або жирів за допомогою перегерифікації і є найпоширенішим біопаливом у Європі.



*PlanetSolar, найбільший у світі човен на сонячних батареях та перший у світі сонячний електромобіль, який здійснив навколосвітню подорож (у 2012 році)*

Сонячний автомобіль — це електричний транспортний засіб, який повністю або значною мірою працює від прямої сонячної енергії. Зазвичай фотоелектричні (PV) елементи, що містяться в сонячних панелях, перетворюють енергію сонця безпосередньо в електричну.

## Поновлювальні джерела енергії

Термін "сонячний автомобіль" зазвичай означає, що сонячна енергія використовується для живлення всього двигуна автомобіля або його частини. Сонячна енергія також може бути використана для забезпечення живленням засобів зв'язку, управління або інших допоміжних функцій. На сьогоднішній день сонячні транспортні засоби не продаються як практичні повсякденні транспортні засоби, а є наперед демонстраційними транспортними засобами та інженерними навчаннями, часто спонсорованими урядовими установами. Серед відомих прикладів можна назвати *PlanetSolar* та *Solar Impulse*. Однак транспортні засоби з непрямим зарядом від сонячних батарей широко поширені, і сонячні човни доступні у продажу.

### Історія

До розвитку вугілля в середині 19 століття майже вся енергія, що використовувалася, відновлювалася. Майже без сумніву, найдавніше відоме використання відновлюваної енергії у вигляді традиційної біомаси для розпалювання пожег існує понад мільйон років тому. Використання біомаси для вогню стало звичайним явищем лише через багато сотень тисяч років потому. Ймовірно, другим найстарішим використанням відновлюваної енергії є використання вітру для того, щоб вести кораблі над водою. Цю практику можна простежити приблизно за 7000 років, до кораблів у Перській затоці та на Нілі. З гарячих джерел геотермальна енергія використовується для купання з часів палеоліту та для опалення приміщень з часів Стародавньої Римської імперії. Переходячи до часу записаної історії, основними джерелами традиційної поновлюваної енергії були людська праця, сила тварин, водна енергія, вітер, вітряки, що дроблять зерно, та дрова, традиційна біомаса.

У 1860-ті та 1870-ті роки вже існували побоювання, що цивілізація вичерпає викопне паливо, і відчувалася потреба у кращому джерелі.

Теорія пікової нафти була опублікована в 1956 р. У 1970-х рр. екологи сприяли розвитку відновлюваної енергетики як заміни для можливого виснаження нафти, так і для уникнення залежності від нафти, і з'явилися перші вітрогенератори, що виробляють електроенергію. Сонячні батареї довгий час використовувалися для опалення та охолодження, але сонячні панелі були занадто дорогими для будівництва сонячних ферм до 1980 року.

### Основні технології

#### Гідроенергетика

**Гідроелектроенергія** — це електроенергія, вироблена з гідроенергії. У 2015 році гідроенергетика виробляла 16,6% загальної світової електроенергії та 70% усієї відновлюваної електроенергії, і очікувалося, що вона зростатиме приблизно на 3,1% щороку протягом наступних 25 років.

Показники виробництва гідроелектроенергії у світі:

- Глобальна потужність виробництва електроенергії 1211 ГВт (2020 р.);
- Річні темпи зростання світової потужності виробництва гідроелектроенергії 2,7% (2011-2020 рр.);
- Частка світового виробництва гідроелектроенергії 16% (2018)



## Розділ 0

- Середня вартість за мегават-годину 65,581 дол. США (2019);
- Первинна технологія —Гребля
- Інші застосування енергії: Насосне накопичення, механічна

Гідроелектроенергія виробляється у 150 країнах, а Азіатсько-Тихоокеанський регіон виробляє 33 відсотки світової гідроенергетики у 2013 році. Китай є найбільшим виробником гідроелектроенергії, з 920 ТВт-год виробництва в 2013 році, що становить 16,9% внутрішнього споживання електроенергії.



*Гребля "Три ущелини" на річці Янцзи в Центральному Китаї є найбільшим у світі виробництвом електроенергії будь-якого типу.*

Вартість гідроелектроенергії є відносно низькою, що робить її конкурентним джерелом відновлюваної електроенергії. Гідроелектростанція не споживає води, на відміну від вугільних або газових заводів. Типова вартість електроенергії з гідроелектростанції, більшою за 10 мегават, становить від 3 до 5 центів США за кіловатт-годину. З греблею та водосховищем це також гнучке джерело електроенергії, оскільки кількість виробленої станцією можна дуже швидко змінювати вгору або вниз (всього за кілька секунд) для адаптації до мінливих потреб енергії. Після побудови гідроелектричного комплексу проект не виробляє прямих відходів і, як правило, має значно нижчий рівень викидів парникових газів, ніж фотоелектричні електростанції та, безумовно, викиди парникових газів у життєвому циклі енергоносіїв).

Оскільки вода приблизно в 800 разів щільніша за повітря, навіть повільний потік води або помірне набряк моря може дати значну кількість енергії. Існує багато форм енергії води:

- Історично склалося так, що гідроелектростанція виникла завдяки спорудженню великих гребель та водосховищ, які все ще популярні в країнах, що розвиваються. [58] Найбільші з них - гребля «Три ущелини» (2003) у Китаї та гребля «Гтайпу» (1984), побудована Бразилією та Парагваєм.
- Малі гідросистеми - це гідроелектростанції, які зазвичай виробляють до 50 МВт електроенергії. Вони часто використовуються на малих

річках або як невеликий вплив на великі річки. Китай є найбільшим виробником гідроелектроенергії у світі і має понад 45 000 малих гідроустановок. [59]

- Проточні гідроелектростанції отримують енергію з річок без створення великого водоймища. Зазвичай вода подається вздовж узбережжя річкової долини (за допомогою каналів, труб та/або тунелів), поки вона не підніметься високо над дном долини, після чого їй можна дозволити провалитися через пробку для керування турбіною. Цей стиль генерування все ще може виробляти велику кількість електроенергії, наприклад, дамба Головного Джозефа на річці Колумбія в США [60]. Багато проточних гідроелектростанцій є мікро-гідростанціями або гідростанціями піко.

Однак при будівництві в низинних зонах тропічних лісів, де необхідна затоплення частини лісу, вони можуть виділяти значну кількість парникових газів.

Будівництво гідроелектротехнічного комплексу може спричинити значний вплив на навколишнє середовище, головним чином, через втрату ріллі та переміщення населення. Вони також порушують природну екологію залученої річки, впливаючи на середовища існування та екосистеми, а також на форми замулення та ерозії. Хоча греблі можуть зменшити ризик повені, вони також містять ризик провалу греблі, що може бути катастрофічним.

Потужність хвилі, яка вловлює енергію поверхневих хвиль океану, і припливна сила, що перетворює енергію припливів, є двома формами гідроенергетики з потенціалом майбутнього; проте вони поки що не широко використовуються в комерційних цілях. Перетворення теплової енергії океану, яка використовує різницю температур між більш прохолодними глибокими та теплими поверхневими водами, наразі не має економічної можливості.

### Енергія вітру

*Енергія вітру* — це використання вітру для забезпечення механічної потужності через вітрогенератори для перетворення електричних генераторів на електроенергію. Вітроенергетика — це популярне сталє, поновлюване джерело енергії, яке має набагато менший вплив на навколишнє середовище порівняно із спалюванням викопного палива.

Показники виробництва вітрової електроенергії у світі:

- Глобальна потужність виробництва електроенергії 733 ГВт (2020);
- Річні темпи зростання світової потужності з виробництва електроенергії 14% (2011-2020 рр.);
- Частка світового виробництва електроенергії 5% (2018);
- Середня вартість за мегават-годину 30,165 дол. США (2019);
- Первинна технологія — Вітрогенератор
- Інші види використання енергії — Вітряк.

Вітрові електростанції складаються з багатьох окремих вітрових турбін, які підключені до мережі передачі електроенергії. Береговий вітер є недорогим джерелом електроенергії, конкурентоспроможним або багато в чому

дешевшим, ніж вугільні або газові електростанції. Берегові вітрові електростанції мають більший візуальний вплив на ландшафт, ніж інші електростанції, оскільки вони повинні бути розповсюджені на більшій частині землі і їх потрібно будувати в сільській місцевості, що може призвести до "індустріалізації сільської місцевості" та втрата середовища проживання. Морський вітер більш стійкий і сильний, ніж на суші, а морські ферми мають менший візуальний вплив, але витрати на будівництво та обслуговування значно вищі. Невеликі наземні вітрові електростанції можуть подавати частину енергії в мережу або забезпечувати живленням ізольованих позамережних місць.

Енергія вітру — це переривчасте джерело енергії, яке неможливо передати на вимогу. Локально він дає змінну потужність, яка послідовна з року в рік, але сильно змінюється протягом коротших часових шкал. Тому його необхідно використовувати з іншими джерелами живлення для забезпечення надійного живлення. Методи управління електроенергією, такі як наявність джерел енергії, що відвантажуються (часто газові електростанції або гідроелектростанції), надлишкові потужності, географічно розподілені турбіни, експорт та імпорту електроенергії в сусідні райони, зберігання електромереж, скорочення попиту при низькому вітровому виробництві та скорочення для подолання цих проблем використовується час від часу надмірна потужність вітру. Зі збільшенням частки енергії вітру в регіоні для її резервного копіювання потрібні більш традиційні джерела енергії, і, можливо, доведеться модернізувати мережу. Прогноз погоди дозволяє електроенергетичній мережі бути готовим до передбачуваних коливань виробництва, що відбуваються.

У 2019 році вітер постачав 1430 ТВт-год електроенергії, що становило 5,3% світового виробництва електроенергії [8], а загальна встановлена потужність вітру перевищує 651 ГВт, що на 10% більше, ніж у 2018 році [9].

Вважається, що у всьому світі довгостроковий технічний потенціал вітроенергетики в п'ять разів перевищує загальний поточний обсяг світового виробництва енергії, або в 40 разів перевищує поточний попит на електроенергію, припускаючи, що всі необхідні практичні бар'єри подолані. Це вимагатиме встановлення вітрових турбін на великих територіях, особливо в районах з більш високими вітровими ресурсами, таких як морські. Оскільки швидкість вітру на морі в середньому на 90% більша, ніж на суші, так і морські ресурси можуть вносити значно більше енергії, ніж наземні турбіни.

Електроенергія, вироблена вітром, задовольнила майже 4% світового попиту на електроенергію в 2015 році, встановивши майже 63 ГВт нової потужності вітру. Енергія вітру була провідним джерелом нових потужностей у Європі, США та Канаді та другим за величиною у Китаї. У Данії енергія вітру задовольняла понад 40% потреб електроенергії, тоді як Ірландія, Португалія та Іспанія задовольняли майже 20%.

### Сонячна енергія

**Сонячна енергія** — це променисте світло та тепло Сонця, які використовуються за допомогою ряду технологій, що постійно розвиваються, таких як сонячне опалення, фотоелектрична енергія, сонячна теплова енергія, сонячна архітектура, електростанції з розплавленою сіллю та штучний фотосинтез.

Показники виробництва сонячної електроенергії у світі:

- Глобальна потужність виробництва електроенергії 714 ГВт (2020);
- Річні темпи зростання світової потужності з виробництва електроенергії 29% (2011-2020 рр.) [74]
- Частка світового виробництва електроенергії 2% (2018) [56]
- Вирівняна вартість за мегават-годину Фотоелектрична мережа загального користування: 38,343 дол. США (2019) [75]
- Первинні технології Фотоелектрична енергія, концентрована сонячна енергія, сонячний тепловий колектор
  - Інші види застосування енергії Нагрівання води; опалення, вентиляція та кондиціонування повітря (ОВК); приготування їжі; технологічне тепло; очистка води

Це важливе джерело відновлюваної енергії, і його технології в цілому характеризуються як пасивні сонячні або активні сонячні, залежно від того, як вони захоплюють і розподіляють сонячну енергію або перетворюють її на сонячну. Активні сонячні технології включають використання фотоелектричних систем, концентрованої сонячної енергії та нагрівання сонячної води для використання енергії. Пасивні сонячні технології включають орієнтацію будівлі на Сонце, вибір матеріалів зі сприятливою тепловою масою або світлорозсіювальними властивостями та проектування приміщень, які природно циркулюють повітря.

Велика кількість доступної сонячної енергії робить її дуже привабливим джерелом електрики. Програма розвитку Організації Об'єднаних Націй у своїй Всесвітній енергетичній оцінці 2000 року встановила, що річний потенціал сонячної енергії становив 1,575–49,837 екзаджоулів (EJ). Це в кілька разів більше, ніж загальне світове споживання енергії, яке становило 559,8 EJ у 2012 році.

У 2011 році Міжнародне енергетичне агентство заявило, що "розвиток доступних, невичерпних та чистих технологій сонячної енергії матиме величезні довгострокові переваги. Це підвищить енергетичну безпеку країн, спираючись на корінні, невичерпні та переважно незалежні від імпорту ресурси. , підвищити стійкість, зменшити забруднення, знизити витрати на пом'якшення глобального потепління та утримати ціни на вичерпане паливо нижче, ніж інакше. Ці переваги є глобальними. Отже, додаткові витрати на стимули до раннього розгортання слід розглядати як навчання інвестиціям; їх потрібно розумно витрачати і їх потрібно широко розповсюджувати ".

Сонячна енергія, променисте світло та тепло від Сонця використовуються за допомогою ряду постійно розвиваються технологій, таких як сонячне опалення,

фотоелектрична енергія, концентрована сонячна енергія (CSP), концентраторна фотоелектрика (CPV), сонячна архітектура та штучний фотосинтез [76]. [77] Сонячні технології загалом характеризуються як пасивні сонячні або активні сонячні залежно від способу їх захоплення, перетворення та розподілу сонячної енергії. Пасивні сонячні технології включають орієнтацію будівлі на Сонце, вибір матеріалів зі сприятливою тепловою масою або світлорозсіювальними властивостями та проектування приміщень, де природно циркулює повітря. Активні сонячні технології охоплюють сонячну теплову енергію, використовуючи сонячні колектори для опалення та сонячну енергію, перетворюючи сонячне світло в електроенергію або безпосередньо за допомогою фотоелектрики (PV), або опосередковано за допомогою концентрованої сонячної енергії (CSP).

Фотоелектрична система перетворює світло в електричний постійний струм (DC), використовуючи переваги фотоелектричного ефекту. [78] Сонячна фотоелектрична енергія перетворилася на багатомільярдну, швидкозростаючу галузь, продовжує покращувати свою економічну ефективність і має найбільший потенціал серед будь-яких поновлюваних технологій разом із CSP. [79] [80] Системи з концентрованою сонячною енергією (CSP) використовують лінзи або дзеркала та системи стеження, щоб зосередити велику площу сонячного світла в невеликий промінь. Комерційні концентровані сонячні електростанції були вперше розроблені у 1980-х роках. CSP-Stirling має на сьогоднішній день найвищу ефективність серед усіх технологій сонячної енергії.

У 2011 році Міжнародне енергетичне агентство заявило, що "розвиток доступних, невичерпних та чистих технологій сонячної енергії матиме величезні довгострокові переваги. Це підвищить енергетичну безпеку країн, спираючись на корінні, невичерпні та переважно незалежні від імпорту ресурси, підвищити стійкість, зменшити забруднення, знизити витрати на пом'якшення зміни клімату та утримувати ціни на вичерпане паливо нижче, ніж інакше. Ці переваги мають глобальний характер. Отже, додаткові витрати на стимули до раннього розгортання слід розглядати як навчання інвестиціям; їх слід розумно витратити та мають бути широко поширені". [76] Австралія має найбільшу частку сонячної електроенергії у світі; у 2020 році сонячна енергія забезпечувала 9,9% потреби електроенергії. [81]

### Біоенергетика

**Біоенергетика** — це енергія, отримана з біомаси або біопалива. **Біомаса** — це будь-який органічний матеріал, який поглинув сонячне світло і зберігає його у вигляді хімічної енергії. Прикладами є деревина, енергетичні культури та відходи лісів, дворів або ферм. Оскільки технічно біомасу можна використовувати безпосередньо як паливо (наприклад, дерев'яні колоди), деякі люди використовують терміни біомаса та біопаливо як взаємозамінні. Найчастіше слово біомаса просто позначає біологічну сировину, з якої виготовляється паливо. Слово **біопаливо** зазвичай зарезервоване для рідкого або газоподібного палива, яке використовується для транспорту.

Показники виробництва біоелектроенергії у світі:

- Глобальна потужність виробництва електроенергії 127 ГВт (2020);

## Поновлювальні джерела енергії

- Річні темпи зростання світової потужності з виробництва електроенергії 6,5% (2011-2020 рр.);
- Частка світового виробництва електроенергії 2% (2018);
- Середня вартість за мегават -годину 118,908 дол. США (2019);
- Первинні технології — Біомаса, біопаливо
- Інші види використання енергії: Паливо для опалення, приготування їжі, транспорт.

Як джерело енергії, біомасу можна або використовувати безпосередньо при спалюванні для виробництва тепла, або опосередковано після перетворення її на різні форми біопалива. Перетворення біомаси на біопаливо може бути досягнуто різними методами, які загалом класифікуються на: термічні, хімічні та біохімічні методи. Деревина була найбільшим джерелом енергії біомаси станом на 2012 рік .



*Плантація цукрового очерету для виробництва етанолу в Бразилії*

Приклади включають залишки лісу, такі як мертві дерева, гілки та пні, - вирубку дворів, тріску та навіть тверді побутові відходи. У другому сенсі біомаса включає рослинні або тваринні речовини, які можна перетворити на волокна або інші промислові хімікати, включаючи біопаливо. Промислову біомасу можна вирощувати з численних видів рослин, включаючи міскантус, траву, коноплю, кукурудзу, тополь, вербу, сорго, цукрову тростину, бамбук та різні породи дерев, починаючи від евкаліпта і закінчуючи олійною пальмою (пальмова олія).

Приклади включають залишки лісу, такі як мертві дерева, гілки та пні, - вирубку дворів, тріску та навіть тверді побутові відходи. У другому сенсі біомаса включає рослинні або тваринні речовини, які можна перетворити на волокна або інші промислові хімікати, включаючи біопаливо. Промислову біомасу можна вирощувати з численних видів рослин, включаючи міскантус, траву, коноплю, кукурудзу, тополь, вербу, сорго, цукрову тростину, бамбук та різні породи дерев, починаючи від евкаліпта і закінчуючи олійною пальмою (пальмова олія).

Рослинна енергія виробляється сільськогосподарськими культурами, спеціально вирощеними для використання в якості палива, які пропонують високу продуктивність біомаси на гектар з низькою витратою енергії. Зерно можна

## Розділ 0

використовувати для перевезення рідкого палива, тоді як солону можна спалювати для виробництва тепла чи електроенергії. Рослинна біомаса також може бути розкладена з целюлози на глюкозу шляхом серії хімічних обробок, а потім отриманий цукор можна використовувати як біопаливо першого покоління.



*Електростанція ТЕЦ, що використовує деревину для постачання 30 000 домогосподарств у Франції*

Біомасу можна перетворювати на інші використовувані види енергії, такі як газ метан або транспортне паливо, таке як етанол та біодизель. Гниття сміття, а також сільськогосподарські та людські відходи викидають газ метан, який також називають сміттєвим газом або біогазом. Посіви, такі як кукурудза та цукрова тростина, можна ферментувати для отримання транспортного палива, етанолу. Біодизель, інше паливо для транспорту, можна виробляти із залишків харчових продуктів, таких як рослинні олії та тваринні жири. Крім того, біомаса до рідин (BTL) та целюлозний етанол все ще досліджуються. Існує велика кількість досліджень, що стосуються палива з водоростей або біомаси, отриманої з водоростей, через те, що це непродовольчий ресурс і його можна виробляти з 5-10-кратним показником порівняно з іншими видами наземного землеробства, такими як кукурудза і сою. Після збирання його можна ферментувати для отримання біопалива, такого як етанол, бутанол і метан, а також біодизель та водень. Біомаса, що використовується для виробництва електроенергії, залежить від регіону. Лісові побічні продукти, такі як залишки деревини, поширені в США. Сільськогосподарські відходи поширені на Маврикії (залишки цукрового очерету) та Південно-Східній Азії (рисова лушпиння). Залишки тваринництва, такі як підстилка для птиці, поширені у Сполученому Королівстві.

Біопаливо включає широкий спектр палив, отриманих з біомаси. Термін охоплює тверде, рідке та газоподібне паливо. До рідкого біопалива відносяться біо спирт, такі як біоетанол, і масла, такі як біодизель. Газоподібне біопаливо включає біогаз, сміттевий газ та синтетичний газ. Біоетанол — це спирт, отриманий шляхом ферментації цукрових компонентів рослинної сировини, і його виготовляють переважно з посівів цукру та крохмалю. До них відносяться кукурудза, цукрова тростина і, нещодавно, солодке сорго. Остання культура особливо придатна для вирощування в умовах засушливих районів, і її досліджує Міжнародний науково-дослідний інститут сільськогосподарських культур напівзасушливих тропіків на предмет її потенціалу забезпечувати паливом разом з продуктами харчування та кормами для тварин у посушливих районах Азії та Африки.

Завдяки розвитку передових технологій целюлозна біомаса, така як дерева та трави, також використовується як сировина для виробництва етанолу. Етанол може використовуватися як паливо для транспортних засобів у чистому вигляді, але зазвичай він використовується як добавка до бензину для збільшення октанової суміші та покращення викидів транспортних засобів. Біоетанол широко використовується в США та Бразилії. Витрати енергії на виробництво біоетанолу майже дорівнюють витратам енергії з біоетанолу. Однак, за даними Європейського агентства з навколишнього середовища, біопаливо не вирішує проблем глобального потепління. Біодизель виготовляється з рослинних олій, тваринних жирів або перероблених масел. Його можна використовувати як паливо для автомобілів у чистому вигляді, або частіше як добавку до дизельного палива для зменшення вмісту твердих частинок, окису вуглецю та вуглеводнів з автомобілів на дизельних двигунах. Біодизель виробляється з олій або жирів за допомогою перестерифікації і є найпоширенішим біопаливом в Європі. Біопаливо забезпечувало 2,7% світового транспортного палива у 2010 році.

Біомаса, біогаз та біопаливо спалюються для виробництва тепла/електроенергії і тим самим завдають шкоди навколишньому середовищу. При спалюванні біомаси утворюються такі забруднювачі, як сірчисті оксиди ( $\text{SO}_x$ ), оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) та тверді частинки. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, у 2012 році 3,7 мільйона передчасно померли від забруднення зовнішнього повітря, тоді як забруднення приміщень від спалювання біомаси спричинило вплив понад 3 мільярдів людей у всьому світі.

### Геотермальна енергія

**Геотермальна енергія** — це теплова енергія в земній корі, яка походить від утворення планети та від радіоактивного розпаду матеріалів у непевних, але, можливо, приблизно рівних пропорціях. Висока температура і тиск у глибині Землі призводять до того, що деякі породи плавляться, а тверда мантія поводить себе пластично, в результаті чого частини мантії виступають вгору, оскільки вона легша за навколишню породу, а температура на кордоні ядра - мантія може досягати понад  $4000^\circ\text{C}$ .

Показники виробництва геотермальної електроенергії у світі:

- Глобальна потужність виробництва електроенергії 14 ГВт (2020);



## Розділ 0

- Річні темпи зростання світової потужності з виробництва електроенергії 3,7% (2011-2020 рр.);
- Частка світового виробництва електроенергії <1% (2018);
- Середня вартість за мегават -годину 58,257 дол. США (2019);
- Первинні технології: Електростанції з сухою парою, вологою парою та подвійним циклом;
- Інші види енергії — Опалення



- *Пара, що піднімається від геотермальної електростанції Несаєвеллір в Ісландії*

Геотермальне опалення, наприклад, з використанням води з гарячих джерел, використовувалося для купання з часів палеоліту та для опалення приміщень з часів Стародавньої Римської імперії, проте останнім часом геотермальна енергія, термін, який використовується для виробництва електроенергії з геотермальної енергії, набув значення. Вважається, що геотермальні ресурси Землі теоретично більш ніж достатні для забезпечення енергетичних потреб людства, хоча в даний час лише дуже невелика частка використовується з вигодою, часто в районах поблизу меж тектонічних плит.

В результаті досліджень та досвіду промисловості, що підтримується державою, витрати на виробництво геотермальної енергії зменшилися на 25% протягом 1980-х та 1990-х років. Останні технологічні досягнення різко скоротили витрати і тим самим розширили діапазон та розміри життєздатних ресурсів, і в 2021 році Міністерство енергетики США оцінює, що геотермальна енергія з електростанції, «побудованої сьогодні», коштує близько 0,05 доларів США за кВт-год.

По всьому світу в 2019 році було доступно 13 900 мегават (МВт) геотермальної енергії. Станом на 2010 рік додатково встановлено 28 гігават прямої геотермальної теплової енергії для централізованого опалення, опалення приміщень, спа-центрів, промислових процесів, опріснення та сільського господарства.

Прогнози на майбутнє геотермальної енергії залежать від припущень щодо технологій, цін на енергію, субсидій, переміщення меж плит та процентних ставок. Пілотні програми, такі як замовник EWEB, вибирають програму Green Power, показують, що клієнти готові платити трохи більше за поновлюване джерело енергії, таке як геотермальна. У промисловості зайнято близько 100

тисяч осіб. Прикметник геотермальний походить від грецького кореня γῆ (gê), що означає Земля, і θερμός (thermós), що означає гарячий.

Геотермальна енергія високої температури - це тепла енергія, що генерується і зберігається на Землі. Теплова енергія - це енергія, яка визначає температуру речовини. Геотермальна енергія Землі походить від початкового утворення планети та від радіоактивного розпаду мінералів (у наразі невизначених, але, можливо, приблизно рівних пропорціях). Геотермічний градієнт, що є різницею температур між ядром планети та її поверхнею, забезпечує безперервний провід теплової енергії у вигляді тепла від ядра до поверхні. Прикметник геотермальний походить від грецького кореня гео, що означає земля, і термос, що означає тепло.

Тепло, яке використовується для геотермальної енергії, може надходити з глибини Землі, аж до ядра Землі - 6400 км вниз. На ядрі температура може досягати понад 5000 градусів Цельсія. Тепло проводить від серцевини до навколишньої породи. Надзвичайно висока температура і тиск призводять до плавлення деякої породи, яка відома як магма. Магма конвекується вгору, оскільки вона легша за тверду породу. Потім ця магма нагріває гірські породи та воду в корі, іноді до 700 ° F (371 ° C).

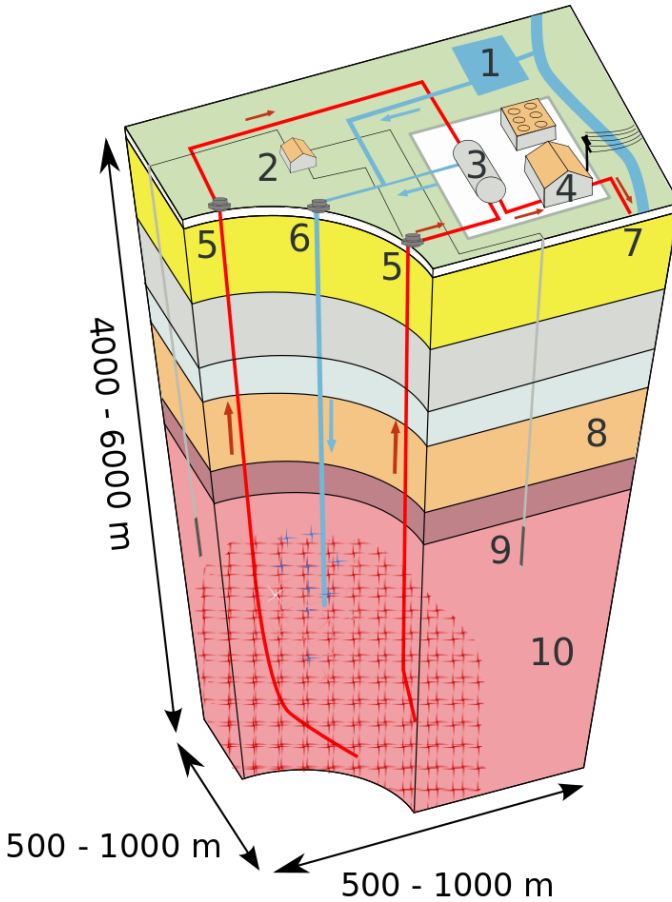
Низькотемпературна геотермальна відноситься до використання зовнішньої кори Землі як теплової батареї для полегшення відновлюваної теплової енергії для опалення та охолодження будівель та інших холодильних та промислових цілях. У цій формі геотермальної установки геотермальний тепловий насос та теплообмінник, пов'язаний із землею, використовуються разом для переміщення теплової енергії на Землю (для охолодження) та із Землі (для опалення) на різних сезонах. Низькотемпературна геотермальна енергія (загальна назва "ПГП") стає все більш важливою поновлюваною технологією, оскільки вона одночасно зменшує загальні річні навантаження на енергію, пов'язану з опаленням та охолодженням, а також згладжує криву попиту на електроенергію, усуваючи екстремальне літнє та зимове пікове електропостачання вимоги. Таким чином, низькотемпературні геотермальні установки/ПГВ стають все більш загальнонаціональним пріоритетом із підтримкою декількох податкових кредитів та зосередженням у рамках поточного руху до чистої нульової енергії.

### Нові технології поновлювальної енергетики

Інші технології відновлюваних джерел енергії все ще перебувають у стадії розробки і включають целюлозний етанол, геотермальну енергію з гарячою сухою породою та морську енергію. Ці технології ще не широко продемонстровані або мають обмежену комерціалізацію. Багато з них на горизонті і можуть мати потенціал, порівнянний з іншими технологіями відновлюваних джерел енергії, але все ще залежать від залучення достатньої уваги та фінансування досліджень, розробок та демонстрацій.

Існує чимало організацій в академічному, федеральному та комерційному секторах, які проводять масштабні передові дослідження в галузі відновлюваної енергетики. Це дослідження охоплює декілька сфер зосередження у спектрі відновлюваних джерел енергії. Більшість досліджень спрямовані на підвищення ефективності та збільшення загального виходу енергії.

## Поліпшена геотермальна система



Поліпшена геотермальна система: 1 резервуар, 2 насосні установки, 3 теплообмінники, 4 турбінні зали, 5 виробничі свердловини, 6 нагнітальних свердловини, 7 гаряча вода для централізованого опалення, 8 пористі відкладення, 9 спостережні свердловини, 10 кристалічні породи

Поліпшена геотермальна система (*enhanced geothermal system — EGS*) виробляє геотермальну електроенергію без необхідності використання природних конвективних гідротермальних ресурсів. Донедавна геотермальні енергетичні

системи використовували лише ті ресурси, де природне тепло, вода та проникність гірських порід достатні для видобутку енергії. Тим не менш, більшість геотермальної енергії, доступної для звичайних технологій, знаходиться в сухих і непрониких породах. Технології EGS покращують та/або створюють геотермальні ресурси в цій *гарячій сухій породі* (*hot dry rock* — HDR) за допомогою різних методів стимуляції, включаючи «гідравлічну стимуляцію».

Коли природні тріщини і пори не дають змоги економічно витратити воду, проникність може бути підвищена шляхом закачування холодної води високого тиску в нагнітальну свердловину в гірську породу. Нагнітання підвищує тиск рідини в природній породі з тріщинами, викликаючи події зсуву, які підвищують проникність системи. Поки підтримується тиск нагнітання, висока проникність породи не потрібна, а також пропанти гідравлічного розриву пластів для утримання розривів у відкритому стані. Цей процес називається гідрозсувом, можливо, для того, щоб відрізнити його від гідравлічного розриву, який використовується в нафтогазовій промисловості, який може створювати нові тріщини через породу на додаток до розширення існуючих.

Вода рухається через тріщини в гірській породі, захоплюючи тепло породи, поки не буде витіснена з другої свердловини у вигляді дуже гарячої води. Тепло води перетворюється в електрику за допомогою парової турбіни або системи двійкової електростанції. Вся вода, охолоджена, знову вприскується в землю, щоб знову нагрітися в замкнутому контурі.

Технології EGS можуть функціонувати як ресурси базового завантаження, які виробляють електроенергію 24 години на добу. На відміну від гідротермальних, EGS можуть бути у будь-якій точці світу, залежно від економічних меж глибини буріння. Хороші місця знаходяться над глибоким гранітом, покритим шаром ізоляційних відкладів довжиною 3–5 кілометрів, які уповільнюють втрати тепла. Очікується, що економічний термін експлуатації установки EGS складатиме 20–30 років за сучасними технологіями.

В даний час системи EGS розробляються і випробовуються в Австралії, Франції, Німеччині, Японії, Швейцарії та США. Найбільший проект EGS у світі — це демонстраційна установка потужністю 25 мегават, яка зараз розробляється в басейні Купер, Австралія. Басейн Купер має потенціал генерації 5000–10 000 МВт.

### Целюлозний етанол

*Целюлозний етанол* — це етанол, тобто етиловий спирт, що виробляється з целюлози (волокнистої тканини рослини), а не з насіння або плодів рослини. Його можна виробляти з трав, деревини, водоростей або інших рослин. Зазвичай етанол використовується як біопаливо. Вуглекислий газ, який рослини поглинають у міру зростання, компенсує деяку кількість вуглекислого газу, що виділяється при спалюванні етанолу, тому целюлозне етанолове паливо має потенціал мати менший вуглецевий слід, ніж викопне паливо.

Інтерес до целюлозного етанолу обумовлений його потенціалом замінити етанол з кукурудзи або цукрового очерету. Оскільки ці рослини також використовуються для харчових продуктів, перенаправлення їх на виробництво етанолу може призвести до зростання цін на продукти харчування; Джерела на основі целюлози, з іншого боку, зазвичай не конкурують з їжею, оскільки волокнисті частини рослин

## Розділ 0

переважно неїстівні для людини. Іншою потенційною перевагою є велика різноманітність та велика кількість джерел целюлози; трави, дерева та водорості зустрічаються майже в кожному середовищі на Землі. Навіть такі компоненти твердих побутових відходів, як папір, можна перетворити на етанол. Основним поточним недоліком целюлозного етанолу є його висока вартість виробництва, яка є більш складною і потребує більше кроків, ніж етанол на основі кукурудзи або цукрового очерету.

Целюлозний етанол отримав значну увагу у 2000-х та на початку 2010-х років. Зокрема, уряд Сполучених Штатів фінансував дослідження щодо його комерціалізації та встановив цільові показники щодо частки целюлозного етанолу, доданого до транспортного палива. Велика кількість нових компаній, що спеціалізуються на целюлозному етанолі, на додаток до багатьох існуючих компаній, інвестували в пілотні виробничі підприємства. Однак набагато дешевше виробництво етанолу на зерновій основі разом з низькою ціною на нафту у 2010-х роках означало, що целюлозний етанол не був конкурентоспроможним з цими відомими видами палива. В результаті більшість нових переробних заводів були закриті до середини 2010-х років, а багато новостворених компаній стали неплатоспроможними. Деякі з них все ще існують, але в основному використовуються для демонстраційних або дослідницьких цілей; станом на 2021 рік жоден не виробляє целюлозний етанол у промислових масштабах.

### Морська енергетика

Морська енергія або морська енергія (також іноді називається енергією океану, гідрокінетичною енергією) відноситься до енергії, яку переносять хвилі океану, припливи, солоність та різниці температур океану. Рух води у світовому океані створює величезний запас кінетичної енергії або енергії в русі.



*Припливна електростанція, розташована на лимані річки Ранс у Бретані, Франція.*

Частина цієї енергії може бути використана для виробництва електроенергії для живлення будинків, транспорту та промисловості.

Термін морська енергія охоплює як потужність хвилі, тобто потужність поверхневих хвиль, так і силу припливу, тобто отриману з кінетичної енергії великих тіл рухомої води.

Цю енергію можна використати для виробництва електроенергії для живлення будинків, транспорту та промисловості. Термін морська енергія охоплює як потужність хвилі - потужність поверхневих хвиль, так і силу припливу і відпливу - отриману з кінетичної енергії великих тіл рухомої води.

Зворотний електродіаліз (*Reverse electrodialysis — RED*) — це технологія виробництва електроенергії шляхом змішування прісної річкової води та солоної морської води у великих енергетичних елементах, призначених для цієї мети; станом на 2016 рік, він тестується в невеликих масштабах (50 кВт). Енергія морського вітру не є формою морської енергії, оскільки енергія вітру походить від вітру, навіть якщо вітрогенератори розміщені над водою. Світовий океан має величезну кількість енергії і близький до багатьох, якщо не до найбільш концентрованого населення. Енергія океану має потенціал забезпечити значну кількість нової відновлюваної енергії у всьому світі.

### Розвиток сонячної енергії

#### Експериментальна сонячна енергія

Концентраційні фотоелектричні системи (CPV) використовують сонячне світло, сконцентроване на фотоелектричних поверхнях, з метою виробництва електричної енергії. На відміну від звичайних фотоелектричних систем, такі системи використовують лінзи та вигнуті дзеркала для фокусування сонячного світла на невеликих, але високоефективних багатоперехідних сонячних батареях. Можуть використовуватися сонячні концентратори всіх сортів, і вони часто встановлюються на сонячному трекері для того, щоб утримувати фокусну точку на клітині, коли сонце рухається по небу. Люмінесцентні сонячні концентратори (у поєднанні з сонячною батареєю PV) також можна розглядати як систему CPV. Концентрована фотоелектрична енергія корисна, оскільки може значно покращити ефективність сонячних батарей PV.

Крім того, більшість сонячних панелей на космічних кораблях також виготовлені з високоефективних багатоперехідних фотоелементів, які отримують електрику від сонячного світла під час роботи у внутрішній Сонячній системі.

Термоелектричні пристрої перетворюють різницю температур між різними матеріалами в електричний струм.

#### Плаваючі сонячні масиви

Плаваючі сонячні батареї - це фотоелектричні системи, які плавають на поверхні резервуарів питної води, кар'єрних озер, зрошувальних каналів або водосховищ. Невелика кількість таких систем існує у Франції, Індії, Японії, Південній Кореї, Великобританії, Сінгапурі та США. Такі системи мають переваги перед фотоелектричними системами на суші. Вартість землі дорожча, і існує менше правил та норм для споруд, побудованих на водоймах, які не використовуються

для відпочинку. На відміну від більшості наземних сонячних установок, плаваючі масиви можуть бути непомітними, оскільки вони приховані від очей громадськості. Вони досягають більшої ефективності, ніж фотоелектричні панелі на суші, оскільки вода охолоджує панелі. Панелі мають спеціальне покриття для запобігання іржі або корозії. У травні 2008 року виноробня Far Niente в Оквіллі, Каліфорнія, стала першою у світі флоатовольтаїчною системою, встановивши 994 сонячних фотоелектричних модулів загальною потужністю 477 кВт на 130 понтонів та плавучі їх на зрошувальному ставку виноробні. Починається будівництво плавучих фотоелектричних ферм у масштабах комунальних підприємств. Куосера розробить найбільшу у світі ферму потужністю 13,4 МВт на водосховищі над дамбою Ямакура в префектурі Тіба з використанням 50000 сонячних панелей. Плавучі ферми, стійкі до солоної води, також будуються для використання в океані. Найбільший оголошений на даний момент плаваючий фотоелектричний проєкт — це електростанція потужністю 350 МВт в регіоні Амазонки, Бразилія.

### Тепловий насос з сонячною батареєю

Тепловий насос — це пристрій, який подає теплову енергію від джерела тепла до пункту призначення, який називається "тепловідвід". Теплові насоси призначені для переміщення теплової енергії, протилежної напрямку спонтанного тепла, шляхом поглинання тепла з холодного простору та випуску його в більш теплий. Тепловий насос з сонячною енергією являє собою інтеграцію теплового насоса та теплових сонячних панелей в єдину інтегровану систему. Зазвичай ці дві технології використовуються окремо (або тільки розміщуючи їх паралельно) для виробництва гарячої води. У цій системі сонячна тепла панель виконує функцію низькотемпературного джерела тепла, а вироблене тепло використовується для живлення випарника теплового насоса. Мета цієї системи — отримати високий КС, а потім виробляти енергію більш ефективним і менш дорогим способом.

Можливе використання будь-якого типу сонячної теплової панелі (лист і трубки, рулонний зв'язок, тепла труба, термопластичні) або гібридна (моно/полікристалічна, тонка плівка) в поєднанні з тепловим насосом. Використання гібридної панелі є кращим, оскільки вона дозволяє покрити частину потреби електроенергії теплового насоса і зменшує споживання електроенергії, а отже, і змінні витрати системи.

### Сонячні літаки

Електричний літак — це літак, який працює на електродвигунах, а не на двигунах внутрішнього згоряння, з електрикою, що надходить від паливних елементів, сонячних батарей, ультраконденсаторів, силових променів або акумуляторів.

В даний час літальні пілотовані електричні літаки в основному є експериментальними демонстраторами, хоча багато невеликих безпілотних літальних апаратів працюють від батарей. Моделі літаків з електричним приводом літають з 1970-х років, один з них - у 1957 році. Перші польоти з електричним приводом, здійснені людьми, були здійснені в 1973 р. Між 2015 і 2016 роками пілотований літак на сонячних батареях, Solar Impulse 2, здійснив кругосвітню подорож навколо Землі.

## Поновлювальні джерела енергії



У 2016 році *Solar Impulse 2* став першим літаком на сонячних батареях, який здійснив навколосвітню подорож.

### Сонячна висхідна башта

Сонячна висхідна башта — це електростанція з відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії з низькотемпературного сонячного тепла. Сонячне світло нагріває повітря під дуже широкою, схожою на теплицю колекторною конструкцією, що оточує центральну основу дуже високої димохідної вежі. Отримана конвекція викликає підйом гарячого повітря у башті під дією димоходу. Цей повітряний потік приводить в дію електроенергію вітрогенератори, розміщені у висхідній трубі димоходу або навколо основи димоходу. Плани щодо розширених версій демонстраційних моделей дозволять істотне виробництво електроенергії та можуть дозволити розробку інших застосувань, таких як видобуток чи перегонка води, а також сільське господарство чи садівництво. Більш досконалою версією подібної тематики є двигун Vortex, який має на меті замінити великі фізичні димоходи вихром повітря, створеним коротшою, менш дорогою конструкцією.

### Космічна сонячна енергія

*Космічна сонячна енергія (Space-based solar power — SBSP)* — це концепція збирання сонячної енергії в космосі та її розподіл на Землі. Потенційні переваги збирання сонячної енергії в космосі включають більшу швидкість збирання та більш тривалий період збору через відсутність розсіюючої атмосфери, а також можливість розміщення сонячного колектора на орбітальному місці, де немає ночі. Значна частина сонячної енергії (55–60%) втрачається на своєму шляху через атмосферу Землі під впливом відбиття та поглинання. Космічні сонячні енергетичні системи перетворюють сонячне світло в мікрохвилі за межами атмосфери, уникаючи цих втрат і простоїв через обертання Землі, але з великими витратами за рахунок виведення матеріалу на орбіту. SBSP вважається формою сталої або екологічно чистої енергії, відновлюваної енергії, і час від часу розглядається серед пропозицій щодо кліматичної інженерії. Це привабливо для тих, хто шукає масштабних рішень щодо антропогенних змін клімату або виснаження викопного палива (наприклад, пікової нафти).



Різні пропозиції SBSP досліджувалися з початку 1970-х років, але жодна з них не є економічно вигідною із сучасною інфраструктурою запуску космосу. Деякі технологи припускають, що це може змінитися у далекому майбутньому, якщо буде створена позаземна промислова база, яка може виготовляти супутники сонячної енергії з астероїдів або місячного матеріалу, або якщо в майбутньому будуть доступні радикальні нові технології запуску у космос, крім ракетобудування.

Крім витрат на впровадження такої системи, SBSP також вводить кілька технологічних перешкод, включаючи проблему передачі енергії з орбіти на поверхню Землі для використання. Оскільки дроти, що проходять від поверхні Землі до орбітального супутника, не є практичними та неможливими за сучасними технологіями, конструкції SBSP зазвичай включають використання певного способу бездротової передачі енергії з супутньою неефективністю перетворення, а також проблеми використання землі для необхідних антенних станцій, щоб отримувати енергію на поверхні Землі. Збираючий супутник буде перетворювати сонячну енергію в електричну на борту, живлячи мікрохвильовий передавач або лазерний випромінювач, і передаватиме цю енергію до колектора (або мікрохвильової ректени) на поверхні Землі. Але величезні розміри приймальних антен, які будуть потрібні, все одно вимагатимуть закупівлі та виділення для цієї мети великих земельних ділянок поблизу кінцевих користувачів. Термін служби космічних колекціонерів перед проблемами тривалого впливу космічного середовища, включаючи деградацію від радіації та пошкодження мікрометеоритами, також може викликати занепокоєння у SBSP.

### Штучний фотосинтез

Штучний фотосинтез — це хімічний процес, який імітує природний біологічний процес фотосинтезу для перетворення сонячного світла, води та вуглекислого газу на вуглеводи та кисень. Термін штучний фотосинтез зазвичай використовується для позначення будь-якої схеми захоплення та зберігання енергії сонячного світла в хімічних зв'язках палива (сонячного палива). Фотокаталітичне розщеплення води перетворює воду в водень і кисень і є важливою темою дослідження штучного фотосинтезу. Відновлення вуглекислого газу на світлі — це ще один вивчений процес, який повторює природну фіксацію вуглецю.

Дослідження цієї теми включають проектування та збирання пристроїв для прямого виробництва сонячного палива, фотоелектрохімію та її застосування у паливних елементах, а також розробку ферментів та фотоавтотрофних мікроорганізмів для виробництва мікробного біопалива та біоводню з сонячного світла.

Дослідники в цій галузі прагнуть розробити молекулярні імітації фотосинтезу, які використовують більш широку область сонячного спектру, використовують каталітичні системи, виготовлені з рясних, недорогих матеріалів, міцних, легко відремонтованих, нетоксичних, стабільних у різних умовах навколишнього середовища та працювати більш ефективно, дозволяючи більшій частині енергії фотонів потрапляти у накопичувальні сполуки, тобто вуглеводи (а не будувати та підтримувати живі клітини).

### Паливо з водоростей

Паливо з водоростей, біопаливо з водоростей або олія з водоростей є альтернативою рідкому викопному паливу, яке використовує водорості як джерело багатих енергією масел. Крім того, паливо з водоростей є альтернативою загальновідомим джерелам біопалива, таким як кукурудза та цукровий очерет.

Виробництво рідкого палива з багатих рослинними маслами сортів водоростей є постійною темою дослідження. Випробовуються різні мікрowodорості, що вирощуються у відкритих чи закритих системах, включаючи деякі системи, які можна встановити на полях, непридатних для сільськогосподарського виробництва та пухлястих землях.

Як і викопне паливо, паливо з водоростей виділяє  $\text{CO}_2$  при спалюванні, але на відміну від викопного палива, паливо з водоростей та інше біопаливо виділяють лише  $\text{CO}_2$  нещодавно вилучено з атмосфери шляхом фотосинтезу в міру зростання водоростей або рослин. Енергетична криза та світова продовольча криза викликали інтерес до водоростей (вирощування водоростей) для виробництва біодизеля та іншого біопалива з використанням земель, непридатних для сільського господарства. Серед привабливих характеристик палива з водоростей те, що їх можна вирощувати з мінімальним впливом на ресурси прісної води, їх можна виробляти з використанням сольових розчинів та стічних вод, мати високу температуру спалаху, біорозкладанні та відносно нешкідливі для навколишнє середовище, якщо воно пролилося. Водорості коштують дорожче за одиницю маси, ніж інші культури біопалива другого покоління через високі капітальні та експлуатаційні витрати, але стверджується, що вони дають від 10 до 100 разів більше палива на одиницю площі

### Інтеграція поновлювальних джерел в енергетичну систему

*Змінна поновлювана енергія (Variable renewable energy — VRE) або переривчасті відновлювані джерела енергії (intermittent renewable energy sources — IRES)* — це відновлювані джерела енергії, які не можуть бути безпосередньо направлені в енергетичну систему через їх мінливий характер, такі як вітроенергетика та сонячна енергія, на відміну від *керованих відновлюваних джерел енергії*, таких як гідроелектростанція або біомаса або *відносно постійні джерела*, такі як геотермальна енергія.

Використання невеликої кількості переривчастої потужності мало впливає на роботу мережі. Використання більшої кількості переривчастої потужності може вимагати оновлення або навіть перебудови інфраструктури мережі. Варіанти поглинання великої частки змінної енергії в мережу включають використання накопичувачів, поліпшення взаємозв'язку між різними джерелами для забезпечення безперервного постачання, використання відправних джерел енергії як гідроелектростанцій та з надмірною потужністю, так що достатня кількість енергії виробляється навіть за несприятливих погодних умов.

Виробництво відновлюваної енергії з деяких джерел, таких як вітер та сонячна енергія, є більш мінливим і географічно більш поширеним, ніж технологія на основі викопного палива та ядерної енергії. Незважаючи на те, що його інтеграція у більш широкую енергетичну систему є можливою, вона призводить до деяких додаткових проблем. Для того, щоб енергосистема залишалася стабільною, можна

провести ряд вимірювань. Впровадження накопичення енергії з використанням широкого спектру технологій відновлюваної енергії та впровадження інтелектуальної мережі, в якій енергія автоматично використовується в момент її виробництва, може зменшити ризики та витрати на впровадження відновлюваної енергії.

Використання невеликої кількості переривчастої потужності мало впливає на роботу мережі. Використання більшої кількості переривчастої потужності може зажадати оновлення або навіть перепланування інфраструктури мережі. Варіанти поглинання великої частки змінної енергії в мережу включають використання накопичувачів, поліпшення взаємозв'язку між різними джерелами для забезпечення безперервного постачання, використання відправних джерел енергії як гідроелектростанцій та з надмірною потужністю, так що достатня кількість енергії виробляється навіть за несприятливих погодних умов.

Поширення відновлюваних джерел електроенергії з переривчастим доступом у більшості електромереж є низьким: глобальне виробництво електроенергії у 2020 році становило 7% вітру та 3% сонячної енергії. Європейські країни, як правило, мають значно більшу частку VRE у своїй змішаній енергетиці: Німеччина — понад 40%, Великобританія — понад 30%. Характеристики змінних відновлюваних джерел включають їх непередбачуваність, мінливість, невеликі розміри, низькі експлуатаційні витрати та те, що вони обмежені певним місцем розташування. Це створює виклик для операторів мережі, які повинні переконатися, що попит і пропозиція узгоджуються. Рішення включають накопичення енергії, відповідь на попит, наявність надлишкових потужностей та з'єднання секторів. Менші мережі можуть бути менш толерантними до високих рівнів проникнення повновольованих джерел.

Відповідність попиту на електроенергію для постачання не є проблемою, характерною для переривчастих джерел енергії. Існуючі електромережі вже містять елементи невизначеності, включаючи раптові та значні зміни попиту та непередбачені поломки електростанцій. Незважаючи на те, що електромережі вже розраховані на певну потужність, що перевищує прогнозований піковий попит для вирішення цих проблем, може знадобитися суттєве оновлення, щоб врахувати великі обсяги переривчастої енергії.

Кілька ключових термінів корисні для розуміння проблеми переривчастих джерел живлення. Ці терміни не стандартизовані, і можуть бути використані варіації. Більшість цих термінів також стосуються традиційних електростанцій.

*Переривчастість або мінливість* - це ступінь коливання джерела живлення. Це має два аспекти: передбачувану мінливість (наприклад, цикл день-ніч) та непередбачувану частину (недосконале місцеве прогнозування погоди). [8] Термін переривчастий може бути використаний для позначення непередбачуваної частини, зі змінною, що стосується передбачуваної частини.

*Диспетчеризація* - це здатність даного джерела живлення швидко збільшувати та зменшувати продуктивність на вимогу. Концепція відрізняється від переривчастості; диспетчеризація - це один із кількох способів, за допомогою яких системні оператори узгоджують пропозицію (потужність генератора) із попитом системи (технічні навантаження).

## Поновлювальні джерела енергії

*Проникнення* в цьому контексті зазвичай використовується для позначення кількості виробленої енергії у відсотках від річного споживання.

*Номінальна потужність або паспортна табличка* означає максимальну потужність генеруючої установки в нормальних умовах експлуатації. Це найпоширеніше число, яке зазвичай виражається у ватах (включаючи кратні, такі як кВт, МВт, ГВт).

*Коефіцієнт потужності, коефіцієнт середньої потужності або коефіцієнт навантаження* - це середня очікувана потужність генератора, як правило, протягом річного періоду. Виражається у відсотках від місткості таблички або у десятковій формі (наприклад, 30% або 0,30).

*Потужність фірми або потужність фірми "гарантовано постачальником* у будь-який час протягом періоду, на який поширюється зобов'язання". [12]

*Кредит потужності*: загалом кількість вихідної інформації від джерела живлення, на яку можна покластися статистично, практично мінімальна потужність протягом більш тривалого періоду, зазвичай виражена у відсотках від номінальної потужності. [13] Якщо джерело електроенергії знаходиться далеко від споживача, наприклад, деяка вітряна енергія в Китаї, також слід враховувати надійність передачі. [14]

*Передбачуваність* — це те, наскільки точно оператор може передбачити генерацію: наприклад, припливна потужність змінюється залежно від припливів і відпливів, але цілком передбачувана, оскільки орбіту Місяця можна точно передбачити, а покращені прогнози погоди можуть зробити енергію вітру більш передбачуваною.

### Регульовані джерела електроенергії

*Регульовані джерела електроенергії (Dispatchable source of electricity)* — це такі джерела електроенергії, які можуть вмикатися оператором до електромереж, або від'єднуватися від них відповідно коливань попиту. Регульовані генератори, можуть змінювати свою вихідну потужність відповідно до потреб.

Такі поновлювальні джерела енергії як вітрові та сонячні електрогенератори не здатні вмикатися, або від'єднуватися до електромережі відповідно до попиту і тому називаються *нерегульованими джерелами електроенергії (Non-dispatchable source of electricity)*.

Інші види відновлюваної енергії, які регулюються без окремого накопичення енергії, — це гідроелектроенергія, біомаса, геотермальна та океанська теплова енергія.

**Тривалість запуску електростанцій.** Регульовані електростанції мають різний час запуску. Найшвидші станції для відвантаження — це гідроелектростанції та електростанції на природному газі. Наприклад, насосна накопичувальна електростанція на Динорвіг потужністю 1728 МВт може досягти повної потужності за 16 секунд. Хоча теоретично відправляються, вугільні та атомні теплові електростанції призначені для роботи як електростанції з базовим навантаженням, і для їх відключення, а потім для повторного включення може знадобитися години, а іноді і дні.

Накопичувачі енергії загального користування можуть компенсувати періодичну вітрову та сонячну електроенергію. Протягом 2017 року енергія накопичувачів сонячної енергії стала дешевшою. Раніше широкомасштабні технології зберігання, крім гідротехнічних, були недоступні.



*Гідроелектростанція на базі водосховища є регульованим джерелом електроенергії*

Основні переваги регульованих електростанцій включають:

- забезпечення резерву обертання (регулювання частоти)
- балансування електроенергетичної системи (навантаження слідує)
- оптимізація диспетчеризації економічних поколінь (заслуга)
- сприяє усуненню заторів у мережі (повторна відправка) [необхідне

роз'яснення]

Ці можливості регульованих генераторів дають змогу:

- Відповідність навантаження — повільні зміни споживання електроенергії між, наприклад, вночі та вдень, також вимагають змін у постачанні, оскільки систему потрібно постійно збалансувати.

- Пікове узгодження — короткі періоди часу, протягом яких попит перевищує обсяг виробництва установок, що відповідають навантаженню; генератори, здатні задовольнити ці піки попиту, реалізується за рахунок швидкого розгортання регульованих джерел.

- Часи початку роботи — періоди, протягом яких використовується альтернативне джерело, щоб поповнити час виконання, необхідний великим електростанціям, що працюють на вугіллі або природному газі, для досягнення повної потужності; ці альтернативні джерела живлення можуть бути розгорнуті за лічені секунди або хвилини для адаптації до швидких потрясінь у попиті чи пропозиції, які не можуть бути задоволені генераторами максимальної відповідності.

- Регулювання частоти або переривчасті джерела живлення — зміни в електроенергії, що надходить у систему, можуть змінити якість та стабільність самої системи передачі через зміну частоти переданої електроенергії; поновлювані джерела, такі як вітер та сонячна енергія, є періодичними і потребують гнучких джерел енергії, щоб згладити зміни у виробництві енергії.

- Резервне копіювання для генераторів базового навантаження - Атомні електростанції, наприклад, оснащені системами безпеки ядерних реакторів, які можуть зупинити вироблення електроенергії менш ніж за секунду у разі надзвичайної ситуації.

Дослідження 2018 року запропонувало нову класифікацію джерел виробництва енергії, яка пояснює швидке зростання проникнення змінних відновлюваних джерел енергії, що призводить до високих цін на енергію в періоди низької доступності:

- Змінна відновлювана енергія "для економії палива", яка має майже нульові змінні витрати та нульові витрати на паливо за рахунок використання енергії вітру, сонця та гідроенергії на річці. Зі значною часткою цих джерел, "потреби в потужності визначаються періодами з низькою доступністю змінних поновлюваних джерел енергії (VRE)", і тому їх запропонована роль полягає в тому, щоб замінити інші джерела витрат з високими змінними у періоди, коли вони доступні.

- "Швидкі спалахи" — це джерела енергії, які можна миттєво підключати у мережу у періоди високого попиту та високих цін на енергоносії, але вони погано працюють протягом тривалих безперервних операцій. Вони включають накопичення енергії (акумулятори), гнучкий попит та реагування на попит.

- "Тверді" низьковуглецеві джерела, які забезпечують стабільне постачання енергії протягом усіх сезонів і періодів до тижнів або місяців, включаючи атомну енергетику, гідроелектростанції з великими резервуарами, викопне паливо з захопленням вуглецю, геотермальне та біопаливо.

### Рішення для інтеграції переривчастих відновлюваних джерела енергії у загальну електромережу

Використання переривчастих джерел ґрунтується на електромережах, якими ретельно керують, наприклад, з використанням високоєфективної генерації, здатної відключитись, коли джерело з перервами починає генерувати електроенергію, і успішно запускатись без попередження, коли переривчасті генератори припиняють генерувати.

Витісненою відвантажуваною генерацією може бути вугілля, природний газ, біомаса, ядерна, геотермальна або накопичувальна гідроенергетика. Замість того, щоб запускати та зупиняти ядерні чи геотермальні, їх дешевше використовувати як постійну потужність базового навантаження. Будь-яка електроенергія, що генерується понад попит, може витіснити паливо для опалення, перетворити її на зберігання або продати в іншу мережу. Біопаливо та звичайні гідроенергетики можна зберегти на потім, коли переривчасті речовини не виробляють електроенергію. Альтернативи спалюванню вугілля та природного газу, які виробляють меншу кількість парникових газів, можуть зрештою перетворити викопне паливо на

багатожильний актив, який залишається в землі. Високо інтегровані мережі надають перевагу гнучкості та продуктивності порівняно з вартістю, що призводить до збільшення кількості заводів, які працюють меншу кількість годин, та зменшення коефіцієнтів потужності.

Усі джерела електричної енергії мають певну ступінь мінливості, як і моделі попиту, які регулярно викликають великі коливання кількості електроенергії, яку постачальники подають у мережу. Там, де це можливо, процедури експлуатації мереж розроблені так, щоб відповідати попиту та пропозиції на високому рівні надійності, а інструменти впливу на попит та пропозицію добре розроблені. Впровадження великих обсягів генерування електроенергії з великою мінливістю може вимагати зміни існуючих процедур та додаткових інвестицій.

Потужність надійного джерела відновлюваного енергопостачання може бути досягнута шляхом використання резервної або додаткової інфраструктури та технологій, з використанням змішаних відновлюваних джерел енергії для виробництва електроенергії, що перевищує переривчасте середнє значення, що може бути використано для задоволення регулярних та непередбачуваних потреб у поставці. Крім того, накопичення енергії для заповнення перебоїв у постачанні або для надзвичайних ситуацій може бути частиною надійного електропостачання.

На практиці, коли вихідна потужність вітру змінюється, частково завантажені звичайні установки, які вже присутні для реагування та резервування, регулюють свою потужність для компенсації. Хоча низькі проникнення переривчастої потужності можуть використовувати існуючі рівні реакції та резерву обертання, більші загальні коливання на більш високих рівнях проникнення потребують додаткових резервів або інших засобів компенсації.

### Оперативне резервування мережі

Усі керовані електромережі вже мають існуючий робочий та «обертовий» резерв для компенсації наявних невизначеностей у електромережі. Додавання переривчастих ресурсів, таких як вітер, не вимагає 100% "резервного копіювання", оскільки операційні резерви та вимоги до балансування розраховуються на загальносистемній основі, а не виділяються на певну генеруючу установку.

Деякі газові або гідроелектростанції частково завантажуються, а потім контролюються для зміни зі зміною попиту або для заміни швидко втраченої генерації. Здатність змінюватись у міру зміни попиту називається "відповіддю". Здатність швидко замінювати втрачену генерацію, як правило, протягом 30 секунд до 30 хвилин, називається "*запасом обертання*". Запас обертання визначається як незавантажений генератор, яке обертається синхронно з мережею комунальних служб, тобто генератор, що обертається зі швидкістю, яка буде виробляти потужність точно на тій же частоті, що і частота мережі.

Як правило, теплові установки, що працюють як пікові установки, будуть менш ефективними, ніж якщо б вони працювали як базове навантаження. Гідроелектростанції з ємністю зберігання (наприклад, традиційна конфігурація греблі) можуть експлуатуватися як базові навантажувальні або пікові установки.

Мережі можуть укладати контракти для мережних акумуляторних установок, які забезпечують негайну доступну потужність протягом години або близько

того, що дає час для запуску інших генераторів у разі збою, і значно зменшує необхідний запас обертання.

### Реагування на попит

**Реагування на попит** (*Demand response*) — це зміна споживання енергії для кращого узгодження з пропозицією. Така стратегія може мати форму вимкнення навантажень або поглинання додаткової енергії для виправлення дисбалансу попиту та пропозиції. У американських, британських та французьких системах були широко створені стимули для використання цих систем, такі як вигідні ставки або допомога у витратах на капітал, заохочуючи споживачів з великим навантаженням виводити їх з мережі в разі нестачі потужностей або навпаки збільшувати навантаження, коли є надлишок.

Деякі види контролю навантаження дозволяють електроенергетичній компанії віддалено вимикати навантаження, якщо є недостатня потужність. У Франції великі користувачі, такі як CERN, скорочують споживання електроенергії відповідно до вимог системного оператора - EDF за заохоченням тарифу EJP.

Управління попитом на енергію відноситься до стимулів для коригування використання електроенергії, таких як підвищення тарифів у години пік. Змінні ціни на електроенергію в режимі реального часу можуть спонукати користувачів коригувати використання, щоб скористатися періодами, коли доступна дешева електроенергія, та уникнути періодів, коли вона є дефіцитною та дорожчою. Деякі потужності, такі як опріснення, електричні котли та промислові холодильні установки, можуть зберігати свою продукцію (воду та тепло). Ці "умовно-навантажувальні потужності" можуть використовувати переваги "вибухової електрики", коли вона є.

Миттєве скорочення попиту. Більшість великих систем також мають категорію навантажень, які миттєво відключаються при нестачі генерації за певним взаємовигідним контрактом. Це може дати миттєве зменшення (або збільшення) навантаження.

### Географічна диверсифікація та доповнювальні технології

Мінливість продуктивності однієї вітряної турбіни може бути великою. Поєднання будь-якої додаткової кількості турбін (наприклад, у вітровій електростанції) призводить до менших статистичних коливань, якщо кореляція між потужністю кожної турбіни незначна, а кореляції завжди незначні через відстань між кожною турбіною. Так само географічно віддалені вітрові турбіни або вітрові електростанції мають менші кореляції, зменшуючи загальну мінливість. Оскільки енергія вітру залежить від погодних систем, існує обмеження на користь такого географічного різноманіття для будь-якої енергетичної системи.

Кілька вітрових електростанцій, що розкидані по широкій географічній зоні і з'єднані між собою, виробляють електроенергію більш постійно і з меншою мінливістю, ніж невеликі установки. Виробництво вітру можна з певною мірою впевненості прогнозувати, використовуючи прогнози погоди, особливо за великою кількістю турбін/ферм. Очікується, що здатність прогнозувати вітрову потужність з часом зростатиме у міру збору даних, особливо з нових установок.



Електроенергія, вироблена з сонячної енергії, має тенденцію врівноважувати коливання запасів, вироблених вітром. Зазвичай вітер найбільший вночі та під час похмурої або штормової погоди, а у ясні дні з меншим вітром більше сонця. Крім того, енергія вітру часто має пік у зимовий сезон, тоді як сонячна енергія має пік у літній сезон; поєднання вітру та сонячної енергії зменшує потребу в резервній потужності.

У деяких місцях попит на електроенергію може мати високу кореляцію з потужністю вітру, особливо там, де холодні температури впливають на споживання електроенергії (оскільки холодне повітря густіше і несе більше енергії).

Допустиме проникнення мінливих поновлювальних джерел може бути збільшено за рахунок подальших інвестицій у енергетику, що працює в режимі очікування. Наприклад, у деякі дні може вироблятися 80% енергії за рахунок переривчастого вітру, а у безвітряні дні замінювати 80% енергії, що виробляється з природного газу, біомаси та гідроенергією.

### **Інтеграція мереж на міжнародному рівні**

Часто буває можливим експортувати енергію до сусідніх мереж у разі надлишку, а при необхідності імпортувати енергію. Ця практика поширена в Західній Європі та Північній Америці. Інтеграція з іншими мережами може знизити ефективну концентрацію змінної потужності: наприклад, високе проникнення Данії у VRE у контексті німецьких/голландських/скандинавських мереж, з якими вона має взаємозв'язки, є значно нижчою у загальній системі. Пікові установки або гідроелектроенергія з накопиченням, які компенсують мінливість, можуть використовуватися в різних країнах.

Можливості інфраструктури передачі електроенергії, можливо, доведеться істотно збільшити для підтримки планів експорту/імпорту. Частина енергії втрачається при передачі. Економічна цінність експорту змінної потужності частково залежить від здатності експортної мережі забезпечувати мережу-імпортер корисною потужністю у корисний час за привабливою ціною.

### **Накопичення електричної енергії**

Накопичення електричної енергії — це сукупність методів, що використовуються для зберігання електричної енергії. Електрична енергія накопичується в періоди, коли виробництво (особливо з переривчастих джерел, таких як енергія вітру, припливні відпливи, сонячна енергія) перевищує споживання, і повертається до мережі, коли виробництво падає нижче споживання. Гідроелектроенергія, отримана від перекачування води, складає більше 90% всього накопичувача електроенергії. Витрати на літій-іонні акумулятори стрімко падають, і вони все частіше розгортають допоміжні послуги мережі та для домашнього зберігання. Крім того, енергію можна зберігати у водневих паливних елементах.

Накопичення енергії — це захоплення енергії, виробленої за один раз, для використання пізніше для зменшення дисбалансу між попитом на енергію та виробництвом енергії. Пристрій, що зберігає енергію, зазвичай називають акумулятором. Енергія має різні форми, включаючи радіацію, хімічний, гравітаційний потенціал, електричний потенціал, електрику, підвищену температуру, приховану

## Поновлювальні джерела енергії

теплоту та кінетичну. Збереження енергії передбачає перетворення енергії з форм, які важко зберігати, у більш зручні або економічно складні форми.

Деякі технології забезпечують короточасне зберігання енергії, а інші можуть витримати набагато довше. Головними накопичувачами енергії у мережах в даний час є гідроелектростанції, як традиційні, так і насосні. Мережеве накопичення енергії — це сукупність методів, що широко використовуються для накопичення енергії в електромережі.

Поширеними прикладами накопичення енергії є:

- акумуляторна батарея, яка зберігає хімічну енергію, легко конвертовану в електричну для роботи мобільного телефону;
- гідроелектрична гребля, яка зберігає енергію у пласті як гравітаційну потенціальну енергію;
- ємності для зберігання льоду, які зберігають лід, заморожений за рахунок дешевшої енергії вночі, щоб задовольнити піковий денний попит на охолодження.

Викопні види палива, такі як вугілля та бензин, зберігають давню енергію, отриману від сонячного світла організмами, які згодом загинули і з часом потім були перетворені на ці види палива. Харчування (яке виробляє енергію за тим же процесом, що і викопне паливо) — це форма енергії, що зберігається у хімічній формі.

Високі витрати та обмежений термін служби все ще роблять батареї "слабкою заміною" для регульованих джерел живлення (*Dispatchable source of electricity*) і не в змозі покрити змінні об'єми відновлюваної енергії, що тривають протягом днів, тижнів або місяців. У моделях мереж з високою часткою переривчастих поновлювальних джерел енергії (VRE) надмірна вартість зберігання, як правило, домінує над витратами всієї мережі — наприклад, лише в Каліфорнії 80% частки VRE потребуватиме 9,6 ТВт-год зберігання, але на 100% потрібно 36,3 ТВт-год. Станом на 2018 рік США мали лише 150 ГВт-год накопичувач, переважно в насосному сховищі та невелику частку в акумуляторах. Згідно з іншим дослідженням, для забезпечення 80% попиту США від VRE потрібна розумна мережа, що охоплює всю країну, або накопичувач, здатний забезпечити всю систему протягом 12 годин, обидві за вартістю, що оцінюється у 2,5 трильйона доларів.

## Тенденції впровадження поновлювальної енергетики

### Комерціалізація відновлюваних джерел енергії

Комерціалізація відновлюваних джерел енергії передбачає впровадження трьох поколінь технологій відновлюваної енергії, які існують більше 100 років. Технології першого покоління, які вже зрілі та економічно конкурентоспроможні, включають біомасу, гідроелектроенергію, геотермальну енергію та тепло. Технології другого покоління є ринковими та впроваджуються в даний час; вони включають сонячне опалення, фотоелектрику, вітрову енергію, сонячні теплові електростанції та сучасні форми біоенергетики. Технології третього покоління потребують постійних зусиль у галузі досліджень та розробок, щоб внести великий

внесок у глобальному масштабі та включати передову газифікацію біомаси, геотермальну енергію з гарячої сухої породи та енергію океану. Станом на 2012 рік на відновлювані джерела енергії припадає близько половини встановленої нової номінальної електричної потужності і витрати продовжують падати. [4]

Державна політика та політичне лідерство допомагають "вирівняти конкурентні умови" та сприяти більш широкому прийняттю технологій відновлюваної енергії. Такі країни, як Німеччина, Данія та Іспанія, стали лідерами у впровадженні інноваційної політики, яка зумовила більшу частину зростання за останнє десятиліття. Станом на 2014 рік Німеччина зобов'язується перейти до переходу "Energiewende" до сталої енергетичної економіки, а Данія — до 100% відновлюваної енергії до 2050 року. Зараз 144 країни мають цілі політики щодо відновлюваних джерел енергії.

Відновлювана енергія продовжила стрімке зростання у 2015 році, надаючи багато переваг. Було встановлено новий рекорд за встановленою вітровою та фотоелектричною потужністю (64 ГВт та 57 ГВт) та новий максимум у 329 мільярдів доларів США для глобальних інвестицій у відновлювані джерела енергії. Ключовою перевагою, яку приносить це зростання інвестицій, є зростання робочих місць. Найбільшими країнами для інвестицій за останні роки були Китай, Німеччина, Іспанія, США, Італія та Бразилія.

Занепокоєння щодо зміни клімату також стимулюють зростання економіки відновлюваних джерел енергії. Згідно з прогнозом *Міжнародного енергетичного агентства* (International Energy Agency — IEA) на 2011 рік, сонячні електростанції можуть виробляти більшість світової електроенергії протягом 50 років, зменшуючи викиди шкідливих парникових газів.

Відновлювана енергетика була ефективнішою у створенні робочих місць, ніж вугілля чи нафта у Сполучених Штатах. У 2016 році зайнятість у цьому секторі зросла на 6% у США, тоді як зайнятість у нафтогазовому секторі скоротилася на 18%. У 2016 році у всьому світі на відновлюваних джерелах енергії працює близько 8,1 мільйона людей.

### **Обґрунтування відновлюваних джерел енергії**

Зміна клімату, забруднення та нестача енергії є серйозними проблемами, і для їх вирішення потрібні серйозні зміни в енергетичній інфраструктурі. Технології поновлюваних джерел енергії мають важливий внесок у портфель поставок енергії, оскільки вони сприяють світовій енергетичній безпеці, зменшують залежність від викопного палива, а деякі також надають можливості для зменшення викидів парникових газів. Викопне паливо, що порушує клімат, замінюється чистими, стабілізуючими клімат, невичерпними джерелами енергії: перехід від вугілля, нафти та газу до вітрової, сонячної та геотермальної енергії триває. У старій економіці енергію виробляли шляхом спалювання чогось — нафти, вугілля чи природного газу — що призвело до викидів вуглецю, які визначили нашу економіку. Нова економія енергії використовує енергію вітру, енергію, що надходить від Сонця, і тепла всередині самої землі.

У міжнародних дослідженнях громадської думки існує сильна підтримка різноманітних методів вирішення проблеми постачання енергії. Ці методи

## Поновлювальні джерела енергії

включають просування відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія, вимагання від комунальних підприємств використання більшої кількості відновлюваних джерел енергії та надання податкових пільг для заохочення розвитку та використання таких технологій. Очікується, що інвестиції у відновлювані джерела енергії окуляються економічно в довгостроковій перспективі.

Країни -члени ЄС висловили підтримку амбітним цілям відновлюваної енергії. У 2010 році Євробарометр опитував двадцять сім держав-членів ЄС щодо цілі "збільшити частку відновлюваної енергії в ЄС на 20 відсотків до 2020 року". Більшість людей у всіх двадцяти семи країнах або схвалили ціль, або закликали її йти далі. У всьому ЄС 57 відсотків вважали запроповану мету «приблизно правильною», а 16 відсотків - «занадто скромною». Для порівняння, 19 % сказали, що це "занадто амбітно".

Станом на 2011 рік з'явилися нові докази того, що існують значні ризики, пов'язані з традиційними джерелами енергії, і що необхідні серйозні зміни у поєднанні енергетичних технологій:

Кілька глобальних трагедій видобутку підкреслили людські жертви ланцюга постачання вугілля. Нові ініціативи ЕРА, спрямовані на токсини повітря, вугільну золу та викиди стічних вод, підкреслюють вплив вугілля на навколишнє середовище та вартість їх усунення за допомогою технологій контролю. Використання методу фрекінгу при розвідці природного газу перебуває під пильною увагою, що свідчить про забруднення ґрунтових вод та викиди парникових газів. Зростає занепокоєння щодо величезної кількості води, що використовується на вугільних та атомних електростанціях, особливо в регіонах країни, які стикаються з нестачею води. Події на атомній електростанції в Фукусімі поновили сумніви щодо можливості безпечної експлуатації великої кількості атомних електростанцій у довгостроковій перспективі. Крім того, кошторис витрат на ядерні установки "наступного покоління" продовжує зростати, і кредитори не бажають фінансувати ці установки без гарантій платників податків.

У Звіті про глобальний стан RENE21 за 2014 рік говориться, що відновлювані джерела енергії — це не лише джерела енергії, а способи вирішення нагальних соціальних, політичних, економічних та екологічних проблем:

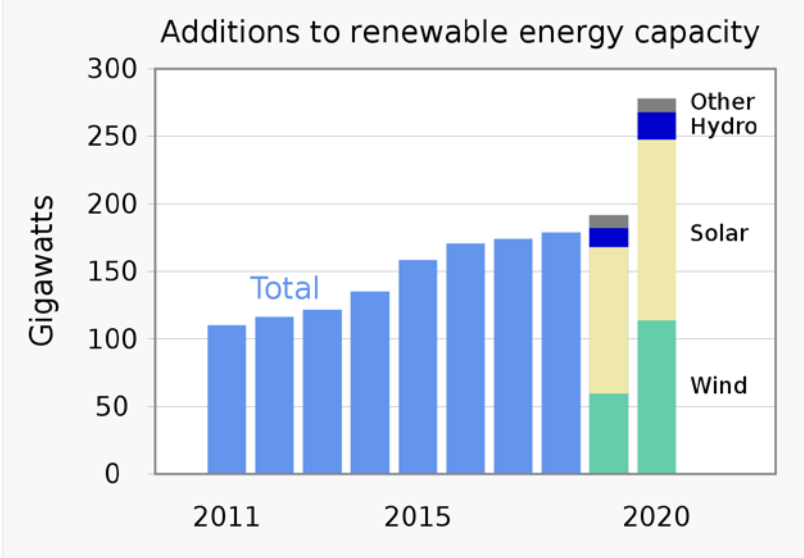
Сьогодні відновлювані джерела енергії розглядаються не лише як джерела енергії, а й як інструменти для вирішення багатьох інших нагальних потреб, зокрема: підвищення енергетичної безпеки; зменшення впливу на здоров'я та навколишнє середовище, пов'язане з викопною та ядерною енергією; зменшення викидів парникових газів; покращення можливостей освіти; створення робочих місць; скорочення бідності; та підвищення гендерної рівності. Відновлювані джерела енергії увійшли в мейнстрім.

### Зростання відновлюваних джерел енергії

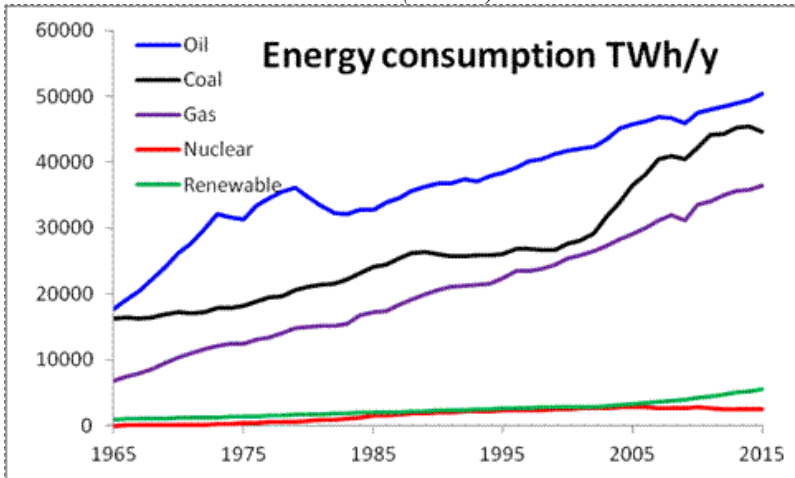
У 2008 році вперше в Європейському Союзі та Сполучених Штатах було додано більше відновлюваної енергії, ніж звичайної енергетичної потужності, демонструючи "фундаментальний перехід" світових енергетичних ринків до відновлюваних джерел енергії, згідно з звітом, опублікованим RENE21. RENE21 (*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*) — це аналітичний центр та

## Розділ 0

багатостороння група управління, яка зосереджена на політиці відновлюваних джерел енергії, що базується в Парижі. У 2010 році відновлювані джерела електроенергії склали приблизно третину новозбудованих виробничих потужностей.



*Збільшення потужностей відновлюваної енергії в 2020 році збільшилося більш ніж на 45% у порівнянні з 2019 роком, включаючи 90% зростання світової потужності вітру (зелене) та 23% розширення нових сонячних фотоелектричних установок (жовте).*



*Порівнюючи тенденції у світовому споживанні енергії, зростання відновлюваної енергії до 2015 року є зеленою лінією*

## Поновлювальні джерела енергії

До кінця 2011 року загальна потужність відновлюваної енергії у всьому світі перевищила 1360 ГВт, що на 8% більше. На відновлювані джерела електроенергії припадає майже половина з 208 ГВт потужностей, доданих у всьому світі протягом 2011 року. Вітри та сонячні фотоелектричні батареї (PV) становили майже 40% та 30%. Згідно зі звітом REN21 за 2014 рік, відновлювані джерела енергії внесли 19 % у споживання енергії та 22 % у виробництво електроенергії у 2012 та 2013 роках відповідно. Це споживання енергії ділиться на 9%, що надходить від традиційної біомаси, 4,2% як теплову енергію (не біомасу), 3,8% гідроелектроенергії та 2% електроенергії від вітру, сонячної, геотермальної та біомаси.

Протягом п'яти років, з кінця 2004 по 2009 рік, у всьому світі потужності відновлюваної енергії зростали на 10–60 відсотків щорічно для багатьох технологій, тоді як фактичне виробництво в цілому зросло на 1,2%. У 2011 році заступник генерального секретаря ООН Ахім Штайнер сказав: "Продовження зростання в цьому основному сегменті зеленої економіки відбувається не випадково. Поєднання урядових цілей, політичної підтримки та стимулюючих фондів підтримує зростання відновлюваної промисловості та досягнення необхідної трансформації нашої глобальної енергетичної системи в межах досяжності". Він додав: "Відновлювані джерела енергії розширюються як з точки зору інвестицій, проектів, так і географічного поширення. Цим вони роблять все більший внесок у боротьбу зі зміною клімату, протидію енергетичній бідності та енергетичній нестабільності". [34]

Згідно з прогнозом Міжнародного енергетичного агентства на 2011 рік, сонячні електростанції можуть виробляти більшість світової електроенергії протягом 50 років, значно зменшуючи викиди парникових газів, які завдають шкоди навколишньому середовищу. МЕА заявило: "Фотоелектричні та сонячно-теплові установки можуть задовольнити більшість світових потреб у електроенергії до 2060 року-та половину всіх потреб у енергії-за допомогою вітрових, гідроенергетичних та біомасових установок, які забезпечуватимуть більшість генерації, що залишилася". "Фотоелектрична та концентрована сонячна енергія разом можуть стати основним джерелом електрики".

### Три покоління технологій

Відновлювана енергія включає ряд джерел та технологій на різних етапах комерціалізації. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) визначило три покоління технологій відновлюваної енергії, які сягають понад 100 років:

"Технології першого покоління, що виникли в результаті промислової революції в кінці 19 століття, включають гідроенергетику, спалювання біомаси, геотермальну енергію та тепло. Ці технології досить широко використовуються. [3]

Технології другого покоління включають сонячне опалення та охолодження, енергію вітру, сучасні форми біоенергетики та сонячну фотоелектрику. Зараз вони виходять на ринки в результаті досліджень, розробок та демонстраційних (RD&D) інвестицій з 1980 -х років. Початкові інвестиції були спричинені проблемами енергетичної безпеки, пов'язаними з нафтовою кризою 1970 -х років, але незмінна привабливість цих технологій зумовлена, принаймні частково, екологічною вигодою. Багато технологій відображають значний прогрес у матеріалах. [3]

Технології третього покоління все ще розробляються і включають передову газифікацію біомаси, технології біопереробки, концентрацію сонячної теплової енергії, геотермальну енергію з гарячої сухої породи та енергію океану. Досягнення нанотехнологій також жовуть зіграти важливу роль".

Технології першого покоління добре зарекомендували себе, технології другого покоління виходять на ринки, а технології третього покоління значною мірою залежать від довгострокових зобов'язань щодо досліджень та розробок, де державний сектор відіграє певну роль.

### Прогнози на майбутнє

Технології відновлюваної енергетики дешевшають завдяки технологічним змінам та завдяки перевагам масового виробництва та конкуренції на ринку. У звіті 2018 року від Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) було встановлено, що вартість поновлюваних джерел енергії швидко падає і, ймовірно, до 2020 року буде дорівнює або меншій вартості невідновлюваних джерел енергії, таких як вкопне паливо. Витрати на сонячну енергію впали на 73% з 2010 р., а витрати на вітер на березі за той самий період часу впали на 23%.

Поточні прогнози щодо майбутніх витрат на відновлювані джерела енергії різняться. EIA (*Energy Information Administration*) прогнозує, що майже дві третини чистого приросту потужностей до електроенергії будуть надходити з відновлюваних джерел енергії до 2020 року через сукупну політичну перевагу місцевого забруднення, декарбонізації та диверсифікації енергії.

Згідно зі звітом Bloomberg New Energy Finance за 2018 рік, очікується, що вітрова та сонячна енергія генеруватимуть приблизно 50% світових потреб у енергії до 2050 року, тоді як електростанції з вугіллям, як очікується, скоротяться лише до 11%. Гідроелектроенергія та геотермальна електроенергія, вироблена на сприятливих ділянках, зараз є найдешевшим способом виробництва електроенергії. Витрати на відновлювану енергію продовжують падати, а **рівень вартості електроенергії** (*levelised cost of electricity — LCOE*) знижується за рахунок вітроенергетики, сонячної фотоелектричної (PV), концентрованої сонячної енергії (CSP) та деяких технологій біомаси. Відновлювана енергія також є найбільш економічним рішенням для нових потужностей, пов'язаних з мережею, у районах з хорошими ресурсами. Зі зниженням вартості відновлюваної енергії збільшується сфера економічно вигідних застосувань. Відновлювані технології зараз часто є найбільш економічним рішенням для нових генеруючих потужностей. Там, де нафта є переважним джерелом виробництва електроенергії (наприклад, на островах, поза мережею та в деяких країнах), сьогодні майже завжди існує більш дешева відновлювана енергетика.

### Політика підтримки відновлюваної енергетики

Політика підтримки відновлюваної енергетики була життєво важливою для їх розширення.

**Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії** (International Renewable Energy Agency — IRENA) — це міжурядова організація, яка сприяє

впровадженню відновлюваної енергії у всьому світі. Вона спрямована на надання конкретних політичних порад та сприяння створенню потенціалу та передачі технологій. IRENA була створена в 2009 році 75 країнами, що підписали статут IRENA. Станом на квітень 2019 року IRENA налічує 160 держав -членів. Відновлювані джерела енергії здатні підняти найбідніші країни до нових рівнів процвітання. ООН розпочала ініціативу “Стала енергетика для всіх” для покращення доступу до енергетики, ефективності та впровадження відновлюваної енергії.

Паризька угода про зміну клімату 2015 року спонукала багато країн до розробки або вдосконалення політики у галузі відновлюваних джерел енергії. У 2017 році загалом 121 країна адаптувала певну форму політики відновлюваних джерел енергії. Національні цілі існували у 176 країнах. Крім того, існує також широкий спектр політики на державному, провінційному та місцевому рівнях. [97] Деякі комунальні служби допомагають планувати або встановлювати модернізацію житла.

Багато національних, державних та місцевих органів влади створили зелені банки. Зелений банк — це квазі-державна фінансова установа, яка використовує державний капітал для залучення приватних інвестицій у технології чистої енергії. Зелені банки використовують різноманітні фінансові інструменти для подолання ринкових розривів, які перешкоджають впровадженню чистої енергії. Американські військові також зосередилися на використанні відновлюваного палива для військових автомобілів. На відміну від викопного палива, відновлювані види палива можна виробляти в будь-якій країні, створюючи стратегічну перевагу. Американські військові вже взяли на себе зобов'язання 50% споживання енергії надходити з альтернативних джерел.

### Концепція повної (100%) поновлювальної енергії

Концепція повної (100%) поновлювальної енергії — це стан енергетики, де все споживання енергії надходить із відновлюваних джерел енергії. Намагання використовувати 100% відновлювану енергію для електроенергії, опалення/охолодження та транспорту мотивовані змінами клімату, забрудненням та іншими екологічними проблемами, а також проблемами економічної та енергетичної безпеки. Перенесення загального світового постачання первинної енергії на відновлювані джерела вимагає переходу енергетичної системи, оскільки більшість сьогодишньої енергії одержують із невідновлюваних викопних видів палива. 100% відновлювана енергія в країні, як правило, є більш складною метою, ніж вуглецевий нейтралітет. Останнє є ціллю пом'якшення клімату, політично вирішеною багатьма країнами, а також може бути досягнута шляхом збалансування загального вуглецевого сліду країни (не тільки викидів від енергії та палива) з видаленням вуглекислого газу та проектами вуглецю за кордоном. Визначення 100% відновлюваної енергії та чистого нуля парникових газів мають політичний характер і змінюються залежно від місця та часу.

Однак останні дослідження показують, що глобальний перехід до 100% відновлюваної енергії у всіх секторах - електроенергетиці, тепловій енергії, транспорті та опрісненні задовго до 2050 року можливий. Існуючі технології, включаючи зберігання, здатні забезпечувати надійне постачання енергії щогодини протягом



року. Стійка енергетична система є більш ефективною та економічно ефективною, ніж існуюча система. У своєму спеціальному звіті за 2011 р. Міжурядова група експертів зі зміни клімату вже зазначила, що існує декілька фундаментальних технологічних обмежень для інтеграції портфеля технологій відновлюваної енергії для задоволення більшості загального світового попиту на енергію. Використання поновлюваних джерел енергії зросло швидше, ніж передбачали навіть адвокати. Глобальний технолог інтелектуальних мереж Стів Хой винайшов концепцію "True Zero" на відміну від "Net Zero", щоб виразити нові можливості відстеження електроенергії, щоб забезпечити цілодобове 100% використання поновлюваних джерел енергії. [10] Однак, починаючи з 2019 року, він повинен рости в шість разів швидше, щоб обмежити глобальне потепління до 2°C.

Згідно з оглядом 181 рецензованих статей про 100% відновлювану енергію, які були опубліковані до 2018 року, "[більшість усіх публікацій висвітлює технічну доцільність та економічну життєздатність 100% систем RE". Хоча є ще багато публікацій, які зосереджуються лише на електроенергії, зростає кількість документів, що охоплюють різні галузі енергетики та інтегровані енергосистеми, пов'язані з секторами. Цей міжгалузевий, цілісний підхід розглядається як важлива особливість 100% відновлюваних енергетичних систем і ґрунтується на припущенні, "що найкращі рішення можна знайти, лише якщо зосередитись на синергії між секторами" енергетичної системи, наприклад електроенергії, тепла, транспорту чи промисловості.

Основними бар'єрами для широкого впровадження широкомасштабних відновлюваних джерел енергії та низьковуглецевих енергетичних стратегій вважаються насамперед соціальні та політичні, а не технологічні чи економічні. Згідно з доповіддю Post Carbon Pathways за 2013 р., у якій було розглянуто багато міжнародних досліджень, ключовими перешкодами є: заперечення зміни клімату, лобі викопного палива, політична бездіяльність, нестабільне споживання енергії, застаріла енергетична інфраструктура та фінансові обмеження.

У 2014 році відновлювані джерела, такі як вітер, геотермальна, сонячна енергія, біомаса та спалені відходи, забезпечували 19% загальної спожитої енергії у всьому світі, причому приблизно половина цієї надходила від традиційного використання біомаси [21]. Найбільшим сектором з точки зору споживання енергії є електроенергія з часткою відновлюваних джерел 22,8%, більшість з яких надходить з гідроенергетики з часткою 16,6%, за якою йде вітер з 3,1%. Станом на 2018 рік, згідно з REN21, трансформація набирає швидкість у секторі електроенергетики, але необхідні термінові дії у сфері опалення, охолодження та транспорту. У всьому світі є багато місць із мережами, які працюють майже виключно на відновлюваній енергії. На національному рівні щонайменше 30 країн вже мають відновлювану енергію, що забезпечує понад 20% поставок енергії.

### **Дебати щодо відновлюваних джерел енергії**

Виробництво відновлюваної електроенергії з таких джерел, як вітроенергія та сонячна енергія, є змінним, що призводить до зменшення коефіцієнта потужності та потребує або накопичення енергії потужності, рівної загальній її потужності,

або джерел енергії базового навантаження з джерел, що не перериваються, таких як гідроенергетика, викопне паливо або ядерної енергетики.

Оскільки густина електроенергії відновлюваних джерел енергії на площу суші у кращому випадку на три порядки менша, ніж викопна чи ядерна енергія, електростанції з відновлюваних джерел, як правило, займають тисячі гектарів, викликаючи екологічні проблеми та спротив місцевих мешканців, особливо в густонаселених країнах. Сонячні електростанції конкурують з орними землями та заповідниками, тоді як берегові вітрові електростанції стикаються з протидією через естетичні проблеми та шум, що впливає як на людей, так і на дику природу. У Сполучених Штатах проєкт «Мис Массачусетсу на мисі» затримувався на роки частково через естетичні проблеми. Однак жителі інших районів виявилися більш позитивними.

Нещодавно урядовий документ Великої Британії стверджує, що "проєкти, як правило, мають більший успіх, якщо вони мають широку громадську підтримку та згоду місцевих громад. Це означає, що громади мають право висловлювати свою думку та робити ставку". У таких країнах, як Німеччина та Данія, багато проєктів з відновлюваних джерел належать громадам, зокрема через кооперативні структури, і мають значний внесок у загальний рівень впровадження відновлюваної енергії.

Ринок технологій використання відновлюваних джерел енергії продовжує зростати. Занепокоєння щодо зміни клімату та зростання зелених робочих місць у поєднанні з високими цінами на нафту, піком нафти, нафтовими війнами, розливами нафти, просуванням електромобілів та відновлюваної електроенергії, ядерними катастрофами та збільшенням державної підтримки сприяють зростанню законодавства про відновлювані джерела енергії, стимулам та комерціалізації. Нові державні витрати, регулювання та політика допомогли промисловості пережити економічну кризу 2009 року краще, ніж багато інших секторів.

Незважаючи на те, що відновлювані джерела енергії були дуже успішними у своєму зростаючому внеску в електроенергетику, немає країн, де домінують викопні види палива, які планують зупинити та отримати цю енергію з відновлюваних джерел енергії. Тільки Шотландія та Онтаріо припинили спалювання вугілля, багато в чому завдяки хорошим запасам природного газу. У сфері транспорту викопне паливо ще міцніше і важче знайти рішення. Незрозуміло, чи є збої в політиці чи відновлюваній енергії, але через двадцять років після Кіотського протоколу викопне паливо все ще є нашим основним джерелом енергії, і споживання продовжує зростати.

Міжнародне енергетичне агентство заявило, що розгортання відновлюваних технологій зазвичай збільшує різноманітність джерел електроенергії і через місцеве виробництво сприяє гнучкості системи та її стійкості до центральних ударів.

### **Вплив відновлюваних джерел енергії на навколишнє середовище**

Здатність біомаси та біопалива сприяти зниженню CO<sub>2</sub> викиди обмежені, оскільки і біомаса, і біопаливо виділяють велику кількість забрудненого повітря при спалюванні, а в деяких випадках конкурують із постачанням продуктів

харчування. Крім того, біомаса та біопаливо споживають велику кількість води. Інші відновлювані джерела, такі як вітроенергетика, фотоелектрична енергія та гідроелектроенергетика, мають ту перевагу, що вони здатні економити воду, зменшувати забруднення та зменшувати викиди CO<sub>2</sub> викиди. Установки, що використовуються для виробництва вітрової, сонячної та гідроенергетики, становлять зростаючу загрозу для ключових природоохоронних територій, а об'єкти, побудовані в зонах, відведених для охорони природи та інших екологічно чутливих територій. Вони часто набагато більші, ніж електростанції з викопним паливом, і потребують земельних ділянок у 10 разів більших, ніж вугілля чи газ, щоб виробляти еквівалентні кількості енергії. Понад 2000 об'єктів відновлюваної енергії побудовано, і ще більше буде створено, в районах, що мають екологічне значення і становлять загрозу для середовищ існування видів рослин і тварин по всьому світу. Команда авторів наголосила, що їхню роботу не слід тлумачити як проти відновлюваних джерел, оскільки відновлювана енергія має вирішальне значення для скорочення викидів вуглецю. Головне — це забезпечення того, щоб об'єкти відновлюваної енергії будувалися в місцях, де вони не завдають шкоди біорізноманіттю.

Пристрої відновлюваної енергії залежать від невідновлюваних ресурсів, таких як видобуті метали, і використовують велику кількість землі через їх невелику густину поверхневої потужності. Виробництво фотоелектричних панелей, вітрових турбін та акумуляторів вимагає значної кількості рідкоземельних елементів та збільшує кількість гірничих робіт, які мають значний соціальний та екологічний вплив. Через спільне поширення рідкісноземельних та радіоактивних елементів (торію, урану та радію) видобуток рідкісноземельних матеріалів призводить до утворення малоактивних радіоактивних відходів.

Сонячні панелі змінюють альбедо поверхні, що збільшує їх внесок у глобальне потепління.

Очікується, що видобуток матеріалів, необхідних для виробництва відновлюваної енергії, збільшить загрозу біорізноманіттю.

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ**

Електротехніка - це інженерна дисципліна, яка займається вивченням, проектуванням та застосуванням обладнання, пристроїв та систем, які використовують електроенергію, електроніку та електромагнетизм. Це з'явилося як ідентифікована професія в другій половині 19 століття після комерціалізації виробництва, розподілу та використання електричного телеграфу, телефону та електроенергії.

В даний час електротехніка поділена на широкий спектр різних галузей, включаючи комп'ютерну техніку, системну інженерію, енергетику, телекомунікації, радіочастотну техніку, обробку сигналів, приладобудування, фотоелементи, електроніку, оптику та фотоніку. Багато з цих дисциплін перетинаються з іншими галузями техніки, охоплюючи величезну кількість спеціалізацій, включаючи апаратну техніку, силову електроніку, електромагніти та хвилі, мікрохвильову техніку, нанотехнології, електрохімію, відновлювані джерела енергії, мехатроніку/управління та науку про електроматеріали.

Інженери - електротехніки, як правило, мають ступінь електротехніки або електронної техніки. Практикуючі інженери можуть мати професійну сертифікацію та бути членами професійного органу чи організації міжнародних стандартів. До них належать Міжнародна електротехнічна комісія (IEC), Інститут інженерів електротехніки та електроніки (IEEE) та Інженерно -технологічний інститут (IET) (раніше IEE).

Інженери - електротехніки працюють у дуже широкому діапазоні галузей промисловості, і необхідні навички також змінюються. Вони варіюються від теорії схем до управлінських навичок менеджера проекту. Інструменти та обладнання, які можуть знадобитися окремому інженеру, однаково змінюються - від простого вольтметра до складного програмного забезпечення для проектування та виробництва.

### **Галузі електротехніки**

Однією з властивостей електрики є те, що вона дуже корисна для передачі енергії, а також для передачі інформації. Це також були перші галузі, в яких розвивалася електротехніка. Сьогодні електротехніка має багато піддисциплін, найпоширеніші з яких перераховані нижче. Хоча є інженери-електротехніки, які зосереджуються виключно на одній із цих піддисциплін, багато з них мають справу з їх поєднанням. Іноді деякі галузі, такі як електронна інженерія та комп'ютерна інженерія, вважаються окремими дисциплінами.

### **Електроенергетика**

Енергетична інженерія або інженерія енергетичних систем - це широка галузь інженерії, що займається питаннями енергоефективності, енергетичних послуг, управління об'єктами, інжинірингу заводів, дотримання екології, сталої енергії та технологій відновлюваної енергії. До електроенергетичних пристроїв належать трансформатори, електрогенератори, електродвигуни, високовольтна техніка та силова електроніка. Хоча більшість галузі займаються проблемами трифазного живлення змінного струму — стандарту широкомасштабної передачі та розподілу

електроенергії у сучасному світі, проте значна частина галузі стосується перетворення між живленням змінного та постійного струму та розвиток спеціалізованих систем живлення, таких як ті, що використовуються в літаках або для електричних мереж залізниць. *Електрична мережа* з'єднує різноманітні генератори разом із споживачами їх енергії.

Енергетична інженерія — одна з найновіших інженерних дисциплін, що виникли. Енергетична інженерія поєднує знання з галузей фізики, математики та хімії з економічною та екологічною інженерною практикою. Інженери-енергетики застосовують свої навички для підвищення ефективності та подальшого розвитку відновлюваних джерел енергії. Основна робота інженерів -енергетиків - знайти найбільш ефективні та стійкі способи управління будівлями та виробничими процесами. Інженери -енергетики перевіряють використання енергії в цих процесах і пропонують шляхи вдосконалення систем. Це означає запропонувати вдосконалене освітлення, кращу ізоляцію, більш ефективні опалювальні та охолоджуючі властивості будівель. Хоча інженер -енергетик стурбований отриманням та використанням енергії найбільш екологічно чистими способами, їх галузь не обмежується лише відновлюваною енергією, такою як гідроенергія, сонячна енергія, біомаса чи геотермальна енергія. Інженери-енергетики також працюють у галузях видобутку нафти та природного газу.

### Телекомунікації

Телекомунікації — це передача інформації різними типами технологій по дровій, радіо, оптичній або іншим електромагнітним системам. Телекомунікації обумовлена прагненням людей до спілкування на більшій відстані, ніж це можливо з людським голосом, але зі схожою шкалою доцільності; таким чином, повільні системи (наприклад, поштова пошта) недостатні.

Середовища передачі у телекомунікації еволюціонували через численні технологічні етапи: від маяків та інших візуальних сигналів (таких як димові сигнали, семафорні телеграфи, прапори сигналів та оптичні геліографи) до електричного кабелю та електромагнітного випромінювання, включаючи світло.

Інші приклади ранніх етапів зв'язку на великі відстані включали звукові повідомлення, такі як кодовані барабанні удари, роги, та голосні свистки. Технології 20-го і 21-го століття для зв'язку на великі відстані зазвичай передбачають електричні та електромагнітні технології, такі як телеграф, телефон, телебачення та телепринтер, мережі, радіо, мікрохвильова передача, оптичне волокно та супутники зв'язку.

Революція в бездротовому зв'язку почалася в першому десятилітті ХХ століття з новаторськими досягненнями в радіозв'язку Гульєльмо Марконі (*Guglielmo Marconi*), який у 1909 році отримав Нобелівську премію з фізики, та іншими відомими новаторами та розробниками в галузі електричних та електронних телекомунікацій. Серед них були Чарльз Уїтстоун (*Charles Wheatstone*) і Семюел Морзе (*Samuel Morse*) — винахідники телеграфу, Антоніо Меучі (*Antonio Meucci*) та Олександр Грем Белл (*Alexander Graham Bell*) — винахідники та розробників телефону, Едвін Армстронг (*Edwin Armstrong*) та Лі де Форест (*Lee de Forest*) —

винахідники радіо, а також Володимир К. Зворикін, Джон Логі Бейрд (*John Logie Baird*) та Філо Фарнсворт (*Philo Farnsworth*) — винахідники телебачення.

Ранні телекомунікаційні мережі були створені з мідними проводами як фізичним середовищем для передачі сигналу. Протягом багатьох років ці мережі використовувалися для основних телефонних послуг, а саме голосу та телеграм. З середини 1990-х років, у міру зростання популярності Інтернету, голос поступово витісняється даними. Це незабаром продемонструвало обмеження міді в передачі даних, спонукаючи до розвитку оптики.

### Інженерія управління

Інженерія управління або інженерія систем управління — це інженерна дисципліна, яка займається системами управління, застосовуючи теорію управління для проектування обладнання та систем з бажаною поведінкою в середовищах управління. Дисципліна управління перетинається і зазвичай викладається разом з електротехнікою та машинобудуванням у багатьох освітніх установах по всьому світу.



*Системи управління відіграють важливу роль у польотах у космос.*

На практиці використовуються датчики та детектори для вимірювання вихідних параметрів процесу, що контролюється; ці вимірювання використовуються для надання коригувального зворотного зв'язку, що допомагає досягти бажаної продуктивності керуваного об'єкту. Системи, призначені для роботи без використання людського втручання, називаються системами автоматичного управління (наприклад, круїз-контроль для регулювання швидкості автомобіля). Багатофункціональний характер інженерної діяльності систем управління зосереджений на впровадженні систем управління, переважно отриманих шляхом математичного моделювання різноманітних систем.

Сучасна інженерія управління — це відносно нова галузь досліджень, яка привернула увагу протягом 20 -го століття з розвитком технологій. Її можна широко визначити або класифікувати як практичне застосування теорії управління. Інженерне управління відіграє важливу роль у широкому спектрі систем управління від простих побутових пральних машин до високопродуктивних винишувачів F-16. Теорія управління прагне зрозуміти фізичні системи, використовуючи математичне моделювання, з точки зору вхідних даних, результатів та різних компонентів з різною поведінкою; використовувати інструменти проектування систем управління для розробки контролерів для цих систем, та впровадити контролери у фізичні системи, що використовують наявні технології. Система може бути механічною, електричною, гідравлічною, хімічною, фінансовою чи біологічною, а її математичне моделювання, аналіз та проектування контролера використовують теорію управління в одній або багатьох областях часу, частоти та комплексної змінної  $s$ , залежно від характеру конструкції проблема.

Інженери у галузі управління також працюють у робототехніці для проектування автономних систем з використанням алгоритмів управління, які інтерпретують сенсорний зворотний зв'язок для управління приводами, які рухають роботів, таких як автономні транспортні засоби, автономні безпілотники та інші, що використовуються в різних галузях промисловості.

### Електроніка

Електронна інженерія (її також називають електронікою та інженерією зв'язку) — це електротехнічна дисципліна, яка використовує нелінійні та активні електричні компоненти (наприклад, напівпровідникові пристрої, особливо транзистори та діоди) для проектування електронних схем, пристроїв, інтегральних схем та їх систем. Ця дисципліна, як правило, також розробляє пасивні електричні компоненти, зазвичай на основі друкованих плат.

Електроніка є галуззю в більш широкому навчальному предметі електротехніки, але позначає широку інженерну галузь, яка охоплює такі галузі, як аналогова електроніка, цифрова електроніка, побутова електроніка, вбудовані системи та силова електроніка. Електротехніка займається впровадженням застосувань, принципів та алгоритмів, розроблених у багатьох суміжних галузях, наприклад, фізика твердого тіла, радіотехніка, телекомунікації, системи управління, обробка сигналів, системна інженерія, комп'ютерна техніка, приладобудування, управління електроенергією, робототехніка, та багато інших.

## Електротехніка

Інститут інженерів електротехніки та електроніки (IEEE) є однією з найважливіших та найвпливовіших організацій інженерів-електроніків із США. На міжнародному рівні Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) готує стандарти для електронної техніки, розроблені на основі консенсусу та завдяки роботі 20 000 експертів із 172 країн світу.

Електронна інженерія передбачає проектування та випробування електронних схем, які використовують властивості таких компонентів, як резистори, конденсатори, індуктори, діоди та транзистори для досягнення певної функціональності.



*Електронні компоненти*

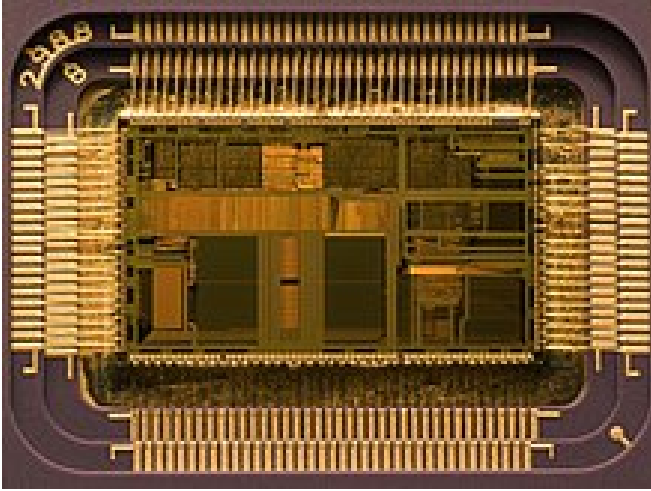
До Другої світової війни ця тема була загальновідомою як радіотехніка і в основному обмежувалася аспектами зв'язку та радіолокації, комерційного радіо та раннього телебачення. Пізніше, у повоєнні роки, коли почали розробляти споживчі пристрої, сфера розрослась до сучасного телебачення, аудіосистем, комп'ютерів та мікропроцесорів. У середині-наприкінці 1950-х років термін радіотехніка поступово поступився місцем назві електронна інженерія.

До винаходу інтегральної схеми в 1959 р. електронні схеми були побудовані з дискретних компонентів, якими могли маніпулювати люди. Ці дискретні схеми споживали багато місця та енергії та мали обмежену швидкість, хоча вони все ще поширені в деяких пристроях. Навпаки, інтегральні схеми упаковували велику кількість — часто мільйонів — крихітних електричних компонентів, переважно транзисторів, у невеликий чіп розміром з монету. Це дозволило створити потужні комп'ютери та інші електронні пристрої, які ми бачимо сьогодні.



### Мікроелектроніка та наноелектроніка

*Мікроелектроніка* — галузь електроніки. Як випливає з назви, мікроелектроніка відноситься до вивчення та виробництва (або мікровиробництва) дуже маленьких електронних конструкцій та компонентів. Зазвичай, але не завжди, це означає мікрометричну шкалу або меншу.



*Мікропроцесор*

Інженерія мікроелектроніки займається розробкою та мікровиробництвом дуже маленьких компонентів електронної схеми для використання в інтегральній схемі, а іноді і для використання самостійно як загального електронного компонента. Найбільш поширеними мікроелектронними компонентами є напівпровідникові транзистори, хоча всі основні електронні компоненти (резистори, конденсатори тощо) можна створювати на мікроскопічному рівні. Зазвичай ці пристрої виготовляються з напівпровідникових матеріалів. Унікальні методи з'єднання елементів також часто використовуються в мікроелектроніці через надзвичайно малі розміри компонентів, проводів. Ця техніка вимагає спеціалізованого обладнання і є дорогою.

Цифрові інтегральні схеми (ІС) складаються з мільярдів транзисторів, резисторів, діодів та конденсаторів. Аналогові схеми також містять резистори та конденсатори.

Мікроелектронні компоненти створюються шляхом хімічного виготовлення пластин напівпровідників, таких як кремній (на більш високих частотах, складних напівпровідників, таких як арсенід галію та фосфіду індію) для отримання бажаного переміщення електронного заряду та управління струмом. Область мікроелектроніки охоплює значний обсяг хімії та матеріалознавства і вимагає, щоб інженер-електронник, який працює в цій галузі, мав дуже добре знати ефекти квантової механіки.

У міру вдосконалення техніки масштаби мікроелектронних компонентів продовжували зменшуватися. На менших масштабах відносний вплив властивостей внутрішньої схеми, таких як взаємозв'язки, може стати більш значним. Вони називаються паразитними ефектами, і мета інженера-конструктора мікроелектроніки — знайти способи компенсувати або мінімізувати ці ефекти, одночасно поставляючи менші, швидші та дешевші пристрої.

Сьогодні розробці мікроелектроніки значною мірою допомагає програмне забезпечення електронного конструювання.

**Наноелектроніка** відноситься до використання нанотехнологій в електронних компонентах. Термін **нано** (др.-грец. *nānos*, *nanos* — гном, карлик) — один з префіксів системи СІ ( $10^{-9}$  — одна міліарна. Приклад: нанометр ( $10^{-9}$  м)). Наноелектроніка охоплює різноманітний набір пристроїв та матеріалів із загальною характеристикою, що вони настільки малі, що міжатомні взаємодії та квантово-механічні властивості потребують детального вивчення. Деякі з цих кандидатів включають: гібридну молекулярну/напівпровідникову електроніку, одновимірні нанотрубки/нанопроводи (наприклад, кремнієві нанотрубки або вуглецеві нанотрубки) або вдосконалену молекулярну електроніку.

Наноелектронні пристрої мають критичні розміри з діапазоном розмірів від 1 до 100 нм. Останні покоління кремнієвих МОП-транзисторів (польовий транзистор з оксидом металу та напівпровідників або МОП-транзистор) вже знаходяться в цьому режимі, причому обробка нижче 100 нм стала стандартною приблизно з 2002 року, включаючи вузли КМОП на 22 нанометрів (комплементарні МОП) та наступні покоління транзисторів FinFET (*fin field-effect transistor*) 14 нм, 10 нм та 7 нм. Наноелектроніка іноді розглядається як технологія, яка повністю витісняє попередню, оскільки нинішні транзистори значно відрізняються від традиційних транзисторів.

### Обробка сигналів

**Обробка сигналів** займається аналізом та перетворенням сигналів. Сигнали можуть бути або аналоговими, у цьому випадку сигнал змінюється безперервно відповідно до зміни інформації, або цифровими, в цьому випадку сигнал змінюється відповідно до серії дискретних значень, що представляють інформацію. Для аналогових сигналів обробка сигналу може включати посилення та фільтрацію звукових сигналів для аудіообладнання або модуляцію та демодуляцію сигналів для телекомунікацій. Для цифрових сигналів обробка сигналу може включати стиснення, виявлення помилок та виправлення помилок цифрових дискретизованих сигналів.

Обробка сигналів — це дуже математично орієнтована та інтенсивна область, що формує ядро цифрової обробки сигналів, і вона швидко розширюється новими застосуваннями у всіх галузях електротехніки, таких як зв'язок, управління, радіолокація, аудіотехніка, радіомовлення, силова електроніка та біомедична інженерія, оскільки багато вже існуючих аналогових систем замінюються їх цифровими аналогами. Обробка аналогового сигналу все ще важлива при проектуванні багатьох систем управління.

**Процесори цифрової обробки сигналів** (*digital signal processor — DSP*) зустрічається в багатьох типах сучасних електронних пристроїв, таких як цифрові телевізори, радіоприймачі, аудіообладнання Hi-Fi, мобільні телефони, мультимедійні програвачі, відеокамери та цифрові камери, системи управління автомобілем, навушники з шумопоглинанням, цифрові аналізатори спектра, системи наведення ракет, радіолокаційні системи та телеметричні системи. У таких продуктах DSP призначений для зменшення шуму, розпізнавання або синтез мовлення, кодування або декодування цифрових носіїв, бездротове передавання або прийом даних, триангуляцію положення за допомогою глобальної системи місцезнаходження GPS (*Global Positioning System*) та інші види обробки зображень, обробки відео, обробки звуку та обробки мови.

### Вимірювальні пристрої та приладобудування

**Вимірювальні пристрої** використовуються для індикації, вимірювання та запису фізичних величин. Приладобудування займається розробкою пристроїв для вимірювання фізичних величин, таких як тиск, витрата та температура. Конструювання таких приладів вимагає глибокого розуміння фізики, яка часто виходить за межі електромагнітної теорії. Наприклад, польотні прилади вимірюють такі змінні, як швидкість і висота вітру, щоб пілоти могли аналітично керувати літаком. Так само термометри використовують ефект Пельтьє-Зеебека для вимірювання різниці температур між двома точками.



*Прилади сучасного літака забезпечують пілотів інструментами для аналітичного управління літаком.*

Прилади можуть стосуватися таких простих пристроїв, як термометри з прямим зчитуванням, або таких складних, як багатосенсорні компоненти промислових систем управління. Сьогодні прилади можна знайти у лабораторіях, на нафтопереробних заводах, на заводах та у транспортних засобах, а також у повсякденному побутовому використанні (наприклад, детектори диму та термостати)

Часто прилади не використовуються самі по собі, а замість цього як датчики великих електричних систем. Наприклад, термометру можна використати для забезпечення постійної температури печі. З цієї причини приладобудування часто розглядається як аналог контролю.

### Комп'ютерна інженерія

Комп'ютерна інженерія — це галузь інженерії, яка об'єднує кілька галузей інформатики та електронної техніки, необхідних для розробки комп'ютерного обладнання та програмного забезпечення. Це може включати проектування нового обладнання, особистих цифрових помічників (*personal digital assistant* — PDA), планшетів та суперкомп'ютерів або використання комп'ютерів для управління промисловим підприємством



*Суперкомп'ютери використовуються в таких різноманітних сферах, як обчислювальна біологія та географічні інформаційні системи.*

Інженери з комп'ютерної інженерії зазвичай мають освіту в галузі електронної інженерії, проектування програмного забезпечення та інтеграції програмно-апаратного забезпечення замість лише інженерії програмного забезпечення або електронної інженерії. Інженери-комп'ютерники беруть участь у багатьох апаратних та програмних аспектах обчислень, починаючи від проектування окремих мікроконтролерів, мікропроцесорів, персональних комп'ютерів та суперкомп'ютерів, до проектування схем. Ця галузь інженерії зосереджується не тільки на тому, як працюють самі комп'ютерні системи, але і на тому, як вони інтегруються у загальну картину.

Звичайні завдання, пов'язані з комп'ютерною інженерією, включають написання програмного забезпечення та прошивки для вбудованих мікроконтролерів, проектування мікросхем VLSI, проектування аналогових датчиків, проектування плат змішаних сигналів та розробку операційних систем. Інженери -комп'ютерники також підходять для досліджень робототехніки, які значною мірою спираються на використання цифрових систем для управління та моніторингу електричних систем, таких як двигуни, засоби зв'язку та датчики.

### Оптика та фотоніка

Оптика та фотоніка займаються генерацією, передачею, підсиленням, модуляцією, виявленням та аналізом електромагнітного випромінювання. Застосування оптики займається розробкою оптичних приладів, таких як лінзи, мікроскопи, телескопи та інше обладнання, що використовує властивості електромагнітного випромінювання. Інші відомі види застосування оптики включають електрооптичні

датчики та вимірювальні системи, лазери, волоконно-оптичні системи зв'язку та оптичні дискові системи (наприклад, CD та DVD)

Фотоніка — це фізична наука, яка досліджує застосування генерації, виявлення та маніпулювання світлом (фотонами) шляхом випромінювання, передачі, модуляції, обробки сигналу, перемикання, посилення та зондування. Хоча фотоніка охоплює всі технічні застосування світла по всьому спектру, більшість фотонних застосувань знаходяться в діапазоні видимого та ближнього інфрачервоного світла. Термін фотоніка з'явився як породження перших практичних напівпровідникових випромінювачів світла, винайдених на початку 1960 -х років, та оптичних волокон, розроблених у 1970 -х роках.

Фотоніка багато в чому спирається на оптичні технології, доповнені такими сучасними розробками, як оптоелектроніка (переважно з напівпровідниками), лазерні системи, оптичні підсилювачі та нові матеріали .

### Супутні дисципліни

**Мехатроніка** - це інженерна дисципліна, яка займається зближенням електричних та механічних систем. Такі комбіновані системи відомі як електромеханічні системи і мають широке поширення. Приклади включають автоматизовані виробничі системи, системи опалення, вентиляції та кондиціонування та різні підсистеми літаків та автомобілів. Проектування електронних систем є предметом електротехніки, який займається питаннями багатопрофільного проектування складних електричних та механічних систем.

Термін мехатроніка зазвичай використовується для позначення макроскопічних систем, але футуристи передбачили появу дуже маленьких електромеханічних пристроїв. Вже зараз такі невеликі пристрої, відомі як **мікроелектромеханічні системи** (*Microelectromechanical systems — MEMS*), використовуються в автомобілях, щоб повідомляти подушки безпеки, коли вони спрацьовують, у цифрових проекторах для створення більш чіткого зображення, а в струменевих принтерах — для створення сопел для друку високої чіткості. У майбутньому можна сподіватися, що ці пристрої допоможуть створити крихітні медичні пристрої для імплантації та покращать оптичний зв'язок.

**Біомедицина інженерія** - це ще одна супутня дисципліна, яка займається розробкою медичного обладнання. Це включає стаціонарне обладнання, таке як апарати штучної вентиляції легень, МРТ -сканери, [101] та електрокардіографічні монітори, а також мобільне обладнання, таке як кохлеарні імпланти, штучні кардіостимулятори та штучні серця.

Аерокосмічна техніка та робототехніка є галузями, де застосовуються найновіші електричні та іонні рушії.

### Професійна практика

У більшості країн ступінь бакалавра в галузі інженерії є першим кроком на шляху до професійної сертифікації, а сама програма диплому сертифікована професійним органом. Після завершення сертифікованої програми ступеня інженер перед сертифікацією повинен задовольнити ряд вимог (включаючи вимоги до досвіду роботи). Після отримання сертифікату інженер отримує звання професійного

інженера (у США, Канаді та Південній Африці), дипломованого інженера чи інженера (в Індії, Пакистані, Великобританії, Ірландії та Зімбабве), дипломованого професійного інженера (в Австралії та Нова Зеландія) або європейський інженер (у більшій частині Європейського Союзу).



*Офіс компанії IEEE знаходиться на 17 поверсі 3 Парк -авеню в Нью -Йорку*

Переваги ліцензування залежать від місця розташування. Наприклад, у Сполучених Штатах та Канаді "лише інженер з ліцензією може опечатувати інженерні роботи для державних та приватних клієнтів". Ця вимога застосовується державним та провінційним законодавством, таким як Закон про інженерів Квебеку. В інших країнах такого законодавства немає. Практично всі органи сертифікації дотримуються етичного кодексу, якого вони очікують, що всі члени будуть дотримуватись або ризикують виключенням. Таким чином ці організації відіграють важливу роль у підтримці етичних стандартів професії. Навіть у юрисдикціях, де сертифікація має мало або взагалі не має юридичного впливу на роботу, інженери підпадають під дію контрактного права. У випадках, коли робота інженера не виконується, він або вона може бути підданий делікту з необережності, а в крайньому випадку — обвинуваченню у злочинності. Робота інженера також повинна відповідати численним іншим правилам та нормам, таким як будівельні норми та законодавство, що стосується екологічного законодавства.

Серед професійних інженерів-електротехніків варто відзначити *Інститум інженерів електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers — IEEE)* та *Інженерно-технологічний інститум (Institution of Engineering and Technology — IET)*. IEEE стверджує, що видає 30% світової літератури з електротехніки, має понад 360 000 членів по всьому світу та проводить понад 3000 конференцій щорічно. IET видає 21 журнал, має понад 150 000 членів у всьому світі та претендує на те, що є найбільшим професійним інженерним товариством у Європі. Застарілість технічних навичок викликає серйозне занепокоєння у інженерів-електротехніків. Тому членство та участь у технічних товариствах, регулярні огляди періодичних видань у цій галузі та звичка продовжувати навчання мають важливе значення для підтримки кваліфікації. Член Інституту інженерії та технології (*Member of the Institution of Engineering and Technology — MIET*) визнається в Європі інженером в галузі електротехніки та комп'ютерних технологій.

В Австралії, Канаді та США інженери-електротехніки складають близько 0,25% робочої сили.

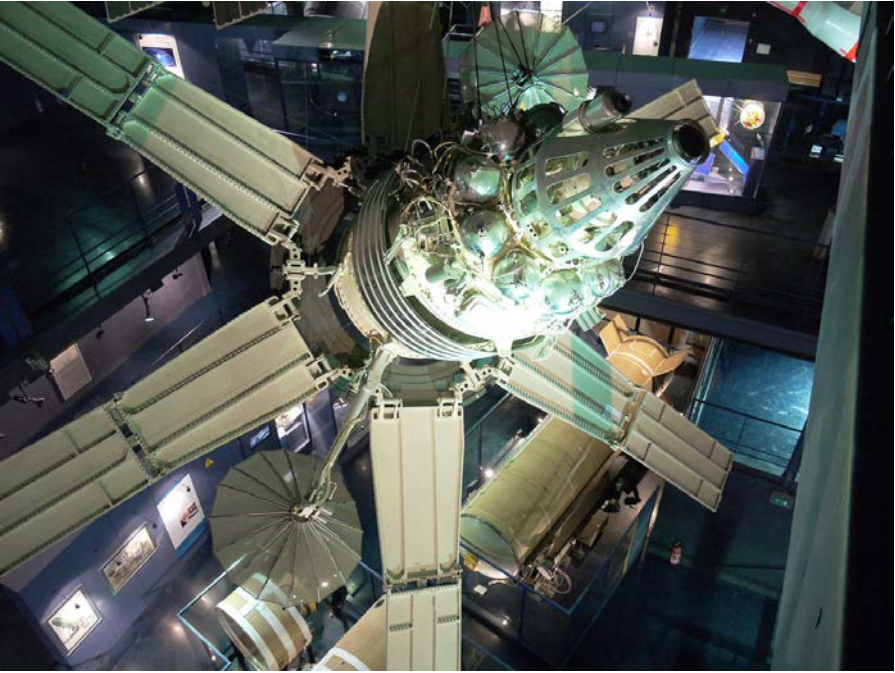
### Діяльність інженерів-електротехніків

Від Глобальної системи позиціонування до виробництва електроенергії — такий внесок зробили інженери-електротехніки у розвиток широкого спектру технологій.

Інженери-електротехніки проектують, розробляють, випробовують та контролюють розгортання електричних систем та електронних пристроїв. Наприклад, вони можуть працювати над проектуванням телекомунікаційних систем, функціонуванням електростанцій, освітленням та електропроводкою будівель, проектуванням побутових приладів або електричним управлінням промислових машин.

Основоположними для дисципліни є фізико-математичні науки, які допомагають отримати як якісний, так і кількісний опис того, як будуть працювати такі системи. Сьогодні більшість інженерних робіт передбачає використання комп'ютерів, і для проектування електричних систем звичайним є використання програм для автоматизованого проектування. Тим не менш здатність створювати ескізи все ще безцінний навик для швидкого спілкування з іншими.

Хоча більшість інженерів -електротехніків розумітимуть базову теорію схем (тобто взаємодію таких елементів, як резистори, конденсатори, діоди, транзистори та індуктори в електричному колі), теорії, що застосовуються інженерами, зазвичай залежать від роботи, яку вони виконують. Наприклад, квантова механіка та фізика твердого тіла можуть бути актуальними для інженера, що працює над проектуванням інтегральних схем VLSI (*Very large-scale integration*), але в значній мірі не мають значення для інженерів, що працюють з макроскопічними електричними системами. Навіть теорія схем може не мати відношення до людини, яка розробляє телекомунікаційні системи, які використовують готові компоненти. Мабуть, найважливіші технічні навички для інженерів-електротехніків відображені в університетських програмах, які підкреслюють високі навички в обчисленнях, комп'ютерну грамотність та здатність розуміти технічну мову та поняття, що стосуються електротехніки.



*Супутниковий зв'язок є типовим для того, над чим працюють інженери -електротехніки.*

Інженери-електротехніки використовують широкий спектр приладів. Для простих схем управління та сигналізації може вистачити базового мультиметра для вимірювання напруги, струму та опору. Там, де потрібно вивчати сигнали, що змінюються в часі, осцилограф також є повсюдним інструментом. У радіотехніці та високочастотному телекомунікаційному застосуванні використовуються аналізатори спектра та мережеві аналізатори.

У деяких дисциплінах безпека може особливо стосуватися приладів. Наприклад, конструктори медичної електроніки повинні враховувати, що набагато менші напруги, ніж звичайні, можуть бути небезпечними, коли електроди безпосередньо контактують із внутрішніми рідинами тіла. Інженерія передачі електроенергії також має великі проблеми з безпекою через високу напругу, що використовується; хоча вольтметри в принципі можуть бути подібними до їх еквівалентів низької напруги, питання безпеки та калібрування роблять їх дуже різними.

У багатьох галузях електротехніки використовують тести, специфічні для їх дисципліни. Інженери-аудіоелектроніки використовують набори звукових випробувань, що складаються з генератора сигналу та лічильника, в основному для вимірювання рівня, але також інших параметрів, таких як гармонійні спотворення та шум. Подібним чином інформаційні технології мають власні набори тестів, часто характерні для певного формату даних, і те саме стосується телевізійного мовлення.





*Радоме на авіабазі Місава Операційний центр безпеки Місава, Місава, Японія*

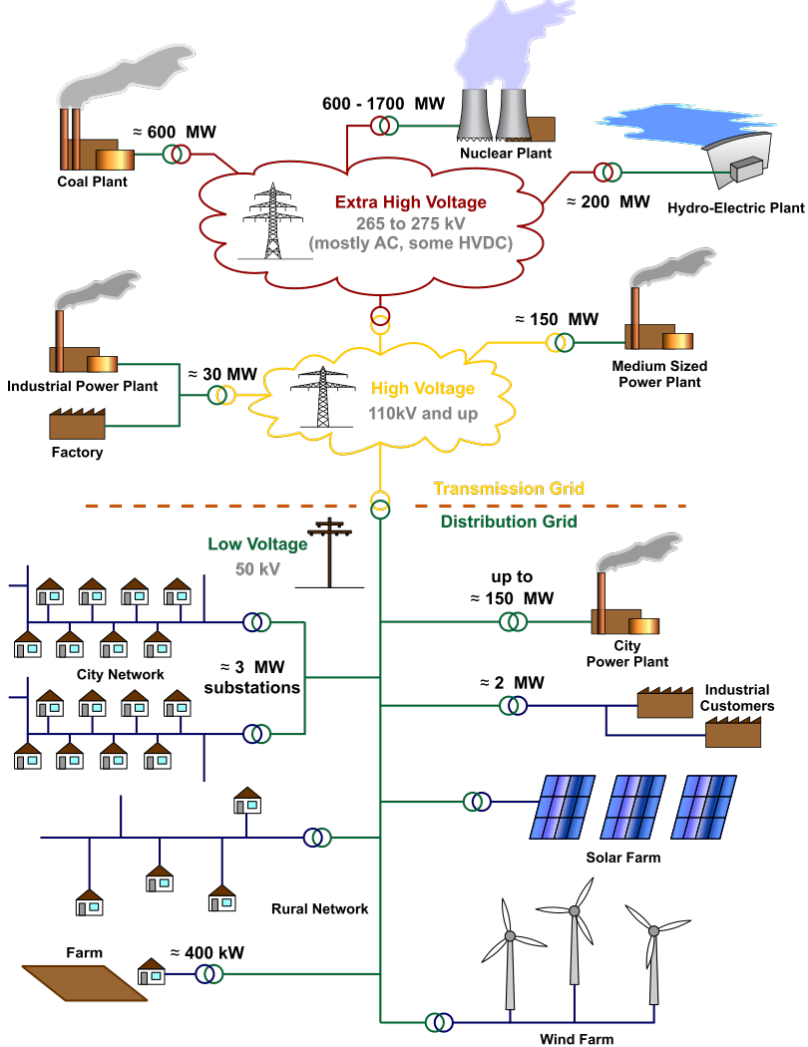
Для багатьох інженерів технічна робота припадає лише на частку їхньої роботи. Також багато часу може бути витрачено на такі завдання, як обговорення пропозицій з клієнтами, підготовка бюджетів та визначення графіків проектів. Багато старших інженерів керують командою техніків або інших інженерів, і з цієї причини навички управління проектами важливі. Більшість інженерних проектів передбачає певну форму документації, тому міцні навички письмового спілкування дуже важливі.

Робочі місця інженерів настільки ж різноманітні, як і види їх роботи. Інженерів-електротехніків можна знайти в лабораторному середовищі виробничого заводу, на борту морського корабля, в офісах консалтингової фірми або на робочому місці на шахті. Протягом свого трудового життя інженери -електротехніки можуть опинитися під наглядом широкого кола осіб, включаючи вчених, електриків, програмістів та інших інженерів.

Електротехніка має тісні стосунки з фізичними науками. Наприклад, фізик лорд Кельвін зіграв велику роль у розробці першого трансатлантичного телеграфного кабелю. І навпаки, інженер Олівер Хевісайд написав велику роботу з математики передачі телеграфних кабелів. Інженери -електрики часто потрібні для великих наукових проектів. Наприклад, великі прискорювачі часток, такі як CERN, потребують інженерів-електротехніків для вирішення багатьох аспектів проекту, включаючи розподіл електроенергії, прилади, виробництво та встановлення провідних електромагнітів.

## ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

*Енергетика, або інженерія енергетичних систем* — це галузь електротехніки, яка займається виробництвом, передачею, розподілом та використанням електричної енергії та електричними апаратами, підключеними до таких систем.



*Загальна схема електричних мереж. Напруги та навантаження є типовими для європейської мережі.*

Хоча більшість галузі займаються проблемами трифазного живлення змінного струму — стандарту для широкомасштабної передачі та розподілу електроенергії

у сучасному світі-значна частина галузі стосується перетворення між живленням змінного та постійного струму та розвиток спеціалізованих систем живлення, таких як ті, що використовуються в літаках або для електричних мереж залізниць. Енергетика черпає більшість своєї теоретичної бази з електротехніки.

Енергетична промисловість - це сукупність усіх галузей, що беруть участь у виробництві та реалізації енергії, включаючи видобуток палива, виробництво, переробку та розподіл. Сучасне суспільство споживає велику кількість палива, а енергетична промисловість є важливою частиною інфраструктури та підтримки суспільства майже у всіх країнах.

Зокрема, до енергетичної галузі належать:

- промисловості викопного палива, яка включає нафтову промисловість (нафтові компанії, нафтопереробники, транспорт палива та продаж кінцевим споживачам на АЗС), вугільну промисловість (видобуток та переробку) та промисловість природного газу (видобуток природного газу та виробництво вугільного газу, як а також розповсюдження та продаж);
- електроенергетична промисловість, включаючи виробництво електроенергії, розподіл та продаж електроенергії;
- атомна енергетика;
- промисловість відновлюваних джерел енергії, що включає компанії з альтернативної енергії та сталого енергетичного розвитку, включаючи ті, які займаються гідроелектроенергією, вітровою та сонячною енергією, а також виробництвом, розподілом та продажем альтернативних видів палива; і,
- традиційна енергетична промисловість, заснована на зборі та розподілі дров, використання яких для приготування їжі та опалення особливо поширене у бідніших країнах.

Зростання залежності протягом ХХ століття від джерел енергії, що викидають вуглець, таких як викопне паливо, та відновлюваних джерел викидів вуглецю, таких як біомаса, означає, що енергетична промисловість часто вносила важливий внесок у забруднення та вплив економіки на довкілля. Донедавна викопне паливо було основним джерелом виробництва енергії у більшості частин світу, і воно є основним фактором глобального потепління та забруднення. В рамках адаптації людини до глобального потепління багато економік інвестують у відновлювану та сталу енергію.

### Історія електроенергетики

В кінці 17 століття електрика стала предметом наукового інтересу. Протягом наступних двох століть було зроблено ряд важливих відкриттів, включаючи лампочку розжарювання та Вольтів стовп. Ймовірно, найбільше відкриття щодо енергетики було зроблено Майклом Фарадеєм, який у 1831 році виявив, що зміна магнітного потоку викликає електрорушійну силу в петлі провідника — принцип, відомий як електромагнітна індукція, який допомагає пояснити, як працюють генератори та трансформатори.

У 1881 році два електрики побудували першу в світі електростанцію в Годалмінгу в Англії. Станція використовувала два водяні колеса для виробництва змінного струму, який використовувався для живлення семи дугових ламп Siemens на

250 вольт і тридцяти чотирьох ламп розжарювання на 40 вольт. [4] Однак поставка була переривчастою, і в 1882 році Томас Едісон та його компанія *The Edison Electric Light Company* розробили першу електростанцію на паровій електростанції на Перл-стріт у Нью-Йорку. Станція *Pearl Street* складалася з кількох генераторів і спочатку живила близько 3000 ламп для 59 клієнтів. Електростанція використовувала постійний струм і працювала під однією напругою. Оскільки енергію постійного струму неможливо було легко перетворити на більш високі напруги, необхідні для мінімізації втрат потужності під час передачі, можлива відстань між генераторами та навантаженням була обмежена приблизно 800 м.

Того ж року в Лондоні Люсьєн Гаулард та Джон Діксон Гіббс продемонстрували перший трансформатор, придатний для використання в реальній енергосистемі. Практична цінність трансформатора Гауларда і Гіббса була продемонстрована в 1884 році в Турині, де трансформатор використовувався для освітлення сорока кілометрів (25 миль) залізниці від одного генератора змінного струму. Незважаючи на успіх системи, пара допустила деякі фундаментальні помилки. Мабуть, найсерйознішим було підключення праймерів трансформаторів послідовно, щоб включення або виключення однієї лампи впливало на інші лампи далі. Після демонстрації Джордж Вестінгхаус, американський підприємець, імпортував ряд трансформаторів разом з генератором Siemens і змусив своїх інженерів експериментувати з ними в надії покращити їх для використання в комерційних системах живлення.

Один з інженерів компанії Westinghouse, Вільям Стенлі, визнав проблему з послідовним підключенням трансформаторів на відміну від паралельних, а також зрозумів, що перетворення залізного сердечника трансформатора в повністю замкнуту петлю покращить регулювання напруги вторинної обмотки. Використовуючи ці знання, він побудував першу у світі практичну систему живлення змінного струму на основі трансформаторів у Грейт-Баррінгтоні, штат Массачусетс, у 1886 році. У 1885 р. італійський фізик та інженер-електротехнік Галілео Ферраріс продемонстрував асинхронний двигун, а в 1887 та 1888 рр. сербсько-американський інженер Нікола Тесла подав ряд патентів, що стосуються систем живлення, зокрема один патент на практичний двофазний асинхронний двигун, який Westinghouse ліцензував для своєї системи змінного струму.

До 1890 року електроенергетика процвітала, і електроенергетичні компанії побудували тисячі систем живлення (як постійного, так і змінного струму) у США та Європі — ці мережі фактично були призначені для забезпечення електричного освітлення. За цей час між Едісоном і Вестінгхаусом виникло жорстоке суперництво в США, відоме як "війна течій", над якою формою передачі (постійним чи змінним струмом) переважала. У 1891 році Westinghouse встановила першу велику енергосистему, призначену для керування електродвигуном, а не просто для забезпечення електричного освітлення. Установа приводила в дію синхронний двигун потужністю 100 кінських сил (75 кВт) у Теллурайді, штат Колорадо, при цьому двигун запускався асинхронним двигуном Tesla. По іншій бік Атлантики Оскар фон Міллер побудував трифазну лінію електропередачі 20 кВ 176 км від Лауффен-ам-Неккар до Франкфурта-на-Майні для виставки електротехніки у Франкфурті. У 1895 році, після тривалого процесу прийняття рішень, генеруюча станція «Адамс

№ 1» на Ніагарському водоспаді почала передавати трифазну потужність змінного струму в Баффало на 11 кВ. Після завершення проекту Ніагарського водоспаду нові електроенергетичні системи все частіше вибирали змінний струм, а не постійний струм для передачі електрики.

### Галузі енергетики

Енергетика займається виробництвом, передачею, розподілом та використанням електроенергії, а також проектуванням ряду супутніх пристроїв. До них відносяться трансформатори, електричні генератори, електродвигуни та силова електроніка.

Енергетики також можуть працювати в системах, які не підключаються до мережі. Ці системи називаються позамержевими системами живлення і можуть використовуватися переважно перед мережевими системами з різних причин. Наприклад, у віддалених місцях шахті може бути дешевше генерувати власну енергію, аніж платити за підключення до мережі, а в більшості мобільних додатків підключення до мережі просто непрактичне.

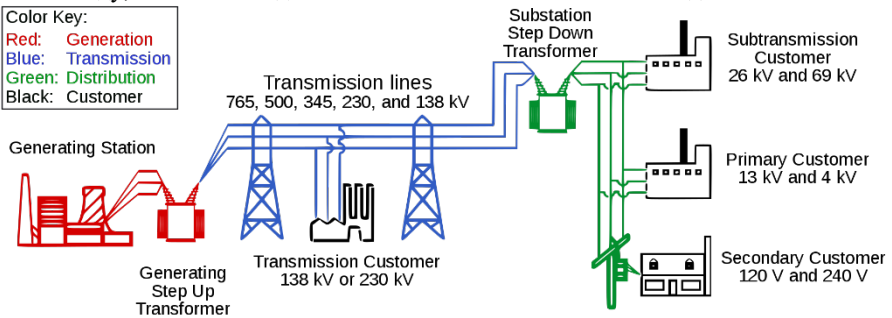
### Підсистеми енергетики

**Виробництво електроенергії** охоплює вибір, проектування та будівництво об'єктів, які перетворюють енергію з первинних форм на електричну.

**Передача електричної енергії** вимагає інженерії високовольтних ліній електропередач та підстанцій для взаємодії з системами генерації та розподілу. Високовольтні системи постійного струму є одним з елементів електромережі.

**Техніка розподілу електроенергії** охоплює ті елементи енергосистеми від підстанції до кінцевого споживача.

**Захист енергосистеми** - це вивчення шляхів виходу електроенергетичної системи з ладу, а також методи виявлення та пом'якшення таких відмов.



*Схема системи електроенергетики, система генерації червоним кольором*

У більшості проектів інженер-енергетик повинен координувати роботу з багатьма іншими дисциплінами, такими як інженери -будівельники та механіки, експерти з охорони навколишнього середовища, а також юридичний та фінансовий персонал. Великі проекти енергосистеми, такі як велика генеруюча станція, можуть вимагати від інженерів енергосистем ще багатьох професіоналів проектування. На більшості рівнів професійної інженерної практики в енергетичних системах

інженер потребує таких же адміністративних та організаційних навиків, як і знання електротехніки.

### Електричні мережі

Електрична мережа — це взаємопов'язана система електричних пристроїв для доставки електроенергії від виробників до споживачів. Електричні мережі відрізняються за розміром і можуть охоплювати цілі країни або континенти. Він складається з:

- електростанції: часто розташовані поблизу енергії та далеко від густонаселених районів
- електричні підстанції для підвищення або зменшення напруги
- передача електроенергії для перенесення енергії на великі відстані
- розподіл електроенергії окремим споживачам, де напруга знову знижується до необхідної напруги (-ів) обслуговування.

Хоча електричні мережі є широко розповсюдженими, станом на 2016 рік 1,4 мільярда людей у всьому світі не були підключені до електромережі. Зі збільшенням електрифікації зростає кількість людей, які мають доступ до електромережі. Близько 840 мільйонів людей (переважно в Африці) не мали доступу до електромережі у 2017 році проти 1,2 мільярда у 2010 році.

Електричні мережі можуть бути схильні до зловмисного вторгнення або атаки; таким чином, існує потреба в безпеці електромережі. Також у міру модернізації електричних мереж та впровадження комп'ютерних технологій кіберзагрози починають перетворюватися на ризик безпеки. Особливі проблеми стосуються більш складних комп'ютерних систем, необхідних для управління мережами.

Мережі майже завжди є синхронними, тобто всі зони розподілу працюють з синхронізованими трифазними частотами змінного струму (змінного струму) (так що коливання напруги відбуваються майже в один і той же час). Це дає змогу передавати електроенергію змінного струму по всій території, підключаючи велику кількість генераторів електроенергії та споживачів та потенційно забезпечуючи більш ефективні ринки електроенергії та надлишкову генерацію.

### Історія електричних мереж

Електрична енергія на ранніх етапах розвитку електричних мереж вироблялася поблизу пристрою або послуги, що потребує цієї енергії. У 1880 -х роках електроенергія конкурувала з парою, гідравлікою та особливо вугільним газом. Спочатку вугільний газ вироблявся на території замовника, але пізніше він перетворився на установки газифікації, які користувалися економією за рахунок масштабу. У промислово розвиненому світі міста мали мережі газопроводів, що використовуються для освітлення. Але газові лампи виробляли неякісне світло, витрачали тепло, робили кімнати гарячими і задимленими, а також виділяли водень та чадний газ. Вони також становили небезпеку пожежі. У 1880 -х роках електричне освітлення незабаром стало вигідним порівняно з газовим.

Електромобільні підприємства створили центральні станції, щоб скористатися економією на масштабі, і перейшли на централізоване виробництво, розподіл та управління системами електроенергії. Після того, як війна потоків була

врегульована на користь живлення змінного струму, з передачею електроенергії на великі відстані стало можливим з'єднати станції, щоб збалансувати навантаження та покращити коефіцієнти навантаження. Історично лінії передачі та розподілу були власністю однієї компанії, але, починаючи з 1990 -х років, багато країн лібералізували регулювання ринку електроенергії таким чином, що призвело до відокремлення бізнесу з передачі електроенергії від бізнесу розподілу.

У Сполученому Королівстві Чарльз Мерц із консалтингового партнерства Merz & McLellan побудував електростанцію Neptune Bank біля Ньюкасла -апон -Тайн у 1901 р. [8] і до 1912 р. Перетворився на найбільшу інтегровану електроенергетичну систему Європи [9]. Мерц був призначений головою парламентського комітету, і його висновки призвели до звіту Вільямсона за 1918 рік, який, у свою чергу, створив законопроект про постачання електроенергії 1919 року. Законопроект став першим кроком на шляху до інтегрованої електроенергетичної системи. Закон про постачання електроенергії (постачання) 1926 р. Призвів до створення Національної мережі. [10] Центральна рада з електроенергії стандартизувала національне електропостачання та встановила першу синхронізовану мережу змінного струму, яка працювала на 132 кіловольт і 50 герцах. Вона почала працювати як національна система, Національна мережа, у 1938 році.

У 1920-х роках у Сполучених Штатах комунальні підприємства організували спільні операції для розподілу пікового навантаження та резервного живлення. У 1934 р. З прийняттям Закону про холдингові комунальні підприємства (США) електроенергетичні підприємства були визнані важливими суспільними благами та отримали окреслені обмеження та регуляторний нагляд за їх діяльністю. Закон про енергетичну політику 1992 р. Вимагав від власників ліній електропередач дозволити компаніям, що виробляють електроенергію, відкрити доступ до своєї мережі [6] [11] і призвів до реструктуризації функціонування електропромисловості, прагнучи створити конкуренцію у виробництві електроенергії. Електричні підприємства більше не будувалися як вертикальні монополії, де виробництвом, передачею та розподілом займалася одна компанія. Тепер ці три етапи можна розділити між різними компаніями, намагаючись забезпечити справедливий доступ до передачі високої напруги. [12]: 21 Закон про енергетичну політику 2005 р. Дозволив стимулювати та гарантувати позики для виробництва альтернативної енергії та просунути інноваційні технології, які уникали парникових викидів.

У Франції електрифікація розпочалася в 1900 -х роках, коли в 1919 році було 700 комун, а в 1938 році - 36 528. У той же час ці тісні мережі почали взаємопов'язуватися: Париж 1907 року на 12 кВ, Піренеї 1923 на 150 кВ і, нарешті, майже вся країна, з'єднана між собою до 1938 р. на 220 кВ. У 1946 р. Сітка була найщільнішою у світі. Того року держава націоналізувала галузь, об'єднавши приватні компанії як Électricité de France. Частота була стандартизована на 50 Гц, а мережа 225 кВ замінила 110 і 120 кВ. З 1956 р. Робоча напруга була стандартизована на рівні 220/380 В, замінивши попередні 127/220 В. Протягом 1970 -х років було введено мережу 400 кВ, новий європейський стандарт.

У Китаї електрифікація почалася в 1950 -х роках [13]. У серпні 1961 року електрифікація ділянки Баоцзи-Фенчжоу залізниці Баочен була завершена і поставлена в експлуатацію, ставши першою електрифікованою залізницею в Китаї [14].

З 1958 по 1998 р. Електрифікована залізниця Китаю досягла 10 000 кілометрів. [15] Станом на кінець 2017 року ця кількість досягла 54 000 миль (87 000 кілометрів) [16]. У нинішній системі електрифікації залізниць Китаю Державна мережева корпорація Китаю є важливим постачальником електроенергії. У 2019 році він завершив проект електропостачання важливих електрифікованих залізниць Китаю в його районах експлуатації, таких як залізниця Цзіньгун, залізниця Хаоци, швидкісна залізниця Чженчжоу-Ваньчжоу тощо, забезпечуючи гарантію електропостачання 110 тягових станцій та її сукупність довжина будівництва лінії електропередач досягла 6586 кілометрів. [17]

### Компоненти електричних мереж

**Виробництво електроенергії.** Виробництво електроенергії — це процес виробництва електричної енергії з джерел первинної енергії, як правило, на електростанціях. Зазвичай це робиться за допомогою електромеханічних генераторів, що працюють від теплових двигунів або кінетичної енергії води або вітру. Інші джерела енергії включають сонячну фотоелектрику та геотермальну енергію.

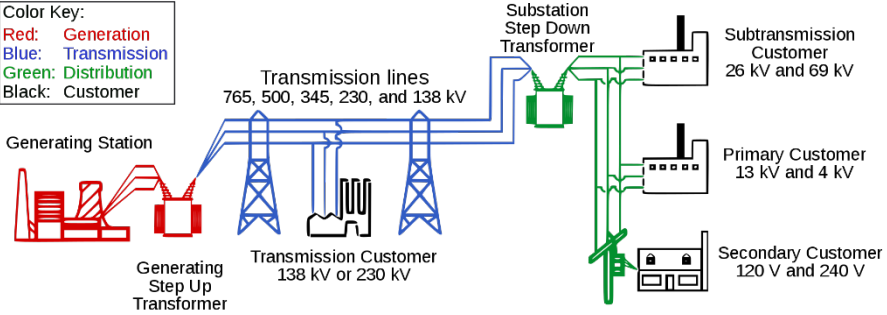


*Турбогенератор*



## Розділ 0

Color Key:  
Red: Generation  
Blue: Transmission  
Green: Distribution  
Black: Customer



*Схема системи електроенергетики, система генерації червоним кольором*

Сума вихідної потужності генераторів на електромережі становить виробництво мережі, як правило, вимірюється в гігават (ГВт).

**Передача електричної енергії.** Передача електричної енергії — це масовий рух електричної енергії від генераторної установки, через мережу з'єднаних між собою ліній, до електричної підстанції, від якої підключено до розподільної системи. Ця мережева система з'єднань відрізняється від локальної проводки між високовольтними підстанціями та споживачами.



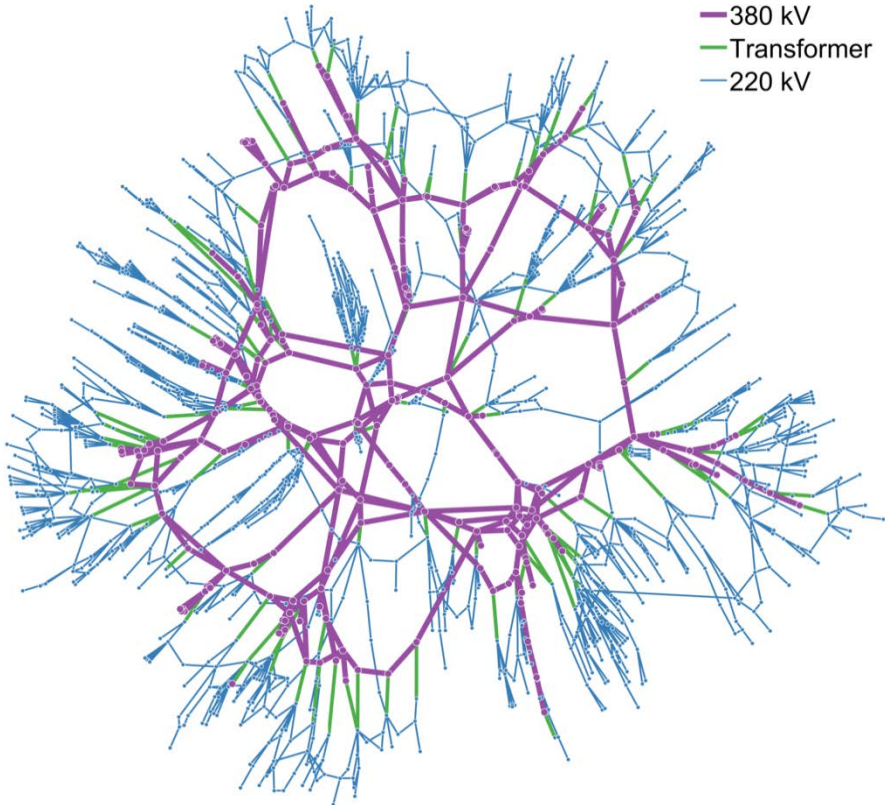
*Трифазні лінії передачі електроенергії 500 кВ на греблі Гранд-Кулі*

Оскільки електроенергія часто виробляється далеко від місця її споживання, система передачі може долати великі відстані. За певної кількості потужності ефективність передачі більша при більш високій напрузі та меншій силі струму. Тому напруги збільшуються на генеруючій станції, а на місцевих підстанціях знижують для розподілу споживачам.

Більшість передач є трифазними. Трифазні, порівняно з однофазними, можуть забезпечувати набагато більшу потужність для певної кількості провідників,

## Електроенергетика

оскільки нейтральний і заземлюючий провідники є спільними. Крім того, трифазні генератори та двигуни ефективніші, ніж їх однофазні аналоги.



*Діаграма мережі високовольтної системи передачі, що показує взаємозв'язок між різними рівнями напруги. Ця діаграма зображує електричну структуру мережі, а не її фізичну географію.*

Однак для звичайних провідників однією з основних втрат є резистивні втрати, які є квадратним законом щодо струму і залежать від відстані. Високовольтні лінії електропередачі змінного струму можуть втрачати 1-4% на сотню миль. Однак високовольтний постійний струм може мати половину втрат змінного струму. На дуже великих відстанях ця ефективність може компенсувати додаткову вартість необхідних перетворювальних станцій змінного/постійного струму на кожному кімці.

Мережі передачі складні з надлишковими шляхами. Фізичний макет часто обумовлений наявною землею та її геологією. Більшість мереж передачі забезпечують надійність, яку забезпечують більш складні сітчасті мережі. Надлишок дозволяє ставати збої в лінії, а під час ремонту електроенергія просто перенаправляється.

**Електричні підстанції.** Підстанції можуть виконувати багато різних функцій, але зазвичай перетворюють напругу від низького до високого (підвищення) та від високого до низького (крок вниз). Між генератором і кінцевим споживачем напруга може трансформуватися кілька разів.

Три основні типи підстанцій за функціями:

- Підсилююча підстанція: вони перетворюють напругу, що надходить від генераторів та електростанцій, до більш високої напруги, щоб вона могла більш ефективно передаватися на великі відстані.
- Понижуюча підстанція: вони перетворюють напругу, що надходить від ліній електропередачі, на нижчу напругу, яку можна використовувати у промисловості або надсилати на розподільну підстанцію.
- Розподільна підстанція: вони знову трансформують напругу для розподілу кінцевим споживачам.

Крім трансформаторів, інші основні компоненти або функції підстанцій включають:

- Автоматичні вимикачі: використовуються для автоматичного розриву ланцюга та ізоляції несправності в системі.
- Вимикачі: для контролю потоку електроенергії та ізоляції обладнання.
- Шина підстанції: зазвичай набір з трьох провідників, по одному для кожної фази струму. Підстанція організована навколо автобусів, і вони підключаються до вхідних ліній, трансформаторів, засобів захисту, вимикачів та вихідних ліній.
- Розрядники блискавок
- Конденсатори для корекції коефіцієнта потужності

**Розподіл електроенергії.** Розподіл є завершальним етапом доставки влади; вона здійснює транспортування електроенергії від системи передачі до окремих споживачів. Підстанції підключаються до системи передачі та знижують напругу передачі до середньої напруги в діапазоні від 2 кВ до 35 кВ. Первинні розподільні лінії несуть цю середню напругу до розподільних трансформаторів, розташованих поблизу приміщень замовника. Розподільні трансформатори знову знижують напругу до напруги утилізації. Замовники, які потребують набагато більшої кількості електроенергії, можуть бути підключені безпосередньо до первинного рівня розподілу або рівня передачі.

### **Виробництво електроенергії.**

Виробництво електроенергії — це процес виробництва електричної енергії з джерел первинної енергії. Для комунальних підприємств електроенергетичної промисловості це стадія перед її передачею (передачею, розподілом тощо) кінцевим споживачам, або її зберіганням (з використанням, наприклад, методу

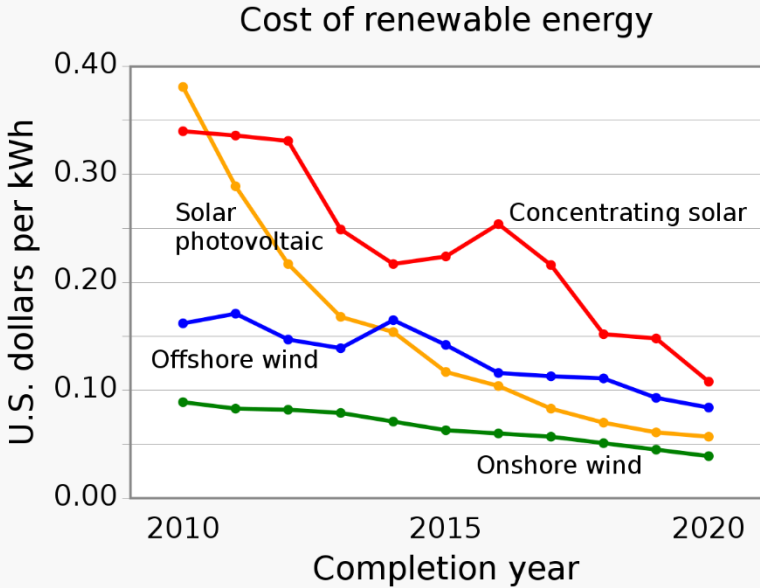
накопичення).



*Турбогенератор*

Електроенергія в природі не є вільно доступною, тому їй необхідно «виробляти» (тобто перетворювати інші форми енергії на електрику). Виробництво здійснюється на електростанціях. Електроенергія найчастіше виробляється на електростанціях електромеханічними генераторами, переважно приводиться в дію тепловими двигунами, що працюють на спалюванні або поділі ядер, а також іншими засобами, такими як кінетична енергія проточної води та вітру. Інші джерела енергії включають сонячну фотоелектрику та геотермальну енергію.

**Історія виробництва електроенергії.** Фундаментальні принципи виробництва електроенергії були відкриті в 1820 -х і на початку 1830-х років британським ученим Майклом Фарадеєм. Його метод, який використовується і сьогодні, полягає в тому, щоб електрику виробляли шляхом переміщення петлі дроту або диска Фарадея між полюсами магніту. Центральні електростанції стали економічно практичними з розвитком передачі енергії змінного струму (змінного струму), використовуючи силові трансформатори для передачі потужності при високій напрузі та з низькими втратами.

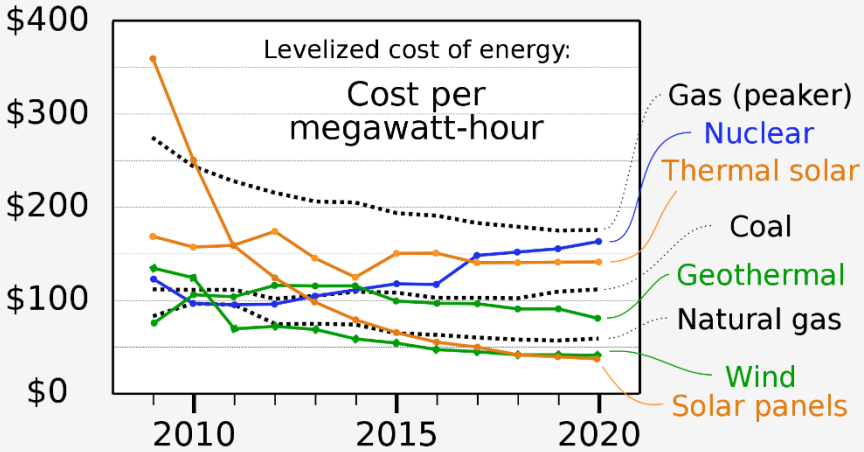


*Витрати на виробництво відновлюваної енергії значно скоротилися, при цьому 62% загального обсягу виробництва відновлюваної енергії, доданої у 2020 році, мають менші витрати, ніж найдешевший новий варіант викопного палива.*

Комерційне виробництво електроенергії розпочалося в 1873 р. з приєднанням динамо до гідравлічної турбіни. Механічне виробництво електроенергії розпочало Другу промислову революцію і зробило можливим декілька винаходів, що використовують електроенергію, найбільшими внесками були Томас Алва Едісон та Нікола Тесла. Раніше єдиним способом виробництва електроенергії були хімічні реакції або використання акумуляторних елементів, і єдиним практичним використанням електроенергії був телеграф.

Виробництво електроенергії на центральних електростанціях розпочалося в 1882 році, коли паровий двигун, що керував динамо на станції Перл-стріт, виробляв постійний струм, який живив громадське освітлення на Перл-стріт, Нью-Йорк. Нова технологія була швидко прийнята багатьма містами світу, які адаптували свої вуличні ліхтарі, що працюють на газі, до електроенергії. Незабаром електричні ліхтарі будуть використовуватися в громадських будівлях, на підприємствах та для харчування громадського транспорту, наприклад, трамваїв та поїздів.

## Електроенергетика



*Вирівняна вартість: Зі все більш широким впровадженням відновлюваних джерел енергії витрати на відновлювані джерела енергії скоротилися, особливо це стосується енергії, виробленої сонячними панелями. [2]*

*Вирівняна вартість енергії (LCOE) - це міра середніх чистих поточних витрат на вироблення електроенергії для генеруючої установки за весь її термін служби.*

Перші електростанції використовували воду або вугілля. Сьогодні використовуються різноманітні джерела енергії, такі як вугілля, ядерна енергія, природний газ, гідроелектроенергія, вітер та нафта, а також сонячна енергія, припливно-відпливна енергія та геотермальні джерела.

### Методи генерації

Існує кілька фундаментальних методів перетворення інших форм енергії в електричну. Виробництво в масштабах комунальних послуг досягається обертовими електричними генераторами або фотоелектричними системами. Невелика частка електроенергії, розподіленої комунальними службами, забезпечується акумуляторами. Інші форми виробництва електроенергії, що використовуються в нішевих сферах застосування, включають трибоелектричний ефект, п'єзоелектричний ефект, термоелектричний ефект та бета-електрику.

Генератори. Електрогенератори перетворюють кінетичну енергію в електричну. Це найбільш використовувана форма виробництва електроенергії і заснована на законі Фарадея. Це можна побачити експериментально, обертаючи магніт у замкнених петлях з провідного матеріалу (наприклад, мідного дроту). Майже вся комерційна генерація електроенергії здійснюється за допомогою електромагнітної індукції, при якій механічна енергія змушує генератор обертатися.

Електрохімія. Електрохімія — це пряме перетворення хімічної енергії в електрику, як в акумуляторі. Виробництво електрохімічної електроенергії є важливим у портативних та мобільних додатках. В даний час більшість електрохімічної потужності надходить від акумуляторів. Первинні елементи, такі як звичайні

цинково-вуглецеві батареї, виступають безпосередньо як джерела живлення, але вторинні елементи (тобто акумуляторні батареї) використовуються для систем зберігання, а не систем первинного покоління. Відкриті електрохімічні системи, відомі як паливні елементи, можна використовувати для видобутку енергії або з природного палива, або з синтезованого палива. Можливість осмотичної сили в місцях злиття солі та прісної води.

**Фотоелектричний ефект.** Фотоелектричний ефект - це перетворення світла в електричну енергію, як у сонячних елементах. Фотоелектричні панелі перетворюють сонячне світло безпосередньо в електрику постійного струму. У разі необхідності інвертори живлення можуть перетворити це на електрику змінного струму. Незважаючи на те, що сонячне світло вільне та рясне, виробництво електроенергії на сонячних батареях, як правило, все ще дорожче, ніж великомасштабна механічно вироблена електроенергія через вартість панелей. Низькоефективні кремнієві сонячні батареї знижуються в ціні, а багатоконтактні осередки з коефіцієнтом конверсії майже 30% зараз комерційно доступні. Ефективність понад 40% була продемонстрована в експериментальних системах. Донедавна фотоелектрику найчастіше використовували у віддалених місцях, де немає доступу до комерційної електромережі, або як додаткове джерело електроенергії для окремих будинків та підприємств. Останні досягнення в галузі ефективності виробництва та фотоелектричних технологій у поєднанні з субсидіями, зумовленими екологічними проблемами, різко прискорили впровадження сонячних панелей. Встановлена потужність зростає на 40% на рік під впливом зростання у Німеччині, Японії, США, Китаї та Індії.

### Передача електроенергії

Передача електричної енергії - це масовий рух електричної енергії від генерувальної установки, такої як електростанція, до електричної підстанції. Взаємопов'язані лінії, що полегшують цей рух, відомі як мережа передачі. Це відрізняється від локальної проводки між високовольтними підстанціями та споживачами, яку зазвичай називають розподілом електроенергії. Поєднана мережа передачі та розподілу є частиною постачання електроенергії, відомої як електрична мережа.

Для ефективної передачі електроенергії на великі відстані потрібні високі напруги. Це зменшує втрати, викликані великим струмом. У лініях електропередачі переважно використовується високовольтний струм змінного струму (змінного струму), але важливий клас ліній передачі використовує постійний струм високої напруги. Рівень напруги змінюється за допомогою трансформаторів, посилюючи напругу для передачі, потім зменшуючи напругу для місцевого розподілу, а потім використовуючи її клієнтами.

Широкосмугова синхронна мережа, також відома як "з'єднання" в Північній Америці, безпосередньо з'єднує багато генераторів, що постачають живлення змінного струму з тією ж відносною частотою для багатьох споживачів. Наприклад, у Північній Америці є чотири основні взаємоз'єднання (Західне, Східне, Квебецьке та Технічна Рада з електричної надійності (ERCOT)). В Європі одна велика мережа з'єднує більшу частину континентальної Європи.



*Лінія електропередач*

Історично лінії передачі та розподілу часто належали одній і тій же компанії, але починаючи з 1990 -х років багато країн лібералізували регулювання ринку електроенергії таким чином, що призвело до відокремлення бізнесу з передачі електроенергії від бізнесу розподілу.

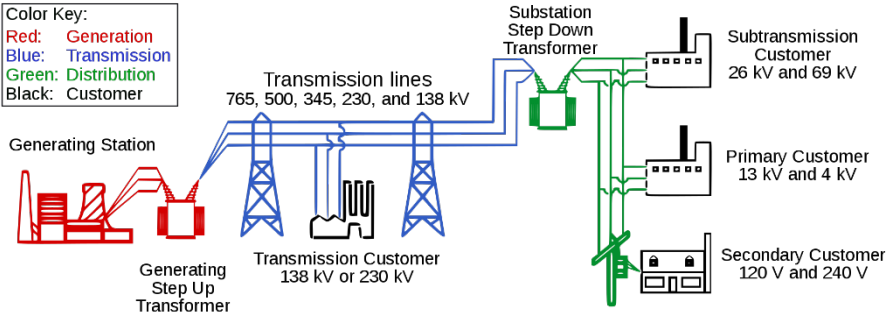
**Система передачі електричної енергії.** Більшість ліній електропередачі є трифазним змінним струмом високої напруги (АС), хоча однофазний АС іноді використовується в системах електрифікації залізниці. Технологія високовольтного постійного струму (HVDC) використовується для більшої ефективності на дуже великих відстанях (зазвичай сотні миль). Технологія HVDC також використовується в підводних силових кабелях (зазвичай довжиною більше 30 миль (50 км)), а також в обміні енергією між мережами, які не синхронізовані між собою. Посилання HVDC використовуються для стабілізації великих мереж розподілу електроенергії, де раптові нові навантаження або відключення в одній частині мережі в іншому випадку можуть призвести до проблем синхронізації та каскадних збоїв.

Електроенергія передається під високою напругою (66 кВ або вище), щоб зменшити втрати енергії, що виникають при передачі на далекі відстані. Потужність зазвичай передається по повітряних лініях електропередач. Підземна передача електроенергії має значно вищі витрати на встановлення та більші експлуатаційні обмеження, але знижує витрати на обслуговування. Підземна передача іноді використовується в міських районах або екологічно чутливих місцях.

Відсутність засобів зберігання електричної енергії в системах передачі призводить до ключового обмеження. Електрична енергія повинна вироблятися з тією ж швидкістю, з якою вона споживається. Для забезпечення того, щоб виробництво електроенергії дуже точно відповідало попиту, потрібна складна система управління.



## Розділ 0



### *Схема електроенергетичної системи; система передачі синього кольору*

Якщо попит на електроенергію перевищує пропозицію, дисбаланс може спричинити автоматичне відключення або вимкнення генераторних установок та обладнання для запобігання пошкодженню. У найгіршому випадку це може призвести до каскадної серії зупинок та великого відключення в регіонах. Приклади включають відключення на північному сході США 1965, 1977, 2003 років та значні відключення електроенергії в інших регіонах США в 1996 і 2011 роках. декілька резервних, альтернативних шляхів подачі електроенергії у разі таких зупинок. Транспортерні компанії визначають максимальну надійну пропускну здатність кожної лінії (зазвичай меншу за її фізичну або теплову межу), щоб гарантувати наявність вільної потужності у разі збою в іншій частині мережі.

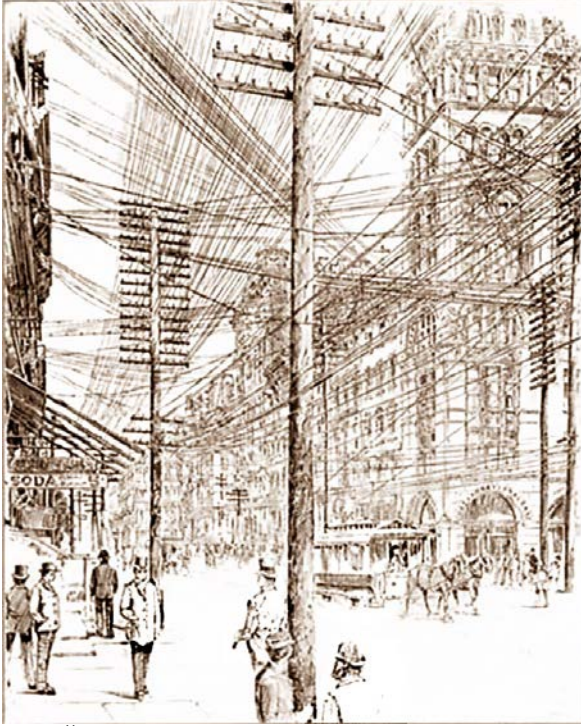
**Історія передачі електроенергії.** У перші дні комерційної електроенергії передача електроенергії при тій самій напрузі, що використовується для освітлення та механічних навантажень, обмежувала відстань між електростанцією та споживачами. У 1882 році генерація мала постійний струм (постійний струм), який не можна було легко збільшити за напругою для передачі на великі відстані. Різні класи навантажень (наприклад, освітлення, стаціонарні двигуни та тягові/залізничні системи) вимагали різної напруги, і тому використовували різні генератори та схеми. [6] [7]

Через таку спеціалізацію ліній та через те, що передача була неефективною для низьковольтних струмових ланцюгів, генератори мали знаходитися поблизу своїх навантажень. Тоді здавалося, що промисловість перетвориться на систему, яка зараз відома як система розподіленої генерації з великою кількістю невеликих генераторів, розташованих поблизу їхніх навантажень. [8]

Передача електричної енергії зі змінним струмом (AC) стала можливою після того, як Люсьєн ілагаулярд та Джон Діксон Гіббс у 1881 році побудували так званий вторинний генератор - ранній трансформатор з коефіцієнтом обертання 1: 1 і відкритою магнітною ланцюгом.

Перша лінія змінного струму довжиною 34 кілометри (21 миля) була побудована для Міжнародної виставки 1884 року в Турині, Італія. Він живився від генератора змінного струму Siemens і Гальске 2 кВ, 130 Гц і містив кілька "вторинних генераторів" (трансформаторів) Гауларда з їх первинними обмотками, з'єднаними

послідовно, які живили лампи розжарювання. Система доводила можливість передачі електричної енергії змінного струму на великі відстані. [7]



*Вулиці Нью -Йорка в 1890 р. Окрім телеграфних ліній, для кожного класу пристроїв, що потребують різної напруги, було потрібно декілька електричних ліній.*

Найперша діюча система розподілу змінного струму, яка запрацювала у 1885 році для громадського освітлення в Via dei Cerchi, Рим, Італія. Він живився від двох генераторів змінного струму Siemens та Halske потужністю 30 к.с. (22 кВт), 2 кВ при 120 Гц і використовував 19 км кабелів та 200 паралельно з'єднаних понижувальних трансформаторів від 2 кВ до 20 В, забезпечених замкненою магнітною ланцюгом, один для кожної лампи. Через кілька місяців після цього з'явилася перша британська система змінного струму, яка була введена в експлуатацію в галереї Гросвенор, Лондон. На ньому також були представлені генератори змінного струму Siemens та понижуючі трансформатори від 2,4 кВ до 100 В-по одному на користувача-з шунтуючими праймерами. [9]

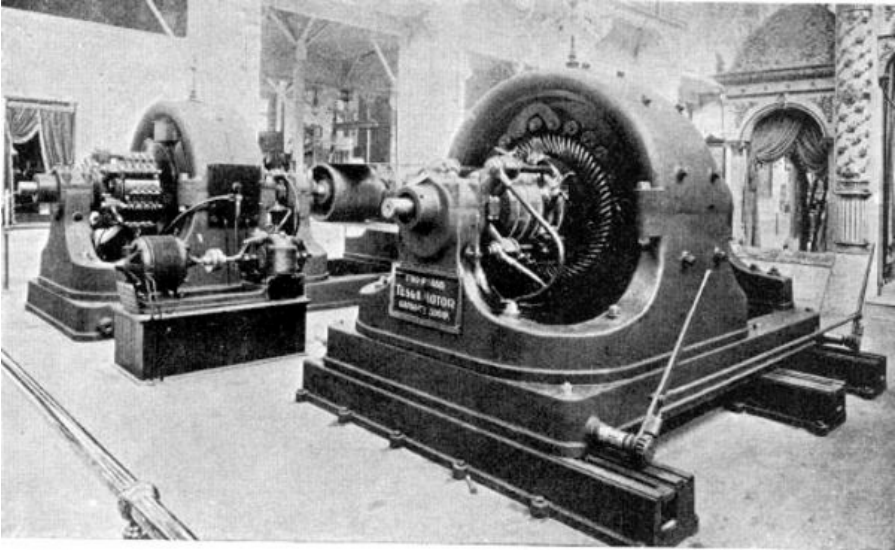


*Працюючи у Westinghouse, Вільям Стенлі -молодший проводив свій час, одужуючи від хвороби, у Грейт -Баррінгтоні, встановлюючи першу в світі практичну систему трансформаторів змінного струму.*

Працюючи з того, що він вважав непрактичним проектом Гауларда-Гіббса, інженер-електротехнік Вільям Стенлі-молодший розробив у 1885 році перший практичний трансформатор змінного струму серії [10]. Працюючи за підтримки Джорджа Вестінгхауза, у 1886 році він продемонстрував систему освітлення на основі трансформатора змінного струму у Грейт -Баррінгтоні, штат Массачусетс. Працюючи від парового двигуна з генератором 500 В Siemens, напруга була знижена до 100 Вольт за допомогою нового трансформатора Stanley для живлення ламп розжарювання на 23 підприємствах вздовж головної вулиці з дуже незначними втратами потужності понад 1200 футів (1200 м). [11] Ця практична демонстрація системи освітлення трансформатора та змінного струму призвела б до того, що Westinghouse розпочне встановлення систем на базі змінного струму пізніше цього року. [10]

1888 з'явився дизайн функціонального двигуна змінного струму, чого досі не вистачало цим системам. Це були асинхронні двигуни, що працюють на багатофазному струмі, незалежно від винаходу Галілео Ферраріса та Ніколи Тесли (з дизайном Тесли, що отримала ліцензію Вестінгхауз у США). Цей дизайн був далі розроблений у сучасну практичну трифазну форму Михайлом Доливо-Добровольським та Чарльзом Євгеном Ланселотом Брауном. [12] Практичне використання таких типів двигунів затримується на багато років через проблеми розвитку та нестачу багатофазних систем живлення, необхідних для їх живлення. [13] [14]

Наприкінці 1880 -х - на початку 1890 -х років відбудеться фінансове злиття менших електрокомпаній у кілька великих корпорацій, таких як Ganz та AEG у Європі та General Electric та Westinghouse Electric у США. Ці компанії продовжували розробляти системи змінного струму, але технічна відмінність між системами постійного та змінного струму настала б після значно більш тривалого технічного злиття. [15] Завдяки інноваціям у США та Європі економія масштабу на змінному струмі з дуже великими генеруючими установками, пов'язаними з навантаженнями за допомогою міжміської передачі, повільно поєднувалася з можливістю зв'язувати її з усіма існуючими системами, які потрібно було постачати. Вони включали однофазні системи змінного струму, багатифазні системи змінного струму, низьковольтне освітлення розжарюванням, дугове освітлення високої напруги та існуючі двигуни постійного струму на заводах та у вуличних автомобілях. У тому, що стало універсальною системою, ці технологічні відмінності тимчасово були подолані шляхом розробки роторних перетворювачів та генераторів двигунів, що дозволило б підключити велику кількість застарілих систем до мережі змінного струму. Ці зупинки поступово будуть замінені у міру виходу з ладу або оновлення старих систем.



*Поліфазні генератори змінного струму компанії Westinghouse, представлені на Всесвітній виставці 1893 року в Чикаго, що є частиною їх "Поліфазної системи Tesla". Такі багатифазні інновації революціонізували передачу*

Перша передача однофазного змінного струму з використанням високої напруги відбулася в штаті Орегон у 1890 р., Коли електроенергія була поставлена від гідроелектростанції у водоспаді Вілламет до міста Портленд на відстані 23 миль вниз по річці [17]. Перший трифазний змінний струм з високою напругою відбувся у 1891 році під час міжнародної виставки електроенергії у Франкфурті. Лінія

електропередачі 15 кВ довжиною приблизно 175 км з'єднала Лауффен на Неккарі та Франкфурті. [9] [18]

Напруги, що використовуються для передачі електричної енергії, зростали протягом 20 -го століття. До 1914 р. Працювало п'ятдесят п'ять систем передачі, кожна з якими працювала на потужності більше 70 кВ. Найвища тоді напруга становила 150 кВ. [19] Завдяки тому, що кілька генеруючих електростанцій можуть бути з'єднані між собою на великій території, вартість виробництва електроенергії була знижена. Найефективніші наявні установки можуть бути використані для постачання різного навантаження протягом дня. Підвищено надійність та зменшено вартість капітальних вкладень, оскільки генеруючі потужності в режимі очікування можуть розподілятися між багатьма клієнтами та ширшою географічною зоною. Віддалені та недорогі джерела енергії, такі як гідроелектростанція чи шахтне вугілля, можуть бути використані для зниження собівартості виробництва енергії. [6] [9]

Швидка індустріалізація у 20 -му столітті зробила лінії електропередачі та мережі критичними об'єктами інфраструктури в більшості промислово розвинених країн. Взаємозв'язок заводів місцевої генерації та невеликих розподільних мереж стимулювали вимоги Першої світової війни, коли великі електрогенераційні установки були побудовані урядами для забезпечення електроенергією заводів з виробництва боєприпасів. Пізніше ці генеруючі установки були приєднані для подачі цивільних вантажів за допомогою міжміської передачі.

### Електричні підстанції

Підстанція є частиною системи виробництва, передачі та розподілу електроенергії. Підстанції перетворюють напругу з високого на низький або зворотний або виконують будь-яку з кількох інших важливих функцій. Між генераторною станцією та споживачем електроенергії може протікати через кілька підстанцій при різних рівнях напруги. Підстанція може включати трансформатори для зміни рівнів напруги між високою напругою передачі та нижчою напругою розподілу або при з'єднанні двох різних напруг передачі.

Підстанції можуть належати та експлуатуватися електричним підприємством, а також - великим промисловим чи комерційним споживачем. Як правило, підстанції без нагляду, для віддаленого нагляду та керування вони покладаються на SCADA.

Слово підстанція походить від днів до того, як система розподілу стала мережею. Оскільки центральні генераційні станції стали збільшуватися, менші генеруючі установки були перетворені на розподільні, отримуючи енергію від більшої електростанції замість використання власних генераторів. Перші підстанції були підключені лише до однієї електростанції, де розміщувалися генератори, і були дочірніми підприємствами цієї електростанції.

### Типи підстанцій

Підстанції можна описати за їх класом напруги, застосуванням в енергосистемі, методом ізоляції більшості з'єднань та стилем та матеріалами

використовуваних конструкцій. Ці категорії не роз'єднані; наприклад, для вирішення певної проблеми передавальна підстанція може включати значні функції розподілу.



*Високовольтна підстанція в Каанаа, Порі, Фінляндія*



*Підстанція в Росії*

**Трансмісійна підстанція.** Трансмісійна підстанція з'єднує дві або більше ліній електропередачі. Найпростіший випадок, коли всі лінії передачі мають однакову напругу. У таких випадках підстанція містить високовольтні вимикачі, які дозволяють підключати або ізолювати лінії для усунення несправностей або технічного обслуговування. Станція передачі може мати трансформатори для перетворення між двома напругами передачі, пристроями регулювання напруги/корекції коефіцієнта потужності, такими як конденсатори, реактори або статичні компенсатори VAR та обладнанням, таким як трансформатори фазового зсуву, для управління потоком електроенергії між двома сусідніми енергосистемами.



*Мінімальна станція HV в Німеччині*

Трансмісійні підстанції можуть варіюватися від простих до складних. Невелика "комутаційна станція" може бути трохи більше, ніж шина плюс деякі автоматичні вимикачі. Найбільші трансмісійні підстанції можуть охоплювати значну площу (кілька акрів/га) з різними рівнями напруги, багатьма вимикачами та великою кількістю засобів захисту та управління (трансформатори напруги та струму, реле та системи SCADA). Сучасні підстанції можуть бути реалізовані з використанням міжнародних стандартів, таких як стандарт IEC 61850.

**Розподільна підстанція.** Розподільна підстанція передає електроенергію від системи передачі до системи розподілу району. Неєкономично безпосередньо підключати споживачів електроенергії до основної мережі передачі, якщо вони не використовують велику кількість електроенергії, тому розподільна станція знижує напругу до рівня, відповідного для місцевого розподілу



*Трансформаторна вежа в Німеччині. Живлення середньої напруги спереду, вихід низької напруги збоку.*





*Розподільна підстанція в Скарборо, Онтаріо, замаскована під будинок, укомплектована під їзною дорогою, передньою прогулянкою та скошеним газоном та чагарниками у дворі. На "вхідних дверях" добре видно попереджувальне повідомлення. Маскування підстанцій поширене у багатьох містах.*

Вхідними сигналами для розподільної підстанції зазвичай є щонайменше дві лінії передачі або субпередачі. Вхідна напруга може становити, наприклад, 115 кВ або будь-що спільне в цій зоні. На виході є кілька фідерів. Напруга розподілу, як правило, є середньою, від 2,4 кВ до 33 кВ, залежно від розміру території, що обслуговується, та практики роботи місцевого підприємства. Живильники проходять уздовж вулиць (або в деяких випадках під землею) і живлять розподільні трансформатори в приміщенні замовника або поблизу нього.

Окрім трансформації напруги, розподільні підстанції також ізолюють несправності як у передавальних, так і в розподільних системах. Розподільні підстанції, як правило, є точками регулювання напруги, хоча на довгих розподільних ланцюгах (кількох миль/кілометрів) обладнання для регулювання напруги також може бути встановлено вздовж лінії.

У центральних районах великих міст є складні розподільні підстанції з висковольтною комутацією, а також системами комутації та резервного копіювання зі сторони низької напруги. Більш типові розподільні підстанції мають вимикач, один трансформатор та мінімальні можливості на стороні низької напруги.

**Колекторна підстанція.** У проектах розподіленої генерації, таких як вітроелектростанція або фотоелектрична електростанція, може знадобитися

колекторна підстанція. Він нагадує розподільну підстанцію, хоча потік електроенергії йде у зворотному напрямку - від багатьох вітрових турбін або інверторів до мережі передачі. Зазвичай для економії будівництва колекторна система працює близько 35 кВ, хоча деякі колекторні системи мають напругу 12 кВ, а колекторна підстанція підвищує напругу до напруги передачі для мережі. Колекторна підстанція також може забезпечити корекцію коефіцієнта потужності, якщо це необхідно, вимірювання та контроль вітроелектростанції. У деяких особливих випадках колекторна підстанція також може містити перетворювальну станцію HVDC.

Колекторні підстанції також існують, де поруч знаходяться декілька теплових або гідроелектростанцій з порівнянною вихідною потужністю. Прикладами таких підстанцій є Brauweiler у Німеччині та Hradec у Чехії, де електроенергію збирають із сусідніх електростанцій на вугіллі. Якщо для підвищення напруги до рівня передачі не потрібні трансформатори, підстанція є комутаційною.

**Перетворювальні підстанції.** Перетворювальні підстанції можуть бути пов'язані з перетворювальними установками HVDC, тяговим струмом або взаємопов'язаними несинхронними мережами. Ці станції містять силові електронні пристрої для зміни частоти струму або перетворення з змінного на постійний струм або зворотний. Раніше роторні перетворювачі змінювали частоту для з'єднання двох систем; в наші дні такі підстанції зустрічаються рідко.

Станція комутації. Комутаційна станція - це підстанція без трансформаторів, яка працює лише на одному рівні напруги. Комутаційні станції іноді використовуються як колекторні та розподільні станції. Іноді вони використовуються для перемикання струму на резервні лінії або для паралелізації ланцюгів у разі виходу з ладу. Прикладом є станції комутації для лінії електропередачі HVDC Inga – Shaba.

Станція комутації також може бути відома як розподільна станція, і вони зазвичай розташовані безпосередньо біля електростанції або поблизу неї. У цьому випадку генератори від електростанції подають свою енергію у двір на шину генератора з одного боку двору, а лінії електропередачі отримують свою енергію від фідерної шини з іншого боку двору.

Важливою функцією підстанції є комутація, яка полягає у підключенні та відключенні ліній передачі або інших компонентів до системи та від неї. Події перемикання можуть бути запланованими або незапланованими. Лінія електропередачі або інший компонент може бути знеструмлена для обслуговування або для нового будівництва, наприклад, додавання або видалення лінії електропередачі або трансформатора. Щоб зберегти надійність поставок, компанії прагнуть підтримувати систему в робочому стані під час обслуговування. Усі роботи, які потрібно виконати, від рутинного тестування до додавання абсолютно нових підстанцій, слід виконувати, зберігаючи роботу всієї системи.



*Розподільна станція на дамбі Гранд -Кулі, США, 2006 рік*



*Колишня високовольтна підстанція в Штутгарті, Німеччина, тепер комутаційна станція 110 кВ. Рівень 220 кВ усувається для спрощення мережі.*

Незаплановані події перемикання викликані несправністю в лінії електропередачі або будь-якому іншому компоненті, наприклад:

- лінія потрапляє блискавкою і розвиває дугу,
- вежу знесе сильний вітер.

Функція комутаційної станції — ізолювати несправну частину системи в найкоротші терміни. Вимкнення несправного обладнання захищає його від подальших пошкоджень, а ізоляція несправності допомагає стабільно працювати решті частині електричної мережі.

**Тягова підстанція.** Електрифіковані залізниці також використовують підстанції, часто розподільні. У деяких випадках відбувається перетворення поточного типу, зазвичай з випрямлячами для поїздів постійного струму (DC) або роторними перетворювачами для поїздів, що використовують змінний струм (AC) на частотах, відмінних від загальнодоступних. Іноді вони також є підстанціями передачі або колекторними підстанціями, якщо залізнична мережа також експлуатує власну мережу та генератори для живлення інших станцій.

**Мобільна підстанція.** Пересувна підстанція-це підстанція на колесах, що містить трансформатор, вимикачі та шини, встановлені на автономному напівпричепі, призначеному для вантажівки. Вони спроектовані як компактні для пересування по дорогах загального користування та використовуються для тимчасового резервного копіювання під час стихійного лиха або війни. Мобільні підстанції, як правило, мають набагато нижчий рейтинг, ніж постійні установки, і можуть бути побудовані в декількох блоках, щоб відповідати обмеженням дорожнього руху.

### Конструкція підстанцій



*Підстанція "Аделард-Гобут" у Старому Монреалі є найстарішою підстанцією Канади, яка працює безперервно з 1901 року. Вона має фасад з глиняної цегли з орнаментами з сірого каменю, щоб злитися з оточенням центру міста.*



*Підстанція у будівлі у формі замку 1910-х років служить розподільним пунктом біля греблі Лесна, однієї з кількох гідроелектростанцій на річці Бобр.*



*Розподільна башта 15 кВ/400 В у Польщі*

**Елементи підстанції.** Підстанції, як правило, мають комутаційне, захисне та контрольне обладнання та трансформатори. У великій підстанції автоматичні вимикачі використовуються для переривання коротких замикань або струмів перевантаження, які можуть виникнути в мережі. Менші розподільні станції можуть використовувати автоматичні вимикачі або запобіжники повторного закриття для захисту розподільних ланцюгів. Самі підстанції зазвичай не мають генераторів, хоча поблизу електростанції може бути підстанція. Інші пристрої, такі як конденсатори, регулятори напруги та реактори, також можуть бути розташовані на підстанції.

Підстанції можуть знаходитися на поверхні у огорожених огорожах, під землею або розташовуватися у будівлях спеціального призначення. Висотні будівлі можуть мати кілька внутрішніх підстанцій. Криті підстанції зазвичай знаходяться в міських районах для зменшення шуму від трансформаторів, з причин їх появи,

або для захисту розподільних пристроїв від екстремальних кліматичних умов або забруднення.

Повинна бути спроектована система заземлення (заземлення). Загальне зростання потенціалу землі та градієнти потенціалу під час несправності (так звані потенціали дотику та кроку) [6] повинні бути розраховані для захисту перехожих під час короткого замикання в системі передачі. Несправності землі на підстанції можуть спричинити зростання потенціалу землі. Струми, що протікають на поверхні Землі під час несправності, можуть спричинити, щоб металеві предмети мали значно іншу напругу, ніж земля під ногами людини; цей потенціал дотику становить небезпеку ураження електричним струмом. Якщо підстанція має металеву огорожу, вона повинна бути належним чином заземлена, щоб захистити людей від цієї небезпеки.

Основні питання, з якими стикаються енергетики, - це надійність та вартість. Хороший дизайн намагається знайти баланс між цими двома, досягти надійності без зайвих витрат. Конструкція також повинна дозволяти розширення станції, коли це необхідно.

**Вибір місця розташування.** Вибір місця розташування підстанції повинен враховувати багато факторів. Для встановлення обладнання з необхідними зазорами для електробезпеки та доступу для обслуговування великих пристроїв, таких як трансформатори, потрібна достатня площа землі.

Там, де земля коштує дорого, наприклад у міських районах, розподільні пристрої з газоізоляцією можуть в цілому заощадити гроші. Підстанції, розташовані в прибережних районах, що постраждали від повені та тропічних штормів, часто можуть вимагати підняття споруди, щоб утримувати обладнання чутливим до перенапруг, загартованих проти цих елементів. Сайт повинен мати місце для розширення через збільшення навантаження або запланованого збільшення передачі. Необхідно враховувати екологічні наслідки підстанції, такі як водовідведення, шум та вплив дорожнього руху.

Ділянка підстанції повинна бути достатньо центральною для зони розподілу, яка буде обслуговуватися. Майданчик повинен бути захищений від вторгнення перехожих, як для захисту людей від травм електричним струмом або дугами, так і для захисту електричної системи від неправильної роботи через вандалізм.

**Проектування підстанції.** Першим кроком у плануванні планування підстанції є підготовка однолінійної діаграми, яка у спрощеній формі показує необхідну схему комутації та захисту, а також вхідні лінії живлення та вихідні фідери або лінії передачі. Звичайною практикою багатьох електричних підприємств є підготовка однорядкових діаграм з основними елементами (лініями, вимикачами, вимикачами, трансформаторами), розташованими на сторінці подібно до того, як апарат буде розміщений на фактичній станції.

У загальній конструкції вхідні лінії мають вимикач і вимикач. У деяких випадках лінії не матимуть і того, і іншого, або вважатиметься необхідним перемикач або вимикач. Роз'єднувальний вимикач використовується для забезпечення ізоляції, оскільки він не може переривати струм навантаження. Автоматичний вимикач використовується як захисний пристрій для автоматичного переривання струмів несправності і може використовуватися для вмикання та вимикання навантажень

або для відключення лінії, коли живлення надходить у «неправильному» напрямку. Коли через вимикач протікає великий струм несправності, це виявляється за допомогою трансформаторів струму. Величина виходів трансформатора струму може бути використана для спрацювання автоматичного вимикача, що призведе до відключення навантаження, що подається розривом ланцюга, від точки живлення. Це прагне ізолювати місце несправності від решти системи та дозволити решті систем продовжувати роботу з мінімальним впливом. Вимикачі та автоматичні вимикачі можуть управлятися локально (у межах підстанції) або віддалено від диспетчерського центру управління.



*Підстанція "Тоттенхем", розташована в дикому парку на півночі Лондона.*

З повітряними лініями електропередачі поширення блискавки та комутаційних перенапруг може спричинити збої ізоляції обладнання підстанцій. Лінійні вхідні запобіжники використовуються для відповідного захисту обладнання підстанції. Координаційні дослідження ізоляції проводяться широко, щоб забезпечити мінімальний збій обладнання (та пов'язані з цим відключення).

Пройшовши повз компоненти комутації, лінії даної напруги підключаються до однієї або декількох шин. Це набори шин, зазвичай кратні трьом, оскільки розподіл трифазної електроенергії широко поширений у всьому світі.

Розташування вимикачів, автоматичних вимикачів та шин впливає на вартість та надійність підстанції. Для важливих підстанцій може бути використана кільцева шина, подвійна шина або так званий "вимикач-півтора". бути знеструмленим для обслуговування та ремонту. Підстанції, що живлять лише одне промислове



навантаження, можуть мати мінімальні умови перемикання, особливо для невеликих установок.

Після встановлення шин для різних рівнів напруги трансформатори можуть бути підключені між рівнями напруги. Вони знову матимуть автоматичний вимикач, подібно до ліній електропередачі, на випадок несправності трансформатора (зазвичай його називають "коротке замикання").

Поряд з цим, на підстанції завжди є схема управління, необхідна для того, щоб наказати різним вимикачам вимикатися у разі виходу з ладу якогось компонента.

**Автоматизація.** Перші електричні підстанції вимагали ручного перемикання або налаштування обладнання, а також ручного збору даних щодо навантаження, споживання енергії та ненормальних подій. У міру зростання складності розподільних мереж стало економічно необхідним автоматизувати нагляд та контроль підстанцій з централізовано відвідуваного пункту, щоб забезпечити загальну координацію у разі надзвичайних ситуацій та зменшити експлуатаційні витрати. Перші спроби створення підстанцій дистанційного керування використовували спеціальні дроти зв'язку, які часто проходять поряд із силовими ланцюгами. Носій електромережі, мікрохвильова радіостанція, волоконно-оптичні кабелі, а також спеціальні дротові схеми дистанційного керування-все це було застосовано до наглядового управління та збору даних (SCADA) для підстанцій. Розвиток мікропроцесора дозволив експоненціально збільшити кількість точок, які можна економічно контролювати та контролювати. Сьогодні стандартизовані протоколи зв'язку, такі як DNP3, IEC 61850 та Modbus, щоб перелічити декілька, використовуються для того, щоб дозволити кільком інтелектуальним електронним пристроям спілкуватися між собою та контрольними центрами. Розподілений автоматичний контроль на підстанціях є одним із елементів так званої розумної мережі.

**Ізоляція.** Вимикачі, автоматичні вимикачі, трансформатори та інші пристрої можуть бути з'єднані між собою за допомогою неізольованих провідників, натягнутих на опорні конструкції. Необхідний повітряний простір збільшується з напругою в системі та з номінальною напругою блискавки. Для розподільних підстанцій із середньою напругою можна використовувати металеві перемикачі передач, а провідники під напругою взагалі не оголюються. Для більш високої напруги вимикач із газовою ізоляцією зменшує простір навколо шини під напругою. Замість голих провідників шина та апарат вбудовані в трубчасті ємності під тиском, наповнені газом гексафториду сірки (SF<sub>6</sub>). Цей газ має більш високу ізоляційну здатність, ніж повітря, що дозволяє зменшити габарити пристрою. Крім повітря або газу SF<sub>6</sub>, в апараті будуть використовуватися інші ізоляційні матеріали, такі як трансформаторне масло, папір, фарфор та полімерні ізолятори.

**Структура.** Зовнішні, наземні конструкції підстанцій включають дерев'яний стовп, металеву башту з решітки та трубчасті металеві конструкції, хоча є й інші варіанти. Там, де багато місця, а зовнішній вигляд станції не є чинником, сталеві ґратчасті вежі забезпечують недорогі опори для ліній електропередач та апаратів. Низькопрофільні підстанції можуть бути вказані в приміських районах, де зовнішній вигляд є більш критичним. Внутрішні підстанції можуть бути розподільними пристроями з газовою ізоляцією (при високій напрузі) або розподільними пристроями з металочерепицею або металом, при низькій напрузі. Міські та

приміські підстанції в приміщенні можуть бути оброблені зовні, щоб вони поєднувалися з іншими будівлями району.

Компактна підстанція - це, як правило, зовнішня підстанція, побудована в металевому корпусі, в якій кожен елемент електричного обладнання розташований дуже близько один до одного, щоб створити відносно менший розмір підстанції.

### Розподіл електроенергії

Розподіл електроенергії - це останній етап постачання електричної енергії; вона здійснює транспортування електроенергії від системи передачі до окремих споживачів.

Розподільні підстанції підключаються до системи передачі та знижують напругу передачі до середньої напруги в діапазоні від 2 кВ до 35 кВ за допомогою трансформаторів. Первинні розподільні лінії несуть цю середню напругу до розподільних трансформаторів, розташованих поблизу приміщень замовника. Розподільні трансформатори знову знижують напругу до напруги використання, що використовується освітленням, промисловим обладнанням та побутовою технікою. Часто кілька споживачів забезпечуються від одного трансформатора через вторинні розподільні лінії. Комерційні та побутові клієнти підключаються до вторинних ліній розподілу через перерви в обслуговуванні. Замовники, які потребують набагато більшої кількості електроенергії, можуть бути підключені безпосередньо до первинного рівня розподілу або рівня передачі. [2]

Перехід від передачі до розподілу відбувається на електростанції, яка виконує такі функції:

- Автоматичні вимикачі та вимикачі дозволяють відключити підстанцію від електромережі або відключити розподільні лінії.
- Трансформатори знижують напругу передачі, 35 кВ або більше, аж до напруги первинного розподілу. Це ланцюги середньої напруги, зазвичай 600–35000 В.
- Від трансформатора живлення надходить на шину, яка може розділити розподільчу потужність у декількох напрямках. Автобус розподіляє електроенергію на розподільні лінії, які роздаються споживачам.

Розподіл у містах переважно підземний, іноді в загальних каналах. Сільський розподіл переважно наземний із стовпами комунальних послуг, а приміський - змішаним. Ближче до замовника розподільний трансформатор знижує первинну потужність розподілу до вторинного ланцюга низької напруги, зазвичай 120/240 В у США для побутових споживачів. Електроенергія надходить до споживача через падіння послуги та лічильник електроенергії. Остаточний контур у міській системі може бути меншим за 15 метрів (50 футів), але для сільського споживача може бути більше 91 метра (300 футів).

**Захист енергетичних систем.** Захист енергетичних систем - це галузь електроенергетики, яка займається захистом електроенергетичних систем від несправностей шляхом відключення несправних частин від решти електричної мережі. Метою схеми захисту є збереження стабільності електроенергетичної системи шляхом ізоляції лише компонентів, які зазнали несправності, залишаючи при цьому якомога більшу частину мережі все ще в робочому стані. Таким чином,

схеми захисту повинні застосовувати дуже прагматичний і песимістичний підхід до усунення несправностей системи. Пристрої, які використовуються для захисту систем живлення від несправностей, називаються пристроями захисту.

### Функціональні можливості електромереж

**Частота мережі.** У синхронній мережі всі генератори повинні працювати з однаковою частотою і повинні залишатися майже в фазі один з одним і з мережею. Для обертових генераторів місцевий регулятор регулює крутний момент, підтримуючи майже постійну швидкість при зміні навантаження. Контроль швидкості падіння забезпечує, що декілька паралельних генераторів поділяють зміни навантаження пропорційно їх номіналу. Виробництво та споживання повинні бути збалансованими по всій мережі, оскільки енергія споживається у міру її виробництва. Енергія акумулюється у найближчому короткому періоді за допомогою обертальної кінетичної енергії генераторів.

Невеликі відхилення від номінальної частоти системи дуже важливі для регулювання окремих генераторів та оцінки рівноваги мережі в цілому. Коли мережа сильно звантажена, частота сповільнюється, і регулятори регулюють свої генератори так, щоб виводилася більша потужність (контроль швидкості падіння). При слабкому навантаженні електромережі частота сітки перевищує номінальну частоту, і це сприймається системами автоматичного управління генерацією в мережі як ознака того, що генератори повинні зменшити свою продуктивність.

Крім того, часто існує центральне управління, яке може змінювати параметри систем AGC протягом часових шкал протягом хвилини або довше для подальшого регулювання потоків регіональної мережі та робочої частоти мережі. Для цілей обліку часу номінальна частота буде дозволена змінюватись у короткостроковій перспективі, але її буде скориговано, щоб запобігти збільшенню чи втраті годинниками з лінійним управлінням протягом цілого 24-годинного періоду.

Вся синхронна мережа працює на тій самій частоті, сусідні сітки не будуть синхронізовані, навіть якщо вони працюють на тій же номінальній частоті. Високовольтні лінії постійного струму або трансформатори змінної частоти можуть бути використані для з'єднання двох мереж з'єднання змінного струму, які не синхронізовані між собою. Це забезпечує переваги взаємозв'язку без необхідності синхронізації ще більш широкої області. Наприклад, порівняйте широкосмугову синхронну сіткову карту Європи з картою ліній HVDC.

**Напруга.** Мережі призначені для постачання електроенергії своїм споживачам з переважно постійною напругою. Це повинно бути досягнуто за рахунок різного попиту, змінних реактивних навантажень і навіть нелінійних навантажень, при цьому електроенергія, що постачається генераторами та розподільчо-передатвальним обладнанням, не є абсолютно надійною [27]. Часто сітки використовують перемикачі на трансформаторах поблизу споживачів для регулювання напруги та утримання її в межах специфікацій.

**Попит.** Потреба або навантаження на електричну мережу — це загальна електрична потужність, яку вилучають користувачі мережі. Графік попиту з часом називається кривою попиту.

Базове навантаження - це мінімальне навантаження на мережу протягом будь-якого періоду, піковий попит - це максимальне навантаження. Історично склалося так, що базове навантаження зазвичай зустрічалося з обладнанням, відносно дешевою в експлуатації, яке працювало безперервно тижнями або місяцями, але в усьому світі це стає менш поширеним явищем. Вимоги до додаткового пікового попиту іноді виробляються дорогими піковими заводами, які є генераторами, оптимізованими для швидкого включення в мережу, але вони також стають все менш поширеними.

**Ємність.** Суму максимальних вихідних потужностей генераторів, приєднаних до електричної мережі, можна вважати ємністю мережі.

Однак на практиці вони ніколи не вичерпуються одночасно. Як правило, деякі генератори продовжують працювати з меншою вихідною потужністю (запас обертання) для усунення несправностей, а також змін попиту. Крім того, генератори можуть бути відключені від роботи з технічного обслуговування або з інших причин, таких як наявність енергії (паливо, вода, вітер, сонце тощо) або обмеження забруднення.

**Потужність фірми** - це максимальна вихідна потужність мережі, яка відразу доступна протягом певного періоду часу і є набагато більш корисною цифрою.

### Реакція електромережі на неполадки

**Неполадки або збої** у роботі електромережі зазвичай пов'язані з тим, що генератори або лінії електропередачі спрацьовують через автоматичні вимикачі через несправності, що призводять до втрати виробничих потужностей клієнтів або надмірного попиту. Це часто призводить до зменшення частоти, а інші генератори реагують і разом намагаються стабілізуватися вище мінімуму. Якщо це неможливо, може виникнути кілька сценаріїв.

Великий збій в одній частині електромережі — якщо її швидко не компенсувати-може призвести до того, що струм перенаправиться від інших генераторів до споживачів по лініях передачі недостатньої потужності, що спричинить подальші збої. Одним з недоліків широко підключеної мережі є, отже, можливість каскадного виходу з ладу та широкого відключення електроенергії. Зазвичай центральний орган призначається для полегшення зв'язку та розробки протоколів для підтримки стабільної мережі. Наприклад, Північноамериканська корпорація надійності електроенергії отримала обов'язкові повноваження в США у 2006 році та має консультативні повноваження у відповідних районах Канади та Мексики.

**Браунтаут.** *Браунтаут (Brownout)* — це навмисне або ненавмисне падіння напруги в системі електропостачання. Навмисне відключення споживачів від мережі використовують для зменшення навантаження в надзвичайній ситуації. Зниження напруги триває протягом декількох хвилин або годин, на відміну від короткочасного спаду напруги. Термін «браунтаут» походить від затемнення, яке виникає під час освітлення лампочками розжарюванням, коли напруга падає. Зниження напруги може бути наслідком порушення роботи електричної мережі, а іноді може бути застосовано для того, щоб зменшити навантаження та запобігти відключенню електроенергії, відомому як відключення електроенергії

**Блекаут.** *Блекаут* (Blackout), тобто *відключення електроенергії*, або *відключенням живлення* — це втрата постачання електроенергії в певній зоні.

Збої в електроживленні можуть бути спричинені неполадками на електростанціях, пошкодженням ліній електропередач, підстанцій чи інших частин розподільної системи, коротким замиканням, каскадним збоєм, спрацюванням запобіжника або автоматичного вимикача, а також людською помилкою.

Відключення електроенергії особливо критичні на місцях, де екологія та громадська безпека знаходяться під загрозою. Такі установи, як лікарні, очисні споруди, шахти, притулки тощо, зазвичай мають резервні джерела живлення, такі як резервні генератори, які автоматично запускаються при втраті електроенергії. Інші критичні системи, такі як телекомунікації, також повинні мати аварійне живлення. Акумуляторна кімната телефонної станції зазвичай має батареї свинцево-кислотних акумуляторів для резервного живлення, а також гніздо для підключення генератора під час тривалих відключень.

**Зняття навантаження** (*Load shedding*) (**Реагування на зміну попиту** (*Demand response*)). Системи виробництва та передачі електроенергії не завжди можуть відповідати вимогам *пікового попиту*, тобто найбільшої кількості електроенергії, необхідна всім споживачам комунальних послуг у певному регіоні. У таких ситуаціях загальний попит повинен бути знижений або шляхом відключення обслуговування деяких пристроїв, або через зниження напруги живлення (відключення), щоб запобігти неконтрольованим перебоям у обслуговуванні, таким як відключення електроенергії (поширені відключення електроенергії) або пошкодження обладнання. Комунальні підприємства можуть накласти зменшення навантаження на зони обслуговування через цільові відключення електроенергії, постійні відключення електроенергії або за домовленістю з конкретними промисловими споживачами з високим рівнем використання, щоб вимкнути обладнання у період максимального попиту в системі.

**Чорний пуск** (*Black start*). Чорний пуск — це процес відновлення роботи електростанції або частини електромережі без використання зовнішньої мережі передачі електроенергії для відновлення після повного або часткового відключення.

Зазвичай, електроенергія, що використовується в межах електростанції, забезпечується власними генераторами станції. Якщо всі основні генератори електростанції вимкнені, електроенергія, що обслуговується станцією, забезпечується витягуванням живлення від мережі через лінію електропередачі електростанції. Однак під час відключення в широкій зоні електроенергія поза мережею недоступна. За відсутності електромережі для запуску електромережі в експлуатацію необхідно виконати так званий «чорний пуск».

Для забезпечення «чорного пуску» деякі електростанції мають невеликі дизельні генератори, які зазвичай називаються *дизель-генераторами «чорного пуску»* (*black start diesel generator — BSDG*), які можна використовувати для запуску великих генераторів (потужністю кілька мегават), які в свою чергу можуть бути використані для запуску електромережі, генератори електростанцій. Виробничі установки, які використовують парові турбіни, вимагають потужності обслуговування станції до 10% від їх потужності для насосів подачі води в котлах, повітродувках

котла з примусовою тягою та для приготування палива. Забезпечувати таку велику смність у режимі очікування на кожній станції неекономічно, тому електроживлення з чорного пуску повинно забезпечуватися через призначені лінії зв'язку з іншої станції.



*Міський горизонт у сутінках з освітленими лише кількома вікнами офісних будівель. Торонто під час північно-східного затемнення 2003 року, яке вимагало чорного запуску генеруючих станцій.*

Часто гідроелектростанції позначаються як джерела чорного пуску для відновлення мережових з'єднань. Гідроелектростанція потребує дуже мало початкової потужності для пускових цілей (достатньо, щоб відкрити впускні засувки і подати струм збудження на котушки генератора) і може дуже швидко включити великий блок живлення, щоб дозволити запуск викопного палива або атомних станцій. Деякі типи турбін згоряння можуть бути налаштовані на чорний запуск, забезпечуючи інший варіант у місцях без відповідних гідроелектростанцій. [2] У 2017 році комунальне підприємство у Південній Каліфорнії успішно продемонструвало використання акумуляторної системи накопичення енергії для забезпечення чорного запуску, запускаючи газову турбину з комбінованим циклом з простою. [3]

Один із способів чорного запуску (заснований на реальному сценарії) може бути таким:

- Акумулятор запускає невеликий дизельний генератор, встановлений на гідроелектростанції.

- Потужність дизельного генератора використовується для введення генераторної станції в експлуатацію.
- Ключові лінії передачі між станцією та іншими районами під напругою.
- Потужність від станції використовується для запуску однієї з базових установок на ядерному/виплоному паливі.
- Потужність від базової установки навантаження використовується для перезапуску всіх інших електростанцій в системі.

Нарешті, електроенергія знову подається до загальної мережі розподілу електроенергії та надсилається споживачам. Часто це буде відбуватися поступово; запуск усієї мережі одночасно може бути неможливим. Зокрема, після тривалого відключення влітку всі будівлі будуть теплими, і якщо одразу відновити подачу електроенергії, попит лише з блоків кондиціонування буде більшим, ніж може забезпечити мережа. У холодному кліматі подібне може виникнути взимку з використанням опалювальних приладів.

У більшій мережі чорний початок часто передбачає запуск кількох «островів» генерації (кожен з яких забезпечує місцеві зони навантаження), а потім синхронізацію та повторне з'єднання цих островів для формування повної мережі. Задіяні електростанції повинні мати можливість приймати великі крокові зміни навантаження при повторному підключенні електромережі.

Існує кілька методів початку чорного старту: гідроелектростанції, дизельні генератори, газові турбіни з відкритим циклом, акумуляторні батареї сітки, накопичувач стисненого повітря тощо. Різні генеруючі мережі використовують різні підходи, що залежать від таких факторів, як вартість, складність, наявність місцевих ресурсів (тобто відповідних долин для гребель), взаємозв'язок з іншими генеруючими мережами та час відгуку, необхідний для процесу чорного запуску.

### Масштаби електромереж

**Мікромережа.** Мікромережа — це локальна мережа, яка зазвичай є частиною регіональної широкоплатової синхронної сітки, але яка може відключатися та працювати автономно. Це може статися у часи, коли основна мережа зазнає збою. Це відоме як острів, і воно може працювати нескінченно на власних ресурсах.

Порівняно з більшими мережами, мікромережі зазвичай використовують мережу розподілу з низькою напругою та розподілені генератори. Мікромережі можуть бути не тільки більш стійкими, але й дешевшими для впровадження в ізольованих районах.

Метою проектування є те, що місцева територія виробляє всю енергію, яку вона використовує.

**Синхронна мережа широкого діапазону.** *Синхронна мережа широкого діапазону* безпосередньо з'єднує багато генераторів, що постачають живлення змінного струму з тією ж відносною частотою для багатьох споживачів. Наприклад, у Північній Америці є чотири основні синхронні мережі (Західна, Східна, Квебецька та Техаська). У Європі одна велика мережа з'єднує більшу частину континентальної Європи.

Синхронна мережа широкого діапазону — це електрична мережа регіонального масштабу або більше, яка працює на синхронізованій частоті і електрично

пов'язана між собою під час нормальних системних умов. Ці зони також відомі як синхронні зони, найбільша з яких — синхронна мережа континентальної Європи (ENTSO-E) з генерацією 667 гігават (ГВт), а найширший регіон, що обслуговується, — це система IPS/UPS, що обслуговує країни колишнього Радянського Союзу. Синхронні електромережі з достатньою потужністю полегшують торгівлю на ринку електроенергії на широких територіях. В ENTSO-E у 2008 році на Європейській енергетичній біржі (EEX) було продано понад 350 000 мегават годин на день.

Кожне з міжмережних з'єднань у Північній Америці працює на номінальній частоті 60 Гц, а в Європі - на частоті 50 Гц. Сусідні з'єднання з однаковою частотою та стандартами можуть бути синхронізовані та безпосередньо з'єднані для утворення більшого взаємозв'язку, або вони можуть розподіляти електроенергію без синхронізації через *високовольтні лінії електропередачі постійного струму* (зв'язки постійного струму) або з *трансформаторами зі змінною частотою* (*variable-frequency transformers — VFT*), які дають змогу контролювати потік енергії, а також функціонально ізолюють незалежні частоти змінного струму кожної сторони.

Переваги синхронних зон включають об'єднання генерації, що призводить до зниження витрат на виробництво; об'єднання навантаження, що призводить до значних вирівнювальних ефектів; загальне резервування резервів, що призводить до зменшення витрат на первинну та вторинну резервну потужність; відкриття ринку, що призводить до можливості укладення довгострокових контрактів та короткострокових бірж електроенергії; та взаємодопомоги у разі порушень.

Одним недоліком широкосмугової синхронної сітки є те, що проблеми в одній частині можуть мати наслідки для всієї сітки. Наприклад, у 2018 році Косово використав більше електроенергії, ніж генерував через суперечку з Сербією, що призвело до того, що фаза по всій синхронній мережі Континентальної Європи відстає від того, що мало би бути. Частота впала до 49,996 Гц. Це призвело до уповільнення роботи деяких годинників на шість хвилин.

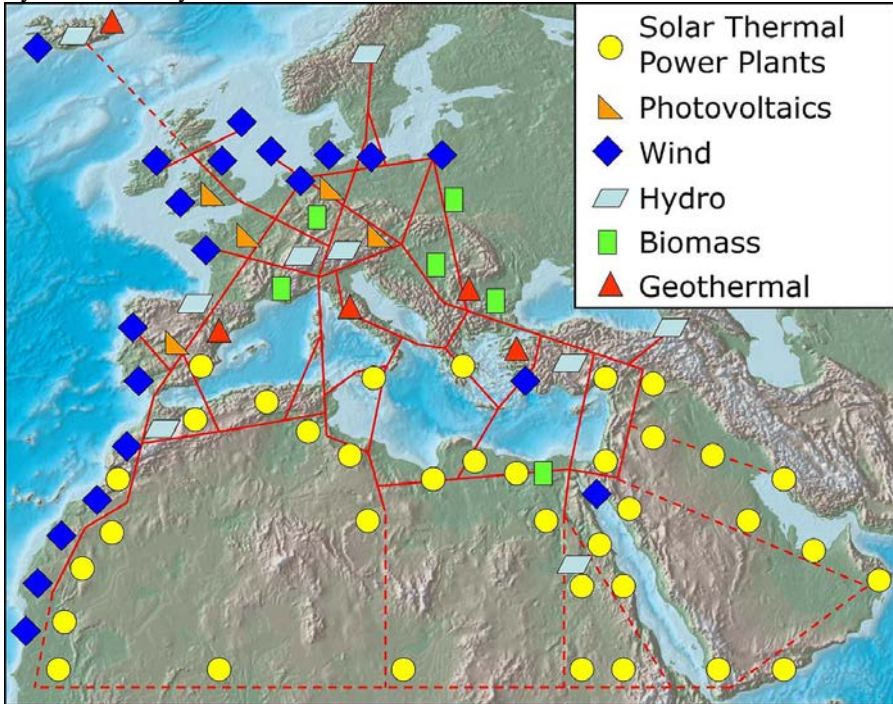
**Супермережа.** *Супермережа* — це електромережа на великій території, призначена для торгівлі великими обсягами електроенергії на великі відстані. Іноді її також називають *мегамережею*. Супермережі можуть підтримувати глобальний енергетичний перехід, згладжуючи локальні коливання вітрової та сонячної енергії. У цьому контексті вони розглядаються як ключова технологія для пом'якшення глобального потепління. Супермережі зазвичай використовують високовольтний постійний струм (*High-voltage direct current — HVDC*) для передачі електроенергії на великі відстані. Останнє покоління ліній електропередач HVDC може передавати енергію зі втратами лише 1,6% на 1000 км.

Електричні комунікації між регіонами багато разів пов'язані між собою для підвищення економічності та надійності. Електричні з'єднувачі забезпечують економію масштабу, дозволяючи купувати енергію з великих, ефективних джерел. Комуніальні підприємства можуть отримувати електроенергію з резерв генератора з іншого регіону, щоб забезпечити постійну, надійну потужність та диверсифікувати свої навантаження. Взаємозв'язок також дає змогу регіонам мати доступ до дешевої масової енергії, отримуючи електроенергію з різних джерел. Наприклад, один регіон може виробляти дешеву гідроенергетику під час сезонів з високою



## Розділ 0

водністю, але в сезони маловоддя інший регіон може виробляти дешевшу електроенергію за допомогою вітру, що дасть змогу обом регіонам отримувати доступ до дешевших джерел енергії один від одного протягом різної пори року. Сусідні комунальні служби також допомагають іншим підтримувати загальну частоту роботи системи, а також допомагають управляти передачею між підприємствами комунальних послуг.



Один концептуальний план супермережі, що пов'язує відновлювані джерела в Північній Африці, на Близькому Сході та в Європі. (DESERTEC)

Рівень взаємозв'язку електроенергії (*Electricity Interconnection Level — EIL*) мережі — це відношення загальної потужності взаємозв'язку до потужності мережі, поділене на встановлену виробничу потужність мережі. Всередині ЄС він встановив ціль національних мереж, які досягнуть 10% до 2020 року та 15% до 2030 року.

### Тенденції розвитку електромереж

#### Реагування на попит

*Реагування на попит* — це метод управління мережею, де роздрібним або оптовим клієнтам пропонують або заохочують їх в електронному вигляді або вручну, щоб зменшити їх навантаження. В даний час оператори мереж передачі використовують відповідь на запит, щоб запитувати зменшення навантаження у великих

споживачів енергії, таких як промислові підприємства. Такі технології, як розумне облік, можуть заохочувати споживачів використовувати електроенергію, коли електроенергії в достатку, дозволяючи змінювати ціни.

### Старіння інфраструктури

Незважаючи на нові інституційні механізми та мережеві проекти електричної мережі, її інфраструктури постачання електроенергії зазнають старіння у розвиненому світі. Фактори, що сприяють поточному стану електромережі та її наслідки, включають:

- старе обладнання — більш старе обладнання має більш високі показники відмов, що призводить до перебоїв з клієнтами, що впливає на економіку та суспільство; також, застарілі активи та споруди призводять до збільшення витрат на технічне обслуговування та подальші витрати на ремонт та відновлення.
- Застарілий макет системи-старі райони потребують серйозних додаткових ділянок підстанцій та переваг, які неможливо отримати в поточній зоні і змушені використовувати існуючі, недостатні об'єкти.
- Застаріле машинобудування - традиційні інструменти планування та інженерії постачання енергії неефективні у вирішенні поточних проблем застарілого обладнання, застарілих схем системи та сучасних дерегульованих рівнів навантаження.
- Стара культурна цінність - планування, інженерія, експлуатація системи з використанням концепцій та процедур, які працювали у вертикально інтегрованій промисловості, загострюють проблему в умовах нерегульованої галузі. [49]

### Розподілена генерація

З огляду на взаємопов'язаність об'єктів електромережі та відкриту конкуренцію, що відбувається у вільній ринковій економіці, починає мати сенс дозволяти та навіть заохочувати **розподілену генерацію** (*distributed generation* — *DG*). Менші генератори, які зазвичай не належать комунальному підприємству, можуть бути підключені до мережі для забезпечення потреби в електроенергії. Об'єкт меншої генерації може бути власником будинку з надмірною потужністю від сонячної панелі або вітрогенератора. Це може бути невеликий офіс з дизельним генератором. Ці ресурси можуть бути залучені в мережу або за бажанням комунального підприємства, або власником генерації, намагаючись продати електроенергію. Багатьом невеликим генераторам дозволено продавати електроенергію назад у мережу за ту ж ціну, яку вони заплатили б за її купівлю.

З розвитком XXI століття електроенергетична промисловість прагне скористатися новими підходами для задоволення зростаючого попиту на енергію. Комунальні підприємства зазнають тиску, щоб еволюціонувати свої класичні топології з урахуванням розподіленої генерації. Оскільки вироблення сонячних та вітрових генераторів на даху стає все більш поширеним, відмінності між розподільною та передавальною мережами будуть продовжувати стиратися. Енергетичній галузі необхідно краще співпрацювати з компаніями інших галузей, щоб сформувати "загальну екосистему", інтегрувати центральні та розподілені енергоресурси (*distributed energy resources* — *DER*), щоб дати клієнтам те, що вони хочуть.

Електрична мережа спочатку була побудована таким чином, щоб електроенергія надходила від постачальників електроенергії до споживачів. Однак із запровадженням ПДВ електроенергія повинна надходити в обидві сторони по електромережі, оскільки у споживачів можуть бути такі джерела живлення, як сонячні панелі.

### Розумна мережа (Smart grid)

*Розумна мережа* стане вдосконаленням електричної мережі ХХ століття, використовуючи двосторонню комунікацію та розподілені так звані інтелектуальні пристрої. Двосторонні потоки електроенергії та інформації можуть покращити мережу доставки. Дослідження в основному зосереджені на трьох системах розумної мережі — інфраструктурній системі, системі управління та системі захисту.

*Інфраструктурна система* — це енергетична, інформаційна та комунікаційна інфраструктура, що лежить в основі інтелектуальної мережі, яка підтримує:

- Розширене виробництво, доставка та споживання електроенергії
- Розширений облік інформації, моніторинг та управління
- Передові комунікаційні технології

Розумна мережа дає змогу електроенергетиці спостерігати та контролювати частини системи з більш високою роздільною здатністю у часі та просторі. Однією з цілей розумної мережі є обмін інформацією в режимі реального часу, щоб зробити роботу максимально ефективною. Це дозволило керувати мережею на всіх часових шкалах від високочастотних комутаційних пристроїв у мікросекундному масштабі, до зміни вітрової та сонячної потужності у хвилинній шкалі, до майбутніх наслідків викидів вуглецю, що генеруються при виробництві електроенергії у десятирічному масштабі.

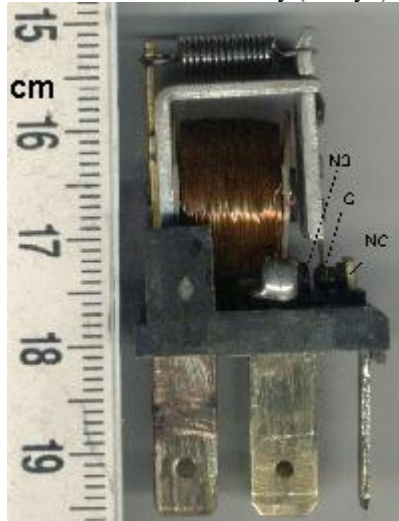
*Система управління* — це підсистема в розумній мережі, яка надає розширені послуги управління та контролю. Більшість існуючих робіт мають на меті покращити енергоефективність, профіль попиту, корисність, вартість та викиди на основі інфраструктури за допомогою оптимізації, машинного навчання та теорії ігор. Очікується, що в рамках вдосконаленої інфраструктурної системи розумних мереж з'явиться все більше нових управлінських послуг та програм, які врешті-решт революціонізують повсякденне життя споживачів.

*Система захисту розумної мережі* забезпечує аналіз надійності мережі, захист від збоїв, а також послуги з безпеки та захисту конфіденційності. Хоча додаткова комунікаційна інфраструктура розумної мережі забезпечує додаткові механізми захисту та безпеки, вона також становить ризик зовнішньої атаки та внутрішніх збоїв. У звіті про кібербезпеку технологій інтелектуальних мереж, вперше випущених у 2010 році, а пізніше оновлених у 2014 році, Національний інститут стандартів і технологій США зазначає, що можливість збирати більше даних про споживання енергії з інтелектуальних лічильників клієнтів також викликає серйозні проблеми конфіденційності, оскільки інформація, що зберігається на лічильнику, потенційно вразлива до порушень даних, може бути видобута для отримання особистої інформації про клієнтів.

У США Закон про енергетичну політику 2005 року та Розділ XIII Закону про енергетичну незалежність та безпеку 2007 року передбачають фінансування для стимулювання розвитку розумних мереж. Мета полягає в тому, щоб дозволити комунальним підприємствам краще прогнозувати свої потреби, а в деяких випадках залучати споживачів до тарифів за час використання. Також були виділені кошти на розробку більш надійних технологій контролю енергії.

## ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

*Електромеханіка* поєднує процеси та процедури, взяті з електротехніки та машинобудування. Електромеханіка зосереджується на взаємодії електричних та механічних систем в цілому та на взаємодії двох систем між собою. Цей процес особливо помітний в таких системах, як системи оберткових електричних машин постійного або змінного струму, які можуть бути сконструйовані та експлуатовані для генерування енергії за допомогою механічного процесу (генератор) або використовуються для живлення механічного впливу (двигун).



*Реле-поширений електромеханічний пристрій.*

Електромеханічні пристрої — це пристрої, у яких поєднуються як електричні, так і механічні процеси. Строго кажучи, вимикач з ручним управлінням є електромеханічним компонентом через механічний рух, що викликає електричний вихід. Хоча це правда, під цим терміном зазвичай розуміють пристрої, які мають електричний сигнал для створення механічного руху, або навпаки, механічний рух для створення електричного сигналу. Часто з використанням електромагнітних принципів, таких як реле, які дозволяють напрузі або струму керувати іншою, зазвичай ізольованою напругою електричного кола або струмом шляхом механічного перемикання наборів контактів та соленоїдів, за допомогою яких напруга може приводити в рух рухому зв'язок, як у електромагнітних реле.

До розвитку сучасної електроніки електромеханічні пристрої широко використовувалися у складних підсистемах деталей, включаючи електричні друкарські машинки, телепринтери, годинники, початкові телевізійні системи та дуже ранні електромеханічні цифрові комп'ютери. Твердотільна електроніка замінила електромеханіку в багатьох сферах застосування.

**Сучасна практика.** Сьогодні електромеханічні процеси в основному використовуються енергетичними компаніями. Усі паливні генератори

перетворюють механічний рух на електричну. Деякі відновлювані джерела енергії, такі як вітер та гідроелектростанції, живляться від механічних систем, які також перетворюють рух на електрику.

В останні тридцять років 20-го століття обладнання, яке, як правило, використовувало б електромеханічні пристрої, стало дешевшим. Це обладнання стало дешевшим, оскільки воно використовувало більш надійно інтегровані схеми мікроконтролера, що містять в кінцевому рахунку кілька мільйонів транзисторів, і програму для виконання того самого завдання за допомогою логіки. З електромеханічними компонентами були лише рухомі частини, такі як механічні електричні приводи. Ця більш надійна логіка замінила більшість електромеханічних пристроїв, тому що будь-яка точка в системі, яка для належного функціонування повинна спиратися на механічні рухи, неминуче матиме механічний знос і зрештою вийде з ладу. Правильно спроектовані електронні схеми без рухомих частин продовжуватимуть працювати майже нескінченно і будуть використовуватися в більшості простих систем управління зворотним зв'язком. Схеми без рухомих частин з'являються у великій кількості предметів - від світлофорів до пральних машин.

Іншим електромеханічним пристроєм є п'єзоелектричні пристрої, але вони не використовують електромагнітні принципи. П'єзоелектричні пристрої можуть створювати звук або вібрацію від електричного сигналу або створювати електричний сигнал від звуку або механічної вібрації.

Щоб стати інженером-електромеханіком, типові курси коледжу включають математику, техніку, інформатику, конструювання машин та інші автомобільні класи, які допомагають набути навичок у вирішенні неполадок та аналізі проблем із машинами.

Станом на 2016 рік приблизно 13 800 людей працюють електромеханічними техніками в США. Перспективи роботи технічних працівників на 2016 - 2026 роки - зростання на 4%, що означає зміну зайнятості на 500 посад. Цей прогноз повільніший за середній.

### Історія електромеханіки

Перший електродвигун був винайдений у 1822 році Майклом Фарадеєм. Двигун був розроблений лише через рік після того, як Ганс Крістіан Ерстед виявив, що електричний струм створює пропорційне магнітне поле. Цей ранній двигун був просто провідником, частково зануреним у склянку ртуті з магнітом на дні. Коли провід був підключений до батареї, створювалося магнітне поле, і ця взаємодія з магнітним полем, що виділяється магнітом, викликало обертання дроту.

Через десять років Майкл Фарадей знову винайшов перший електричний генератор. Цей генератор складався з магніту, що проходить через котушку дроту і наведений струм, який вимірювався гальванометром. Дослідження Фарадея та експерименти з електрикою є основою більшості сучасних електромеханічних принципів, відомих сьогодні.

Інтерес до електромеханіки виріс із дослідженням міжмиського зв'язку. Стрімке зростання виробництва внаслідок промислової революції породило попит на внутрішньоконтинентальний зв'язок, що дозволило електромеханіці пробитися на державну службу. Реле, створене за допомогою телеграфії, оскільки

електромеханічні пристрої використовувалися для регенерації телеграфних сигналів. Перемикач Strowger, панельний перемикач та подібні пристрої широко використовувалися в раних автоматизованих телефонних станціях. Поперечні вимикачі були вперше широко встановлені в середині 20 -го століття у Швеції, США, Канаді та Великобританії, і вони швидко поширилися по всьому світу.

Електромеханічні системи зазнали значного стрибка в період з 1910 по 1945 рік, коли світ двічі потрапив у світову війну. Перша світова війна спричинила сплеск нової електромеханіки, оскільки всі країни використовували прожектори та радіоприймачі. До Другої світової війни країни розвинули та централізували свою армію навколо універсальності та потужності електромеханіки. Одним із прикладів таких, які все ще використовуються сьогодні, є генератор змінного струму, який був створений для живлення військової техніки в 1950 -х роках, а пізніше перепризначений для автомобілів у 1960 -х роках. Післявоєнна Америка отримала величезну користь від військового розвитку електромеханіки, оскільки домашню роботу швидко замінили електромеханічні системи, такі як мікрохвильові печі, холодильники та пральні машини. Електромеханічні телевізійні системи кінця XIX століття були менш успішними.

Електричні друкарські машинки розвивалися до 1980-х років як "друкарські машинки з електроприводом". Вони містили єдиний електричний компонент - двигун. Якщо раніше натискання клавіші безпосередньо переміщало панель друку, то тепер вона задіяла механічні зв'язки, які направляли механічну силу від двигуна на панель друку. Це також стосувалося пізнішої IBM Selectric. У 1946 році в Bell Labs був розроблений комп'ютер Bell Model V. Це був електромеханічний релейний пристрій; цикли займали секунди. У 1968 році електромеханічні системи все ще перебували на серйозному розгляді для комп'ютера управління польотом літака, поки пристрій, заснований на широкомасштабній інтеграційній електроніці, не був прийнятий у Центральному комп'ютері повітряних даних.

### Реле

*Реле* — це вимикач, або перемикач з електричним приводом. Він складається з набору вхідних клем для одного або декількох сигналів управління та набору робочих контактних клем. Перемикач може мати будь-яку кількість контактів у кількох формах контактів, таких як встановлення контактів, розривання контактів або їх комбінації.

Реле використовуються там, де необхідно керувати електричним колом за допомогою незалежного сигналу малої потужності, або коли кількома колами необхідно керувати одним сигналом. Вперше реле були використані в телеграфних схемах міжміського сполучення як повторювачі сигналу: вони оновлюють сигнал, що надходить з однієї схеми, передаючи її по іншій схемі. Для виконання логічних операцій реле широко використовувалося в телефонних станціях і раних комп'ютерах.

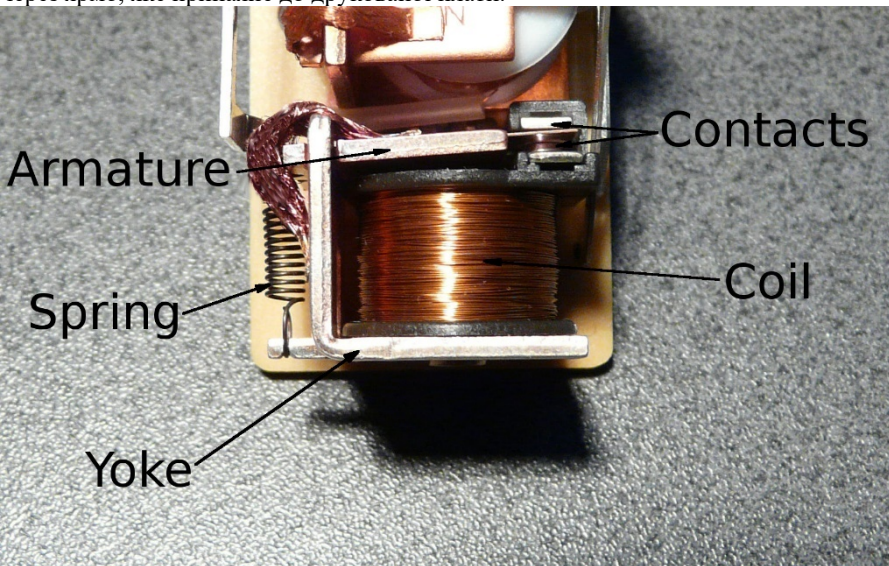
Традиційна форма реле використовує електромагніт для замикання або розмикання контактів, але були винайдені інші принципи роботи, наприклад, у твердотільних реле, які використовують напівпровідникові властивості для управління, не спираючись на рухомі частини. Для захисту електричних кіл від

перевантаження або несправностей використовуються реле з відкаліброваними робочими характеристиками, а іноді і декілька робочих котушок; у сучасних електроенергетичних системах ці функції виконують цифрові прилади, які ще називають захисними реле.

Реле фіксації вимагає лише одного імпульсу керівної потужності для постійної роботи вимикача. Інший імпульс, застосований до другого набору клем керування, або імпульс з протилежною полярністю, скидає перемикач, тоді як повторювані імпульси такого ж типу не впливають. Реле з магнітною фіксацією корисні в пристроях, коли перерване живлення не повинно впливати на схеми, якими керує реле.

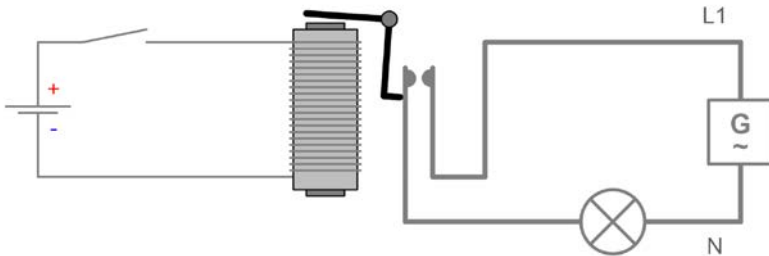
### Базова конструкція і принцип роботи електромагнітного реле

Просте електромагнітне реле складається з котушки ізолюваного провідника, обмотаної навколо м'якого залізного сердечника (соленоїда), залізного **ярма** (*yoke*), яке забезпечує низький шлях відхилення магнітного потоку, рухомої залізної **якоря** (*armature*) та одного або декількох наборів контактів (є два контакти в реле на фото). Якір шарнірно з'єднаний з ярмом і механічно пов'язаний з одним або кількома наборами рухомих контактів. Якір утримується на місці **пружиною** (*spring*) так, що при знеструмленні реле виникає повітряний зазор у магнітопроводі. У цьому стані один із двох наборів контактів на зображеному реле замкнутий, а інший - відкритий. Інші реле можуть мати більше або менше наборів контактів залежно від їх функції. Реле на малюнку також має провід, що з'єднує якір з ярмом. Це забезпечує безперервність електричного зв'язку між рухомими контактами на якорі та провідною доріжкою на **друкованій платі** (*printed circuit board — PCB*) через ярмо, яке припаяне до друкованої плати.

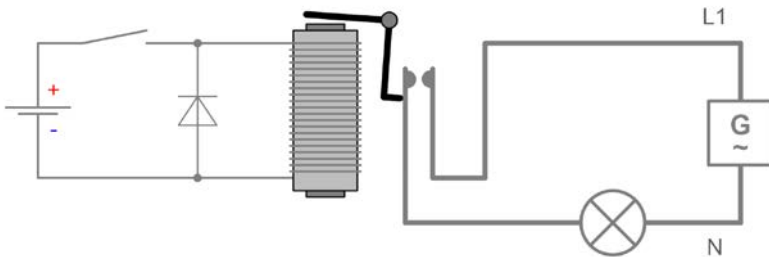


Просте електромеханічне реле





*Робота без зворотного діода, дуга викликає погіршення контактів вимикача*



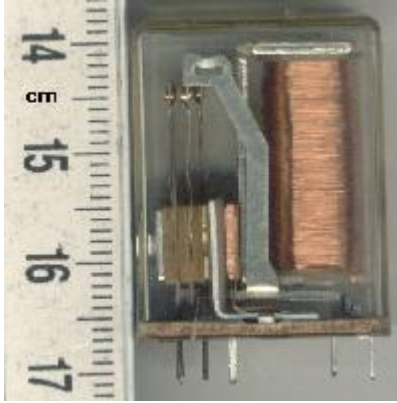
*Робота зі зворотним діодом дає змогу не допустити дуги в контурі управління*

При проходженні електричного струму через котушку він генерує магнітне поле, яке активує якір, і послідовне переміщення рухомого контакту (ів) або встановлює, або розриває (залежно від конструкції) з'єднання з нерухомим контактом. Якщо набір контактів був замкнутий при відключенні реле, то рух розмикає контакти і розриває з'єднання, і навпаки, якщо контакти були розімкнені. Коли струм в котушці вимикається, якоря повертається силою, приблизно наполовину меншою за магнітну силу, до її розслабленого положення. Зазвичай ця сила забезпечується пружиною, але сила тяжіння також зазвичай використовується в промислових стартерах двигунів. Більшість реле виготовляються для швидкої роботи. У низьковольтному застосуванні це зменшує шум; в умовах високої напруги або струму це зменшує дуги.

Коли на котушку подається постійний струм, на котушку часто розміщують діод або резистор для розсіювання енергії від руйнуючого магнітного поля під час дезактивації, що в іншому випадку спричинить стрибок напруги, небезпечний для компонентів напівпровідникової ланцюга. Такі діоди не були широко використовували до застосування транзисторів як драйверів реле, але незабаром стали повсюдними, оскільки ранні германієві транзистори були легко зруйновані цим сплеском. Деякі автомобільні реле містять діод всередині корпусу реле. Хоча резистори

## Розділ 0

більш міцні, ніж діоди, вони менш ефективні у усуненні стрибків напруги, що генеруються реле [9], і тому не так часто використовуються.



*Реле «маленька коліска» часто використовується в електроніці. Термін "коліска" позначає форму якоря реле*

Якщо реле має велике або особливо реактивне навантаження, може виникнути подібна проблема стрибків струму навколо вихідних контактів реле. У цьому випадку схема відключення (конденсатор і резистор послідовно) через контакти може поглинути стрибок. Конденсатори відповідного номіналу та відповідний резистор продаються як єдиний упакований компонент для цього звичайного використання.

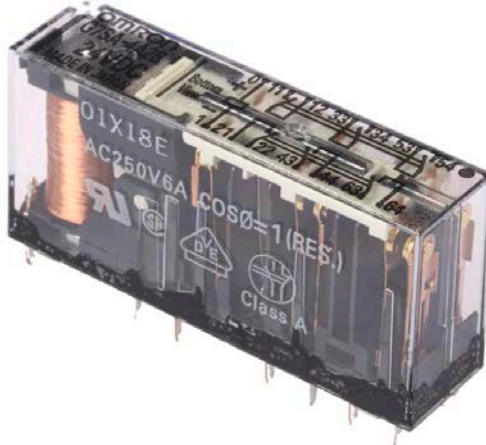
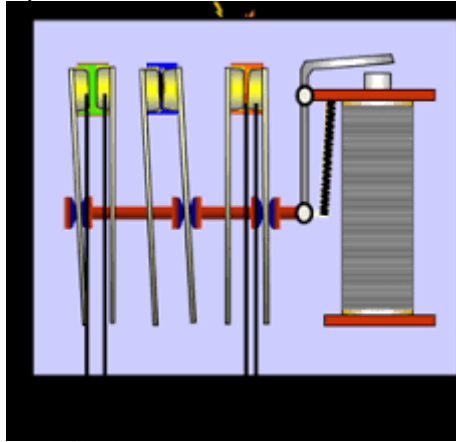
Якщо котушка розрахована на живлення від змінного струму (АС), використовується якийсь метод для поділу потоку на дві нефазні складові, які зливаються, збільшуючи мінімальне натяг на якорі протягом циклу змінного струму. Як правило, це робиться за допомогою невеликого мідного «затінювального кільця», опресованого навколо частини сердечника, що створює затримку, позафазну складову, яка утримує контакти під час перетину нуля контрольної напруги.

Контактні матеріали для реле залежать від застосування. Матеріали з низьким опором контакту можуть окислюватися повітрям або можуть мати тенденцію «липнути» замість чистого роз'єднання при відкритті. Контактний матеріал може бути оптимізований для низького електричного опору, високої міцності, щоб витримати повторювані операції, або високої ємності, щоб витримати нагрівання дуги. Там, де потрібен дуже низький опір або бажана низька напруга під впливом тепла, можна використовувати позолочені контакти разом з паладієм та іншими неокислюваними напівдорогоцінними металами. Для перемикання сигналу використовуються срібні або сріблені контакти. Реле, змочені ртуттю, створюють і розривають ланцюги, використовуючи тонку самооновлювальну плівку з рідкої ртуті. Для реле більшої потужності, що перемикає багато ампер, таких як контактори двигуна, контакти виконуються із сумішей срібла та оксиду кадмію, забезпечуючи низький контактний опір та високий опір нагріванню дуги. Контакти, що використовуються в пристроях, що несуть десятки або сотні ампер, можуть включати додаткові структури для розсіювання тепла та управління дугою, що утворюється при

перериванні ланцюга. Деякі реле мають контакти, що замінюються на місцях, наприклад, певні реле верстатів; їх можна замінити, коли вони зношені, або змінити їх між нормально відкритим та нормально замкнутим станом, щоб дозволити зміни в керованому контурі.

### Види електромагнітних реле

**Реле з керованими силою контактами.** Реле з контактами, керованими силою, має контакти реле, які механічно з'єднані між собою, тому, коли котушка реле знаходиться під напругою або знеструмлено, усі пов'язані контакти рухаються разом.



*Реле з керованими силою контактами*

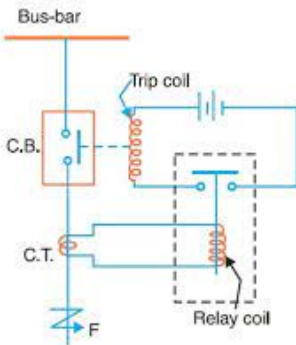
Якщо один набір контактів у реле стане нерухомим, жоден інший контакт того ж реле не зможе зрушити. Функція керованих силою контактів полягає в тому, що контур безпеки могла перевірити стан реле. Контакти, керовані

## Розділ 0

силою, також відомі як "контакти з позитивним керуванням", "заблоковані контакти", "механічно пов'язані контакти" або "реле безпеки".

Контактні реле, керовані силою, виготовляються з різними наборами основних контактів, *нормально відкриті* (*normally open — NO*), *нормально замкнені* (*normally closed — NC*) або перемиканням, а також для системи моніторингу одним або кількома допоміжними наборами контактів, часто зі зменшеним струмом або напругою. Контакти можуть бути усі нормально відкриті, усі нормально замкнені, перемикання або їх суміші для контактів моніторингу, щоб конструктор системи безпеки міг вибрати правильну конфігурацію для конкретного застосування. Реле безпеки використовуються як частина інженерної системи безпеки.

**Захисні реле.** В електротехніці захисне реле — це релейний пристрій, призначений для спрацювання вимикача при виявленні несправності. Першими захисними реле були електромагнітні пристрої, що працюють на рухомих частинах, щоб забезпечити виявлення ненормальних умов роботи такі як надмірний струм, перенапруга, зворотний потік потужності, надвисока частота та недостатня частота.



### Захисне реле

Цифрові реле захисту на основі мікропроцесорів тепер імітують оригінальні пристрої, а також забезпечують типи захисту та нагляду, недоцільні за допомогою електромеханічних реле. Електромеханічні реле забезпечують лише елементарну індикацію місця та походження несправності. У багатьох випадках одне мікропроцесорне реле забезпечує функції, які приймають два або більше електромеханічних пристроїв. Поєднуючи кілька функцій в одному випадку, числові реле також заощаджують капітальні витрати та витрати на обслуговування порівняно з електромеханічними реле. Проте, через їх дуже тривалий термін служби, десятки тисяч цих «тихих варткових» все ще захищають лінії передачі та електричні апарати у всьому світі. Важливі лінії передачі

та генератори мають kabіни, призначені для захисту, з багатьма окремими електромеханічними пристроями або одним або двома мікропроцесорними реле.

Теорія та застосування цих захисних пристроїв є важливою частиною освіти енергетика, який спеціалізується на захисті енергосистем. Необхідність швидко діяти для захисту пристроїв та обладнання часто вимагає від захисних реле реагування та спрацювання вимикача протягом кількох тисячних секунд.

**Контактор.** Контактор — це вимикач з електричним управлінням, який використовується для перемикання кола електричного живлення. Контактор зазвичай управляється пристроєм, яка має набагато менший рівень потужності, ніж комутоване коло, наприклад, електромагніт котушки 24 вольт, що керує вимикачем двигуна 230 вольт. Сильнострумові контакти виконані зі сплавів, що містять срібло. Неминуча дуга викликає окислення контактів; оксид срібла все ще є хорошим провідником.

На відміну від реле загального призначення, контактори розраховані на безпосереднє підключення до пристроїв з високим струмом навантаження. Номінали постійного струму для загальних контакторів коливаються від 10 до декількох сотень ампер. Реле, як правило, мають меншу ємність і зазвичай розроблені як для нормально закритих, так і для нормально відкритих застосувань.

Пристрої, що перемикають більше 15 ампер або в ланцюгах потужністю більше кількох кіловат, зазвичай називають контакторами. Окрім додаткових допоміжних слабкострумових контактів, контактори майже виключно обладнані нормально відкритими контактами ("форма А"). На відміну від реле, контактори розроблені з функціями управління та придушення дуги, що виникає при перериванні великого струму двигуна.



*Контактор*

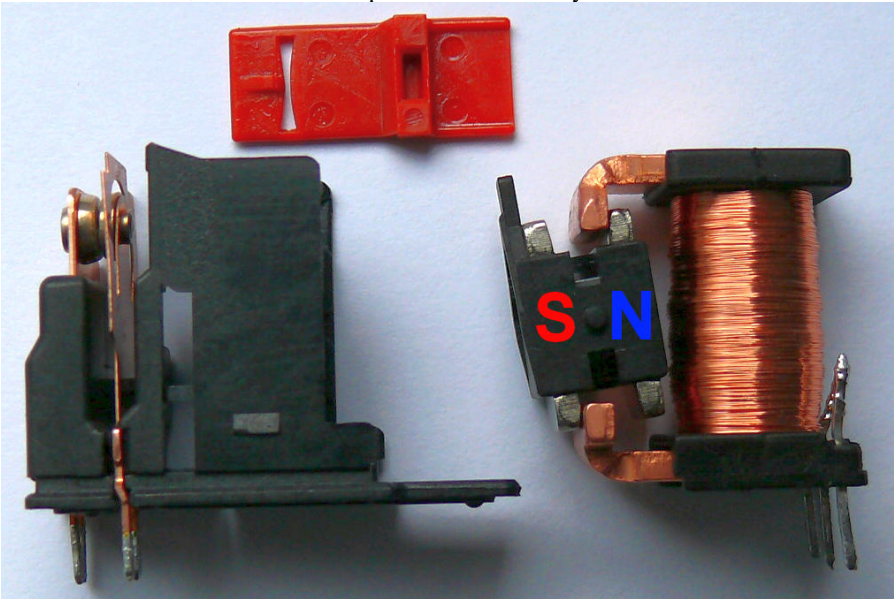
Контактори бувають різних форм з різними можливостями та функціями. На відміну від автоматичного вимикача, контактор не призначений для переривання струму короткого замикання. Контактори варіюються від тих, що мають струм розриву від декількох ампер до тисяч ампер і 24 В постійного струму до багатьох

кіловольт. Фізичний розмір контакторів коливається від пристрою, достатньо малого, щоб його можна було підняти однією рукою, до великих пристроїв приблизно на метр збоку.

Контактори використовуються для управління електродвигунами, освітленням, опаленням, батареями конденсаторів, тепловими випарниками та іншими електричними навантаженнями.

**Реле з фіксацією.** Реле фіксації, також зване імпульсним, бістабільним, реле збереження або перебування, або просто фіксатором, підтримує або контактне положення необмежено довго без подачі живлення на котушку. Перевагою є те, що одна котушка споживає електроенергію лише на мить під час перемикання реле, а контакти реле зберігають це налаштування під час відключення електроенергії. Засувне реле дозволяє дистанційно керувати освітленням будинку без гулу, який може виходити від котушки з постійним струмом (змінного струму).

В одному механізмі дві протилежні котушки з надцентровою пружиною або постійним магнітом утримують контакти на місці після знеструмлення котушки. Імпульс на одну котушку включає реле, а імпульс на протилежну котушку вимикає реле. Цей тип широко використовується там, де управління здійснюється простими вимикачами або односторонніми виходами системи управління, і такі реле зустрічаються в авіоніці та численних промислових застосуваннях.



*Реле фіксації з постійним магнітом*

Інший тип фіксації має залишковий сердечник, який утримує контакти в робочому положенні за рахунок залишкового магнетизму в сердечнику. Цей тип вимагає імпульсу струму протилежної полярності, щоб розблокувати контакти. У варіації використовується постійний магніт, який виробляє частину сили, необхідної

для замикання контакту; котушка подає достатню силу для переміщення контакту відкритим чи замкнутим, допомагаючи чи протиставляючи поле постійного магніту. Реле, що контролює полярність, потребує перемикачів перемикання або схеми приводу Н моста для управління ним. Реле може бути менш дорогим, ніж інші типи, але це частково компенсується збільшенням витрат на зовнішню схему.

В іншому типі реле з храповим механізмом має храповий механізм, який утримує контакти замкнутими після миттєвої подачі котушки під напругу. Другий імпульс в тій же або окремій котушці розмикає контакти. Цей тип можна зустріти в деяких автомобілях, для занурення фар та інших функцій, де потрібна поперемінна робота при кожному спрацьовуванні вимикача.

Вимикач витоку заземлення включає спеціалізоване фіксує реле.

Дуже ранні комп'ютери часто зберігали біти в реле з магнітною фіксацією, наприклад, у переведеному або пізнішому повторному виведенні в комутаторі IESS.

Деякі ранні комп'ютери використовували звичайні реле як своєрідний тригер — вони зберігають біти в звичайних дротяних пружинних реле або герконових реле, подаючи вихідний провід назад як вхід, що призводить до контуру зворотного зв'язку або послідовної ланцюга. Таке електричне фіксує реле вимагає постійної потужності для підтримки стану, на відміну від реле з магнітною фіксацією або реле з механічним храповим механізмом.

У комп'ютерній пам'яті фіксує реле та інші реле були замінені пам'яттю ліній затримки, яка, у свою чергу, була замінена серією все більш швидких і дедалі менших технологій пам'яті.

**Кроковий шукач** (*stepping switch*). **Кроковий шукач**, або **кроковий перемикач** — це електромеханічний пристрій, який перемикає шлях вхідного сигналу на один з кількох можливих вихідних шляхів, керований послідовними електричними імпульсами.

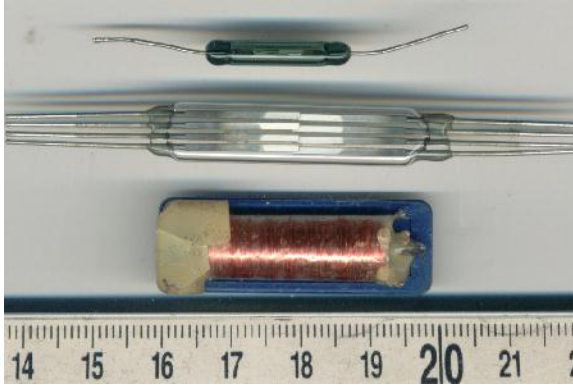


*Кроковий шукач*

Основне використання крокових перемикачів було на ранніх автоматичних телефонних станціях для маршрутизації телефонних дзвінків. Пізніше вони часто використовувалися в промислових системах управління.

**Герконові реле.** **Геркón** (скорочення від *герметичний контакт*) — електромеханічний пристрій, перемикач, рух електричних контактів якого керується

магнітним полем. Конструкція геркона — це герметична скляна колба, в якій знаходяться дві (або більше) металеві контактні пластини. Всередині колби контакти гнучкі, бо обидва виконані у формі тонкої пластини. Тонкі і гнучкі пластини геркона схожі зі стеблами очерету. З цієї причини в англійській технічній літературі герконовий перемикач дістав назву «*reed switch*», що дослівно означає «*очеретяний перемикач*».



*Однополюсний герконовий вимикач, чотириполюсний герконовий вимикач та однополюсне герконове реле. Шкала в сантиметрах*

**Герконове реле (Reed relay)**— це тип реле, яке використовує електромагніт для управління одним або кількома герконовими перемикачами. Контакти мають магнітний матеріал, і електромагніт діє безпосередньо на них, не вимагаючи якоря для їх переміщення. Герметичні у довгій, вузькій скляній трубці. Набір контактів усередині вакуумної або заповненої інертним газом скляної трубки захищає контакти від атмосферної корозії. Скляна колбочка може містити декілька герконових перемикачів або кілька герконових вимикачів можна вставити в одну колбу та одночасно спрацювати. Герконові вимикачі випускаються з 1930 -х років.

У порівнянні зі звичайним **реле з якорем**, герконове реле можуть перемикатися набагато швидше, оскільки рухомі частини невеликі і легкі, хоча відсакування перемикача все ще є. Крім того, герконові реле вимагають меншої робочої потужності і мають меншу контактну ємність. Їх поточна здатність до обробки обмежена, але, маючи відповідні контактні матеріали, вони підходять для «сухого» перемикачання. Вони механічно прості, що забезпечує надійність і тривалий термін служби.

Герконові реле мають відносно низькі номінальні значення струму та напруги комутації. Хоча це рідкість, пластини геркона з часом можуть намагнічуватися, що змушує їх "прилипати", навіть якщо струму немає. Зміна орієнтації магнітного поля або розмагнічування вимикача щодо магнітного поля соленоїда може вирішити цю проблему.

Геркони з контактами, змоченими ртуттю, мають більш тривалий термін служби та менший опір контакту, ніж будь-який інший вид реле.

**Реле захисту від перевантаження.** Електродвигуни потребують захисту від перенапруги, щоб запобігти пошкодженню від перевантаження двигуна, або для захисту від коротких замикань у з'єднувальних кабелях або



внутрішніх неполадок в обмотках двигуна. Пристрої зондування перевантаження є формою реле, що працює з нагріванням, коли котушка нагріває біметалічну смугу, або там, де розплавляється пайка, для роботи з допоміжними контактами. Ці допоміжні контакти знаходяться послідовно з котушкою контактора двигуна, тому вони вимикають двигун, коли він перегрівается.

Цей тепловий захист працює відносно повільно, дозволяючи двигуну набирати більші пускові струми перед спрацюванням реле захисту. Якщо реле перевантаження піддається тій самій температурі навколишнього середовища, що і двигун, надається корисна, хоча і груба компенсація температури навколишнього середовища двигуна.

Інша поширена система захисту від перевантаження використовує котушку електромагніту послідовно з ланцюгом двигуна, яка безпосередньо управляє контактами. Це схоже на реле управління, але для роботи контактів потрібен досить високий струм несправності. Щоб запобігти виникненню короточасних стрибків струму через перешкоди, рух якоря демпфірується за допомогою приладової точки. Виявлення теплового та магнітного перевантаження зазвичай використовуються разом у реле захисту двигуна.

Електронні реле захисту від перевантаження вимірюють струм двигуна і можуть оцінювати температуру обмотки двигуна за допомогою "теплової моделі" системи якоря двигуна, яку можна налаштувати для забезпечення більш точного захисту двигуна. Деякі реле захисту двигуна включають входи детектора температури для прямого вимірювання від термопари або датчика термометра опору, вбудованого в обмотку.

**Твердотільне реле** (*solid state relay — SSR*). **Твердотільне реле** — це електронний комутаційний пристрій, який включається або вимикається, коли на його клеми управління подається зовнішня напруга (змінного або постійного струму).



Твердотільне реле

Воно виконує ту ж функцію, що й електромеханічне реле, але не має рухомих частин, що забезпечує довший термін служби. Твердотільне реле складаються з датчика, який реагує на відповідний вхід (керуючий сигнал), твердотільного електронного комутаційного пристрою, який перемикає живлення на ланцюг навантаження, і механізму зчеплення, що дозволяє сигналу керування активувати цей перемикач без механічних частин. Реле може бути призначене для перемикання навантажень змінного або постійного струму.

Упаковані твердотільні реле використовують силові напівпровідникові пристрої, такі як тиристори та транзистори, для перемикання струму приблизно до ста ампер. Твердотільні реле мають високу швидкість перемикання в порівнянні з електромеханічними реле і не мають фізичних контактів, які зношуються. Користувачі твердотільних реле повинні враховувати нездатність твердотільного реле протистояти великому короткочасному перевантаженню, як електромеханічне реле, а також їх більший опір «включення».

### **Електромеханічні виконавчі механізми (Електромеханічні приводи)**

**Привід** (*actuator*) — це компонент машини, який відповідає за переміщення та управління механізмом або системою, наприклад, відкриваючи клапан. Простіше кажучи, це "рушій".

Приводу потрібен сигнал управління та джерело енергії. Керуючий сигнал має відносно низьку енергію і може бути електричною напругою або струмом, пневматичним або гідравлічним тиском рідини або навіть людською силою. Його основним джерелом енергії може бути електричний струм, гідравлічний тиск або пневматичний тиск. Коли він отримує сигнал управління, виконавчий механізм реагує, перетворюючи енергію джерела в механічний рух. В електричному, гідравлічному та пневматичному розумінні це форма автоматизації або автоматичного управління.

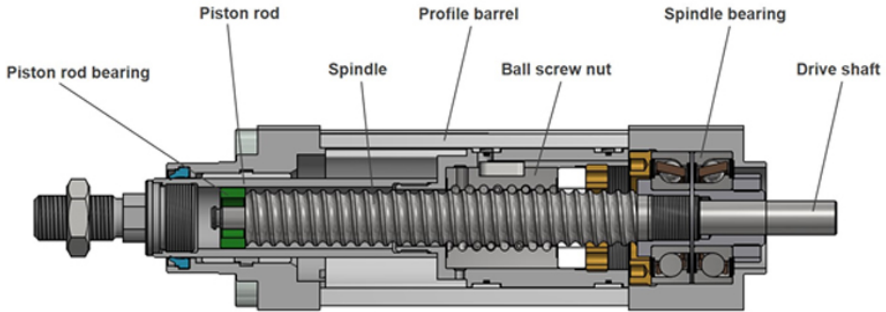
Привід — це механізм, за допомогою якого система управління діє на виконання операції або завдання. Система управління може бути простою (фіксована механічна або електронна система), на основі програмного забезпечення (наприклад, драйвер принтера, система управління роботом), людським або будь-яким іншим входом.

### **Електричні приводи**

З 1960 р. було розроблено кілька технологій приводів. Електроприводи можна класифікувати в такі групи:

**Електромеханічний привід.** Він перетворює силу обертання електродвигуна з поворотним двигуном у лінійний рух, щоб генерувати потрібний лінійний рух через механізм, або через ремінь (вісь стрічкового приводу з кроком або сервоприводом), або через гвинт (або кульку, або свинцевий гвинт, або планетарну механіку).

## Електромеханіка



*Схема перерізу електричного приводу*

Основними перевагами електромеханічних приводів є їх відносно хороший рівень точності щодо пневматики, їх можливий тривалий життєвий цикл та невеликі витрати на технічне обслуговування (може знадобитися змащення). Можна досягти відносно високої сили, порядку 100 кН.

Основним обмеженням цих приводів є досяжна швидкість, важливі розміри та вага, яких вони вимагають. Хоча основне застосування таких приводів в основному спостерігається у медичних пристроях та автоматизації заводів.

**Електрогідрравлічний привід.**



*Засувка з маховиком (L) та з лінійним пневматичним приводом (R)*

Інший підхід — електрогідрравлічний привід, де електродвигун залишається основним двигуном, але забезпечує крутний момент для роботи гідрравлічного

аккумулятора, який потім використовується для передачі зусилля приводу так само, як дизельний двигун/гідроліка зазвичай використовується у важкому обладнанні.

Електрична енергія використовується для приведення в дію такого обладнання, як багатооборотні клапани, або будівельного та земляного обладнання з електричним приводом.

При використанні для управління потоком рідини через клапан зазвичай над двигуном встановлюється гальмо, щоб запобігти тиску рідини, що змушує відкрити клапан. Якщо гальмо не встановлено, привід активується, щоб перекрити клапан, який знову повільно примусово відкривається. Це викликає коливання (відкриття, закриття, відкриття ...), і двигун та привід з часом пошкоджуються.

**Лінійний двигун.** Лінійні двигуни відрізняються від електромеханічних приводів, вони працюють за тим же принципом, що і електричні роторні двигуни, по суті, його можна розглядати як обрізаний і розгортаний двигун. Таким чином, замість обертального руху, вони створюють лінійну силу по своїй довжині. Оскільки лінійні двигуни викликають менші втрати на тертя, ніж інші пристрої, деякі лінійні двигуни можуть тривати більше ста мільйонів циклів.

Лінійні двигуни поділяються на 3 основні категорії: плоскі лінійні двигуни (класичні), лінійні двигуни U-каналу та трубчасті лінійні двигуни.

Технологія лінійного двигуна є найкращим рішенням у контексті низького навантаження (до 30 кг), оскільки забезпечує найвищий рівень швидкості, контролю та точності.

Насправді, це найбажаніша та універсальна технологія. Через обмеження пневматики, нинішня технологія електричних приводів є життєздатним рішенням для конкретних галузей промисловості, і вона успішно впроваджена в таких сегментах ринку, як годинникова, напівпровідникова та фармацевтична промисловість (аж 60% застосувань). Інтерес до цієї технології можна пояснити такими характеристиками:

- Висока точність (рівна або менша за 0,1 мм);
- Висока швидкість їзди на велосипеді (більше 100 циклів/хв);
- Можливе використання у чистих та суворо регульованих середовищах (не допускається витікання повітря, вологості або мастильних матеріалів);
- Необхідність програмованого руху в умовах складних операцій

Основними недоліками лінійних двигунів є:

- Вони дорогі відносно пневматики та інших електричних технологій.
- Їх непросто інтегрувати у стандартні механізми через їх важливі розміри та велику вагу.
- Вони мають низьку густину сили порівняно з пневматичними та електромеханічними приводами.

**Типове застосування електричних приводів.** Електричні приводи знаходяться в широкому спектрі промислових застосувань.

В автомобільній промисловості для транспортних засобів без водія, дозування та вибір методів з'єднання - склеювання, зварювання та клепаання.

У харчовій промисловості та виробництві напоїв, для виробництва ПЕТ - пляшок, систем наповнення та маркування та роботизованих систем, таких як доільні роботи.

Вони використовуються при обробці матеріалів для таких операцій, як сервопреси і затискання, і широко використовуються в секторі упаковки.

Їх переваги в точності, гнучкості та низьких експлуатаційних витратах призводять до використання в робототехніці, електроніці та електронному монтажі, верстатах та багатьох інших галузях промисловості.

### Лінійні електромеханічні приводи

**Лінійний привід** (*linear actuator*)— це привід, який створює рух по прямій лінії, на відміну від обертового руху звичайного електродвигуна. Лінійні приводи використовуються в верстатах та промислових машинах, у комп'ютерних периферійних пристроях, таких як дисководи та принтери, у клапанах та заслінках, а також у багатьох інших місцях, де потрібен лінійний рух. Гідравлічні або пневматичні циліндри по суті створюють лінійний рух. Для генерування лінійного руху від обертового двигуна (здебільшого електродвигуна) використовується багато інших механізмів.

Механічні лінійні приводи зазвичай працюють шляхом перетворення обертального руху в лінійний. Перетворення зазвичай здійснюється за допомогою кількох простих типів механізмів:

- **Гвинт:** рушійний гвинт, гвинтовий домкрат, кульовий гвинтовий та роликовий гвинтові приводи працюють за принципом простої машини, відомої як гвинт. Обертаючи гайку приводу, вал гвинта рухається по лінії.
- **Колесо та вісь:** Підйомник, лебідка, стійка, шестерня, ланцюговий привід, ремінна передача, жорсткий ланцюг та приводи з жорстким ременем працюють за принципом колеса та осі. Обертове колесо переміщує трос, стійку, ланцюг або ремінь для створення лінійного руху.
- **Кулачок:** Приводи кулачка працюють за принципом, подібним до клинового, але забезпечують відносно обмежений хід. У міру обертання колесоподібного кулачка його ексцентрична форма забезпечує тягу біля основи вала.

Деякі механічні лінійні приводи тільки тягнуть, такі як підйомники, ланцюговий привід і ремінь. Інші лише натискають (наприклад, кулачковий привід). Пневматичні та гідравлічні циліндри або рушійні гвинти можуть бути спроектовані для створення сили в обох напрямках.

Механічні приводи зазвичай перетворюють обертальний рух кнопки управління або рукоятки в лінійне зміщення за допомогою гвинтів та/або шестерень, до яких кріпиться кнопка або ручка. Домкрат або домкрат автомобіля — знайомий механічний привід. Інше сімейство приводів базується на сегментованому шпинделі. Поворот ручки домкрата механічно перетворюється на лінійний рух головки домкрата. Механічні приводи також часто використовуються в галузі лазерів та оптики для управління положенням лінійних ступенів, поворотних каскадів, кріплень дзеркал, гоніометрів та інших приладів позиціонування. Для точного та повторюваного позиціонування на ручках управління можна використовувати індексні позначки. Деякі приводи включають кодер та цифрове зчитування положення.

Вони подібні до ручок регулювання, що використовуються на мікрометрах, за винятком того, що їх призначення — це регулювання положення, а не вимірювання положення.

**Електромеханічні приводи** подібні до механічних, за винятком того, що кнопку управління або ручку замінюють на електродвигун. Обертальний рух двигуна перетворюється на лінійне зміщення. Електромеханічні приводи можуть також використовуватися для живлення двигуна, який перетворює електричну енергію в механічний момент. Існує багато конструкцій сучасних лінійних приводів, і кожна компанія, яка їх виробляє, має власний метод. Нижче наведено узагальнений опис дуже простого електромеханічного лінійного приводу.

**Спрощений дизайн.** Як правило, електродвигун механічно з'єднаний для обертання **рушійного гвинта** (*lead screw*). Рушійний гвинт має безперервну гвинтову різьбу, оброблену по колу, що проходить по довжині (аналогічно різьбі на болті). На рушійний гвинт накинута провідна гайка або кульову гайку з відповідною гвинтовою різьбою. Гайка не може обертатися за допомогою рушійного гвинта (зазвичай гайка змикається з необертовою частиною корпусу приводу). При обертанні рушійного гвинта гайка буде просуватися вздовж різьби. Напрямок руху гайки залежить від напрямку обертання провідного гвинта. З'єднуючи робочу частину лінійного приводу з гайкою, рух можна перетворити на корисне лінійне зміщення. Більшість сучасних приводів створені для високої швидкості, значної сили або компромісу між ними. При розгляді приводу для конкретного застосування найважливішими параметрами, як правило, є хід, швидкість, сила, точність та термін служби. Більшість різновидів лінійних приводів встановлюються на амортизаторах або дросельних клапанах.



*Мініатюрний електромеханічний лінійний привод, де провідна гайка є частиною двигуна. Провідний гвинт не обертається, тому, коли провідна гайка обертається двигуном, провідний гвинт витягується або втягується.*

Існує багато типів двигунів, які можна використовувати в системі лінійних приводів. До них відносяться щітковий двигун постійного струму, безщітковий двигун постійного струму, крокові двигуни, а в деяких випадках навіть асинхронні двигуни. Все залежить від вимог застосування та навантажень, які призначені для переміщення.



*Типовий компактний циліндричний лінійний електричний привід*

Наприклад, лінійний привід, що використовує вбудований асинхронний двигун змінного струму, що приводить у рух рушійний гвинт, може бути використаний для управління великим клапаном на нафтопереробному заводі. У цьому випадку точність і висока роздільна здатність руху не потрібні, але потрібні значна сила та швидкість. Для електромеханічних лінійних приводів, що використовуються в робототехніці лабораторного приладобудування, оптичному та лазерному обладнанні або столах X-Y, для точної роздільної здатності в мікронному діапазоні та високої точності може знадобитися використання дробового лінійного приводу з кроковим двигуном з дрібним кроком. Існує багато варіацій в системі електромеханічних лінійних приводів. Дуже важливо розуміти вимоги до проектування та обмеження застосування, щоб знати, який із них був би найкращим.

**Стандартна чи компактна конструкція.** Лінійний привід, що використовує стандартні двигуни, зазвичай має двигун як окремий циліндр, прикріплений збоку від приводу, паралельно приводу або перпендикулярно до приводу. Двигун може бути прикріплений до кінця приводу. Приводний двигун має типову конструкцію з суцільним приводним валом, пристосованим до приводної гайки або приводного гвинта приводу.

У компактних лінійних приводах використовуються спеціально розроблені двигуни, які намагаються пристосувати двигун та привід до якомога меншої форми.

Внутрішній діаметр вала двигуна можна збільшити, щоб приводний вал був порожнистим. Тому приводний гвинт і гайка можуть займати центр двигуна без необхідності додаткового зачеплення між двигуном і приводним гвинтом.

Подібним чином двигун може бути виготовлений і з дуже малим зовнішнім діаметром, але замість цього грані полюсів розтягуються вздовж, щоб двигун все ще міг мати дуже високий крутний момент при розміщенні в просторі з невеликим діаметром.

**Принцип роботи.** У більшості конструкцій лінійних приводів основним принципом роботи є принцип похилої площини. Різьба провідного гвинта діє як безперервний пандус, що дозволяє застосовувати невелику силу обертання на велику відстань для здійснення переміщення великого вантажу на невелику відстань. Джерело живлення від двигуна постійного або змінного струму. Типовий двигун - це 12 В постійного струму, але є й інші напруги. Приводи мають вимикач для зміни полярності двигуна, що змушує привід змінювати свій рух.

Швидкість і сила приводу залежать від його коробки передач. Значення сили залежить від швидкості приводу. Низькі швидкості забезпечують більшу силу, оскільки швидкість двигуна та сила постійні.

Однією з основних відмінностей між приводами є їх хід, який визначається довжиною гвинта та вала. Швидкість залежить від передач, які з'єднують двигун з гвинтом.

Механізм зупинки ходу приводу — це кінцевий або мікроперемикач, який можна побачити на зображенні нижче. Мікроперемикачі розташовані у верхній і нижній частині вала і спрацьовують при русі гвинта вгору і вниз.

**Варіанти конструкції.** Було створено багато варіантів базової конструкції. Більшість зосереджується на забезпеченні загальних удосконалень, таких як більш висока механічна ефективність, швидкість або вантажопідйомність. Існує також великий інженерний рух у напрямку мініатюризації приводів.

Більшість електромеханічних конструкцій містять рушійний гвинт і гайку. Деякі використовують кульовий гвинт і кульову гайку. У будь-якому випадку гвинт може бути підключений безпосередньо до двигуна або ручки управління безпосередньо або через ряд передач. Передачі, як правило, використовуються для того, щоб зменшити частоту обертання двигуна, що обертається на більш високих обертах, для того, щоб забезпечити крутний момент, необхідний для обертання гвинта під великим навантаженням, ніж двигун міг би працювати безпосередньо. Ефективно це обмін швидкості приводу на користь збільшення тяги приводу. У деяких пристроях використання черв'ячних передач є звичайним, оскільки це дозволяє зменшити вбудований розмір, все ще дозволяючи велику довжину ходу.

Лінійний привід з рухомою гайкою (*traveling-nut*) має двигун, який залишається прикріпленим до одного кінця провідного гвинта (можливо, опосередковано через коробку передач), двигун обертає провідний гвинт, а провідна гайка утримується від обертання, тому вона рухається вгору та вниз по гвинту, що обертається.

Лінійний привід з рухомим гвинтом (*traveling-screw*) має провідний гвинт, який повністю проходить через двигун. У лінійному приводі з ходовим гвинтом двигун "повзе" вгору і вниз по гвинту, який утримується від обертання. Єдині обертотві частини знаходяться всередині двигуна і можуть бути непомітні зовні.



**Статична вантажопідйомність.** Лінійні гвинтові приводи можуть мати статичну навантажувальну здатність, що означає, що при зупинці двигуна привід практично фіксується на місці і може витримувати навантаження, яке або тягне, або натискає на привід. Ця статична вантажопідйомність збільшує мобільність та швидкість.

Гальмівна сила виконавчого механізму змінюється в залежності від кутового кроку різьби гвинтів та конкретної конструкції різьби. Нитки Асме мають дуже високу статичну вантажопідйомність, тоді як кульові гвинти мають надзвичайно низьку вантажопідйомність і можуть бути майже вільно плаваючими.

Як правило, неможливо змінювати статичну навантажувальну здатність гвинтових приводів без додаткової технології. Конструкція кроку різьби гвинта та відповідної гайки визначає певну вантажопідйомність, яку неможливо динамічно регулювати.

У деяких випадках до лінійних гвинтових приводів можна додати мастило високої в'язкості для збільшення статичного навантаження. Деякі виробники використовують це для зміни навантаження для конкретних потреб.

Статична вантажопідйомність може бути додана до лінійного гвинтового приводу за допомогою електромагнітної гальмівної системи, яка застосовує тертя до гайки, що обертається. Наприклад, пружина може бути використана для накладання гальмівних колодок на приводну гайку, утримуючи її в такому положенні, коли вимкнено живлення. Коли привід необхідно перемістити, електромагніт протидіє пружині і послаблює гальмівну силу на приводній гайці.

Подібним чином електромагнітний храповий механізм може бути використаний з лінійним гвинтовим приводом, так що система приводу, що піднімає вантаж, зафіксується в місці, коли вимкнено живлення приводу. Для опускання приводу використовується електромагніт для протидії силі пружини та розблокування храповика.

**Динамічна вантажопідйомність.** Динамічну вантажопідйомність зазвичай називають величиною сили, яку здатний забезпечити лінійний привід під час роботи. Ця сила буде змінюватися в залежності від типу гвинта (величина тертя, що обмежує рух) та двигуна, що приводить рух у рух. Динамічне навантаження - це показник, за яким класифікується більшість приводів, і це хороший показник того, для яких застосувань він найкраще підходить. [5]

**Регулювання швидкості.** У більшості випадків при використанні електромеханічного приводу бажано мати певний тип регулювання швидкості. Такі регулятори змінюють напругу, що подається на двигун, що, у свою чергу, змінює швидкість обертання провідного гвинта. Регулювання передавального числа — це ще один спосіб регулювання швидкості. Деякі приводи доступні з декількома різними варіантами передач.

**Робочий цикл.** Робочий цикл двигуна відноситься до часу, протягом якого привід може працювати, перш ніж йому потрібно охолонути. Дотримання цього настанови під час роботи приводу є ключем до його довговічності та продуктивності. У разі перевищення номінального робочого циклу існує ризик перегріву, втрати потужності та згоряння двигуна.

**Лінійні двигуни.** Лінійний двигун функціонально такий самий, як обертовий електродвигун з компонентами кругового магнітного поля ротора і статора, розташованими по прямій. Там, де роторний двигун обертається і знову використовує ті самі магнітні полюси, структури магнітного поля лінійного двигуна фізично повторюються по довжині приводу.

Оскільки двигун рухається лінійно, для перетворення обертального руху в лінійний не потрібен провідний гвинт. Хоча можлива велика ємність, обмеження щодо матеріалів та/або двигунів на більшості конструкцій перевищуються порівняно швидко через залежність виключно від сил магнітного притягання та відштовхування. Більшість лінійних двигунів мають низьку навантажувальну здатність порівняно з іншими типами лінійних приводів. Лінійні двигуни мають перевагу у відкритому чи брудному середовищі, оскільки дві половини не потребують контакту одна з одною, і тому котушки електромагнітних приводів можуть бути гідроізолювані та герметизовані від вологи та корозії, що забезпечує дуже тривалий термін служби. Лінійні двигуни широко використовуються у високопродуктивних системах позиціонування для застосувань, які вимагають різних комбінацій високої швидкості, високої точності та високої сили.

### Привід клапана

Одна з найпоширеніших функцій автоматичних та автоматизованих технологічних систем — це керування різноманітними клапанами і засувками на трубопроводах.

Привід клапана — це механізм відкриття і закриття клапана. Клапани, що управляються вручну, вимагають, щоб хтось із присутніх відрегулював їх за допомогою прямого або зубчастого механізму, прикріпленого до штока клапана. Електроприводи, що працюють з тиском газу, гідравлічним тиском або електрикою, дозволяють дистанційно регулювати клапан або дозволяють швидко роботу великих клапанів. Приводи клапанів з електроприводом можуть бути кінцевими елементами автоматичної петлі управління, яка автоматично регулює деякий потік, рівень або інший процес. Приводи можуть бути відкритими та закритими тільки клапан або допускати проміжне розташування; деякі приводи клапанів включають вимикачі або інші способи дистанційного вказівки положення клапана.

Приводи, що використовуються для автоматизації промислових клапанів, можна знайти у всіх видах технологічних установок. Вони використовуються на очисних спорудах, електростанціях, нафтопереробних заводах, гірничодобувних та ядерних процесах, харчових заводах та трубопроводах. Приводи клапанів відіграють важливу роль в автоматизації управління процесами. Автоматизована арматура відрізняється як конструкцією, так і розмірами. Діаметри клапанів коливаються від однієї десятої дюйма до кількох футів.

**Рух приводу.** Лінійний привід відкриває і закриває клапани, якими можна управляти за допомогою лінійної сили, типу, який іноді називають клапаном "висхідний шток". До таких типів клапанів належать шарові клапани, кульові крани зі спливаючою штокою, регулюючі клапани та засувки. Два основних типи лінійних приводів - це мембрана та поршень.

Діафрагмові приводи зроблені з круглого шматка гуми і стиснуті по краях між двома сторонами циліндра або камери, що дозволяє тиску повітря проникати в будь-яку сторону, натискаючи шматок гуми в той чи інший бік. До центру діафрагми приєднаний стрижень, щоб він рухався під час тиску. Потім шток приєднується до штока клапана, що дозволяє клапану відчувати лінійний рух, відкриваючи або закриваючи його. Мембранний привід корисний, якщо тиск подачі помірний, а необхідний хід і тяга клапана - низькі.

Поршневі приводи використовують поршень, який рухається по довжині циліндра. Поршневий шток передає силу на поршень до штока клапана. Поршневі приводи забезпечують більший тиск, більший діапазон ходу та більші зусилля тяги, ніж мембранні приводи.

Пружина використовується для забезпечення певної поведінки у разі втрати живлення. Це важливо для інцидентів, пов'язаних з безпекою, і іноді є визначальним фактором у специфікаціях. Прикладом втрати потужності є вимикання повітряного компресора (основного джерела стисненого повітря, що забезпечує подачу рідини для приводу). Якщо всередині приводу є пружина, вона примусово відкриє або закrije клапан і утримуватиме його в такому положенні до відновлення живлення. Для опису його поведінки привід може бути вказаний як "невдале відкриття" або "несправне закриття". У разі електричного приводу втрата потужності утримає клапан нерухомим, якщо немає резервного джерела живлення.

Типовим представником клапанів, що підлягають автоматизації, є вентиль регуляторного типу. Подібно до того, як пробка у ванні втискається у злив, пробка натискається на гніздо пробки рухом. Тиск середовища діє на пробку, тоді як вузол тяги повинен забезпечувати таку ж силу тяги, щоб мати можливість утримувати та переміщати пробку проти цього тиску.

### П'єзоелектричні пристрої

*П'єзоелектричні пристрої* — це електромеханічні пристрої, дія яких ґрунтується на п'єзоелектричному ефекті.

**П'єзоелектричний ефект.** *П'єзоелектричність* (*Piezoelectricity*) — це явище накопичення електричного заряду у деяких твердих матеріалах під дією механічної сили. Такими матеріалами є кристали, спеціальні види кераміки та біологічна речовина, наприклад кістка, ДНК та різні білки. Слово *п'єзоелектрика* означає електрику, що виникає внаслідок механічних зусиль та прихованої теплоти. Походить від грецького слова *πιέζειν*, що означає стискати або натискати, та *ήλεκτρον*, що означає бурштин, стародавнє джерело електричного заряду.

П'єзоелектричний ефект є результатом лінійної електромеханічної взаємодії між механічним та електричним станами у кристалічних матеріалах без інверсійної симетрії. П'єзоелектричний ефект є оборотним процесом: матеріали, у яких спостерігається *прямий п'єзоелектричний ефект*, також демонструють *зворотний п'єзоелектричний ефект*: утворення внутрішньої механічної деформації, що виникає внаслідок прикладеного електричного поля. Наприклад, кристали титанату цирконату свинцю генеруватимуть помітну п'єзоелектричність, коли їх статична структура деформується приблизно на 0,1% від початкового розміру. І навпаки, ці самі кристали змінюватимуть приблизно 0,1% свого статичного розміру при

застосуванні зовнішнього електричного поля. Зворотний п'єзоелектричний ефект використовується для виробництва ультразвукових хвиль.

Французькі фізики Жак та П'єр Кюрі відкрили п'єзоелектрику у 1880 р. П'єзоелектричний ефект був використаний у багатьох корисних застосуваннях, включаючи виробництво та виявлення звуку, п'єзоелектричний струменевий друк, вироблення високовольтної електроенергії, як генератор годинника в електронних пристроях, у мікровагах, для керування ультразвуковою насадкою та ультратонкому фокусуванні оптичних вузлів. П'єзоелектричний ефект є основою для сканування зондових мікроскопів, які розрізняють зображення в масштабі атомів. Він використовується в деяких гітарах з електронним посиленням і як тригер у більшості сучасних електронних барабанів. П'єзоелектричний ефект також знаходить своє повсякденне застосування, наприклад, генерує іскри для запалювання газових варильних та нагрівальних приладів, факелів та прикурювачів.

**П'єзоелектричні приводи.** Оскільки дуже високі електричні поля відповідають лише незначним змінам ширини кристала, цю ширину можна змінити з точністю більше ніж на мкм, що робить п'єзокристали найважливішим інструментом для позиціонування об'єктів з надзвичайною точністю-таким чином, їх використання в виконавчих механізмах. Багатошарова кераміка, використовуючи шари тонше 100 мкм, дозволяє досягати високих електричних полів з напругою нижче 150 В. Ця кераміка використовується в двох видах приводів: прямих п'єзоприводах та п'єзоелектричних приводах з посиленням. У той час як прямий хід приводу зазвичай нижчий за 100 мкм, посилені п'єзоприводи можуть досягати міліметрових ходів.

Найпоширеніші застосування п'єзоелектричних приводів.

- Гучномовці: Напруга перетворюється на механічний рух металевої діафрагми.
- Ультразвукове очищення зазвичай використовує п'єзоелектричні елементи для створення інтенсивних звукових хвиль у рідині.
- П'єзоелектричні двигуни: п'єзоелектричні елементи прикладають спрямовану силу до осі, змушуючи її обертатися. Через надзвичайно малі відстані п'єзомотор розглядається як високоточна заміна крокового двигуна.
- П'єзоелектричні елементи можна використовувати для лазерного вирівнювання дзеркал, де їхня здатність переміщати велику масу (кріплення дзеркала) на мікроскопічні відстані використовується для електронного вирівнювання деяких лазерних дзеркал. Точно контролюючи відстань між дзеркалами, лазерна електроніка може точно підтримувати оптичні умови всередині лазерної порожнини для оптимізації виходу променя.
- Схоже застосування — акустооптичний модулятор, пристрій, який розсіює світло від звукових хвиль у кристалі, породженому п'єзоелектричними елементами. Це корисно для точної настройки частоти лазера.
- Мікроскопи з атомною силою та скануючі тунельні мікроскопи використовують зворотну п'єзоелектрику, щоб утримувати чутливу голку близько до зразка.

- Струменеві принтери: на багатьох струменевих принтерах п'єзоелектричні кристали використовуються для приводу викидання чорнила з струменевої друкуючої голівки до паперу.
- Дизельні двигуни: У високопродуктивних дизельних двигунах Common Rail використовуються п'єзоелектричні паливні форсунки, вперше розроблені компанією Robert Bosch GmbH, замість більш поширених електромагнітних клапанів.
  - Активний контроль вібрації за допомогою приводів з посиленням.
  - Рентгенівські ролюети.
  - Етапи ХУ для мікросканування, що використовуються в інфрачервоних камерах.
    - Переміщення пацієнта всередині активних сканерів КТ та МРТ, де сильне випромінювання або магнетизм виключають електродвигуни. [54]
    - Кришталеві навушники іноді використовуються в старих або малопотужних радіоприймачах.
    - Високоінтенсивне сфокусоване ультразвуку для локалізованого нагрівання або створення локалізованої кавітації може бути досягнуто, наприклад, в тілі пацієнта або в промисловому хімічному процесі.
      - Оновлений дисплей Брайля. Маленький кристал розширюється шляхом подачі струму, який рухає важіль, щоб підняти окремі осередки Брайля.
      - П'єзоелектричний привід. Монокристал або ряд кристалів розширюється шляхом подачі напруги для переміщення та управління механізмом чи системою.
      - П'єзоелектричні приводи використовуються для точного позиціонування сервоприводів на жорстких дисках.

**П'єзоелектричний двигун.** Типи п'єзоелектричних двигунів включають:

Ультразвуковий двигун, що використовується для автофокусування в рефлекторних камерах

Двигуни Inchworm для лінійного руху

Прямокутні чотири квадрантні двигуни з високою щільністю потужності (2,5 Вт/см<sup>3</sup>) і швидкістю від 10 нм/с до 800 мм/с.

Кроковий п'єзомотор з ефектом прилипання-ковзання.

Крім крокового двигуна, всі ці двигуни працюють за одним принципом. Під впливом подвійних ортогональних режимів вібрації з різницею фаз 90 ° точка контакту між двома поверхнями вібує по еліптичній траєкторії, створюючи силу тертя між поверхнями. Зазвичай одна поверхня фіксується, змушуючи іншу рухатися. У більшості п'єзоелектричних двигунів п'єзоелектричний кристал збуджується сигналом синусоїди на резонансній частоті двигуна. Використовуючи резонансний ефект, можна використовувати значно меншу напругу для отримання високої амплітуди вібрації.

Мотор з ковзанням працює з інерцією маси та тертям затискача. Такі двигуни можуть бути дуже маленькими. Деякі з них використовуються для переміщення датчика камери, що дозволяє функцію захисту від тряски.

**П'єзоелектричний двигун** — це електромеханічний пристрій, що ґрунтується на зміні форми п'єзоелектричного матеріалу під час прикладання електричного

поля внаслідок зворотного п'єзоелектричного ефекту. Електричний контур створює акустичні або ультразвукові коливання в п'єзоелектричному матеріалі, найчастіше це титанат цирконату, а іноді ніобат літію або інші монокристалічні матеріали, які можуть виробляти лінійні або обертальні рухи залежно від їх механізму. Приклади типів п'єзоелектричних двигунів включають двигуни з доймовими черв'яками, крокові та ковзні двигуни, а також ультразвукові двигуни, які можна додатково класифікувати на двигуни стоячої та мандрівної хвилі. П'єзоелектричні двигуни зазвичай використовують циклічний кроковий рух, що дозволяє коливанням кристалів викликати довільно великий рух, на відміну від більшості інших п'єзоелектричних приводів, де діапазон руху обмежений статичною деформацією, яку може викликати п'єзоелектричний елемент.

Вирощування та утворення п'єзоелектричних кристалів є добре розвинутою галуззю, що дає дуже рівномірні та послідовні деформації матеріалів для даної прикладеної різниці потенціалів. Це, у поєднанні з дрібною шкалою спотворень, дає п'єзоелектричному двигуну можливість робити дуже точні кроки. Виробники заявляють про точність нанометрової шкали. Висока швидкість відгуку та швидка деформація кристалів також дають змогу виконувати дії на дуже високих частотах — вище 5 МГц. Це забезпечує максимальну лінійну швидкість приблизно 800 мм на секунду або майже 2,9 км/год.

Унікальною здатністю п'єзоелектричних двигунів є їх здатність працювати в сильних магнітних полях. Це поширює їх корисність на пристрої, які не можуть використовувати традиційні електромагнітні двигуни, наприклад пристрої всередині ядерно-магнітно-резонансних антен. Максимальна робоча температура обмежена температурою Кюрі використовуваної п'єзоелектричної кераміки і може перевищувати +250С.

Основними перевагами п'єзоелектричних двигунів є висока точність позиціонування, стабільність положення при відсутності живлення, а також можливість виготовлення при дуже малих розмірах або у незвичайній формі, такі як тонкі кільця. Поширені застосування п'єзоелектричних двигунів включають системи фокусування в об'єктивах камер, а також точне управління рухом у спеціалізованих застосуваннях, таких як мікроскопія.

**Ультразвуковий двигун.** *Ультразвуковий двигун* — це тип п'єзоелектричного двигуна, що працює від ультразвукової вібрації компонента, статора, розміщеного проти іншого компонента, ротора або повзунка залежно від схеми роботи (обертання або лінійний переклад). Ультразвукові двигуни відрізняються від інших п'єзоелектричних двигунів кількома способами, хоча обидва зазвичай використовують певну форму п'єзоелектричних матеріалів, найчастіше титанат цирконату свинцю, а іноді ніобат літію або інші монокристалічні матеріали. Найбільш очевидна відмінність — використання резонансу для посилення вібрації статора, що контактує з ротором, у ультразвукових двигунах. Ультразвукові двигуни також пропонують довільно великі відстані обертання або ковзання, тоді як п'єзоелектричні приводи обмежені статичною деформацією, яка може бути викликана в п'єзоелектричному елементі.



*Ультразвуковий двигун*

Одним із поширених застосувань ультразвукових двигунів є об'єктиви камер, де вони використовуються для переміщення елементів об'єктива як частини системи автофокусування. У цьому додатку ультразвукові двигуни замінюють більш шумні і часто повільніші мікромотори.

### Механізм

Сухе тертя часто використовується в контакті, а ультразвукова вібрація, що викликається в статорі, використовується як для передачі руху ротору, так і для модуляції сил тертя, присутніх на межі поділу. Модуляція тертям забезпечує об'ємний рух ротора (тобто протягом більш ніж одного циклу вібрації); без цієї модуляції ультразвукові двигуни не працюватимуть.

Загалом доступні два різних способи управління тертям уздовж контактної поверхні статора та ротора, вібрації бігової хвилі та вібрації стоячої хвилі. Деякі з найбільш ранніх версій практичних двигунів 1970-х років, зроблені Сашідою [1], наприклад, використовували вібрацію стоячої хвилі в поєднанні з плавниками, розташованими під кутом до поверхні контакту, для формування двигуна, хоча і такого, що обертався за один напрямок. Пізніші проекти Сашіди та дослідників з Matsushita, ALPS та Canon використовували вібрацію мандрівних хвиль для отримання двоспрямованого руху, і виявили, що така схема пропонує кращу ефективність та менший знос контактної поверхні. Ультразвуковий двигун "гібридного перетворювача" з винятково високим крутним моментом використовує п'єзoeлектричні елементи з окружним і осьовим полюсом для об'єднання осьової та

крутильної вібрації уздовж контактної поверхні, що представляє собою техніку руху, що знаходиться десь між методами руху стоячої та хвилі.

Ключове зауваження при вивченні ультразвукових двигунів полягає в тому, що пікова вібрація, яка може бути викликана в конструкціях, виникає при відносно постійній швидкості вібрації незалежно від частоти. Швидкість вібрації - це просто похідна від часу зсуву вібрації в структурі і не (безпосередньо) пов'язана зі швидкістю поширення хвилі всередині структури. Багато інженерних матеріалів, придатних для вібрації, забезпечують максимальну швидкість вібрації близько 1 м/с. На низьких частотах - 50 Гц, скажімо - швидкість вібрації 1 м/с в НЧ -динаміку дасть зміщення приблизно на 10 мм, що видно. Зі збільшенням частоти зміщення зменшується, а прискорення зростає. Оскільки вібрація стає нечутною на частоті 20 кГц або близько того, зміщення вібрації складають десятки мікрометрів, і були побудовані двигуни [2], які працюють з використанням поверхневої акустичної хвилі 50 МГц (SAW), вібрації якої складають лише кілька нанометрів. Такі пристрої вимагають догляду за будівництвом, щоб досягти необхідної точності для використання цих рухів у статорі.

Загалом, існує два типи двигунів: контактні та безконтактні, останній з яких зустрічається рідко і потребує робочої рідини для передачі ультразвукових коливань статора до ротора. Більшість версій використовують повітря, наприклад деякі з найдавніших версій Ху Цзюньхуя. [3] [4] Дослідження в цій галузі тривають, особливо в акустичній левітації ближнього поля для такого роду застосування. [5] (Це відрізняється від акустичної левітації далекого поля, яка підвішує об'єкт на відстані від половини до кількох довжин хвиль від вібруючого об'єкта.)

**Двигун «дюймовий черв'як».** Двигун «дюймовий черв'як» (*inchworm motor*) — це пристрій, який використовує п'єзоелектричні приводи для переміщення валу з нанометровою точністю.

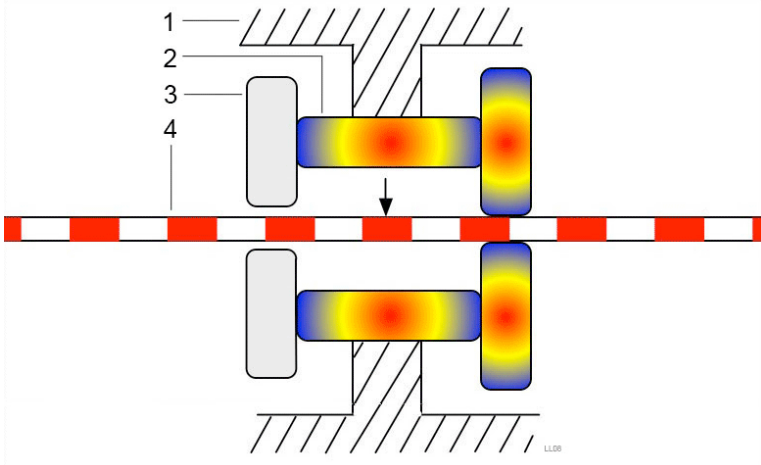
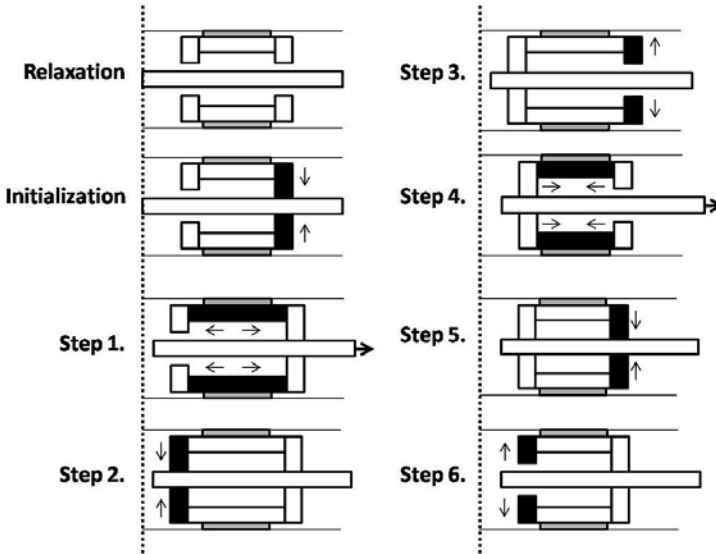


Рис. 1. Діаграма двигуна п'єзо-черв'яка в дії.



У своїй найпростішій формі двигун дюймового черв'яка використовує три п'єзоприводи (2 і 3, див. Малюнок 1.), встановлені всередині трубки (1) і послідовно електрифіковані для захоплення вала (4), який потім переміщається в лінійному напрямку. Рух валу відбувається за рахунок подовження бічного п'єзоелемента (2), що натискає на два зчеплення п'єзо (3).

### Six Step Actuation Processes of the Piezo Inchworm Motor



*Рис. 2. Процеси шестиступеневого спрацьовування п'єзоелектричного лінійного черв'ячного двигуна.*

**Принцип роботи п'єзоелектричного двигуна «дюймовий черв'як».** Процес спрацьовування двигуна дюймового черв'яка - це шестиступеневий циклічний процес після початкової фази розслаблення та ініціалізації. Спочатку всі три п'єзорозслаблені та розширені. Щоб ініціювати двигун дюймового черв'яка, спочатку електризується п'єзо зчеплення, найближче до напрямку потрібного руху (яке потім стає п'єзо зчепленням вперед), а потім цикл із шести кроків починається наступним чином (див. Малюнок 2.):

- Крок 1. Розширення бічного п'єзопривода.
- Крок 2. Розширення заднього п'єзопривода.
- Крок 3. Розслаблення переднього п'єзопривода.
- Крок 4. Розслаблення бічного п'єзопривода.
- Крок 5. Розширення п'єзопружини зчеплення.
- Крок 6. Розслаблення п'єзо заднього зчеплення.

Електризація п'єзоприводів досягається шляхом прикладання високої напруги зміщення до виконавчих механізмів за кроком відповідно до вищеописаного процесу "Шість кроків".

Для переміщення на великі відстані послідовність із шести кроків повторюється багато разів поспіль. Після того, як двигун перемістився достатньо близько до бажаного кінцевого положення, двигун можна переключити в додатковий режим точного позиціонування. У цьому режимі муфти отримують постійну напругу (одна висока, а інша низька), а потім бічна п'єзонапруга регулюється до проміжного значення під постійним контролем зворотного зв'язку для отримання бажаного кінцевого положення.

Поведінка цього п'єзоелектричного двигуна без живлення є одним із двох варіантів: нормально заблокований або нормально вільний. Зазвичай вільний тип дозволяє вільно рухатися, коли він відключений, але все ще може бути заблокований шляхом подачі напруги.

### Мехатроніка

*Мехатроніка*, або мехатронна інженерія, — це міждисциплінарна галузь інженерії, яка зосереджена на інтеграції механічних, електронних та електротехнічних систем, а також включає в себе поєднання робототехніки, електроніки, інформатики, телекомунікацій, систем, управління та інженерії продуктів.

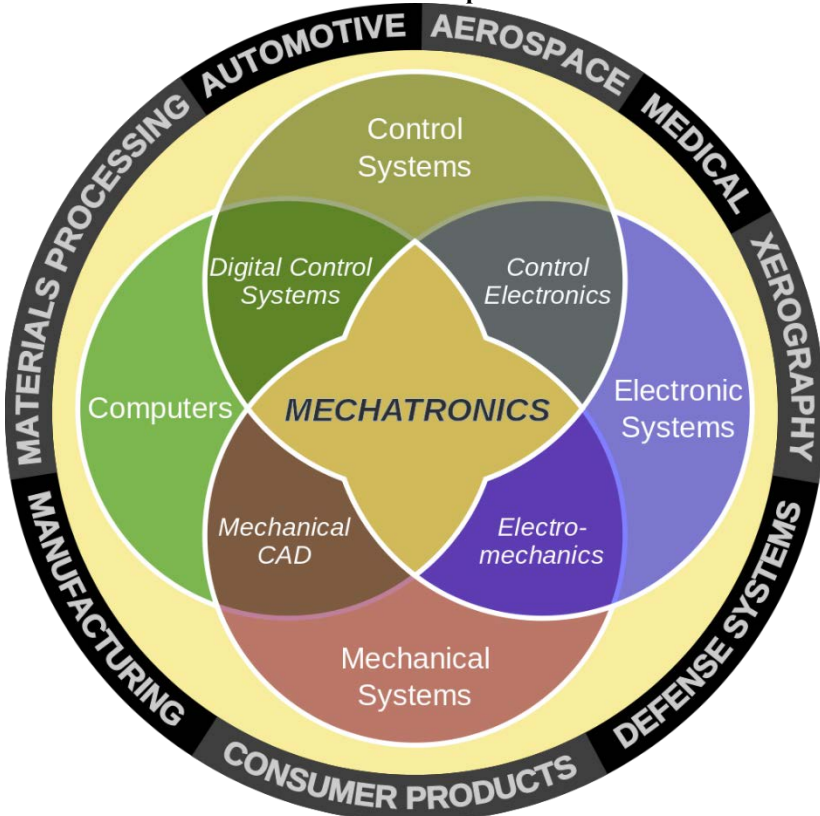


*Мехатронічна система*

У міру прогресу технологій з часом різні галузі техніки досягли успіху як у адаптації, так і в розмноженні. Намір мехатроніки полягає у створенні дизайнерського рішення, яке об'єднує кожне з цих різних галузей. Спочатку галузь мехатроніки мала на меті бути не що інше, як поєднання механіки та електроніки, звідси назва — портманто (з'єднання двох слів) механіки та електроніки; проте, оскільки складність технічних систем продовжувала розвиватися, визначення було розширено, включивши більше технічних сфер.

Французький стандарт NF E 01-010 дає таке визначення мехатроніки: "підхід, спрямований на синергетичну інтеграцію механіки, електроніки, теорії управління та інформатики в рамках проектування та виробництва продукції з метою покращення та/або оптимізації її функціональності".

### Опис мехатроніки



*Діаграма Ейлера описує дисципліни, з яких складається мехатроніка*

Мехатроніка об'єднує принципи механіки, електроніки та обчислень, щоб створити простішу, більш економічну та надійну систему. Промисловий робот є

яскравим прикладом системи мехатроніки; він включає аспекти електроніки, механіки та обчислювальної техніки для виконання повсякденної роботи.

Інженерна кібернетика займається питанням техніки управління мехатронними системами. Вона використовується для управління або регулювання такої системи. Завдяки співпраці мехатронні модулі виконують виробничі цілі та успадковують гнучкі та гнучкі виробничі властивості у виробничій схемі. Сучасне виробниче обладнання складається з мехатронних модулів, інтегрованих відповідно до архітектури управління. Найвідоміші архітектури включають ієрархію, поліархію, гетерархію та гібрид. Методи досягнення технічного ефекту описуються алгоритмами управління, які можуть, а можуть і не використовувати формальні методи в їх розробці. Гібридні системи, важливі для мехатроніки, включають виробничі системи, синергетичні диски, марсоводи для дослідження планет, автомобільні підсистеми, такі як антиблокувальні гальмівні системи та система допомоги при обертанні, та повсякденне обладнання, таке як камери з автофокусуванням, відео, жорсткі диски, програвачі компакт-дисків та телефони.

### Галузі, у яких застосовується мехатроніка

- Прикладна мехатроніка
- Машинне бачення
- Автоматизація та робототехніка
- Сервомеханіка
- Системи зондування та управління
- Автомобілебудування, автомобільна техніка при проектуванні підсистем, таких як антиблокувальні гальмівні системи
- Будівельна автоматизація / Домашня автоматизація
- Комп'ютерно-машинні засоби управління, такі як машини з комп'ютерним керуванням, такі як фрезерні верстати з ЧПУ, гідроструйки з ЧПУ та плазморізи з ЧПУ
- Експертні системи
- Промислові товари
- Споживацькі товари
- Системи мехатроніки
- Медична мехатроніка, медичні системи візуалізації
- Структурно -динамічні системи
- Транспортні та транспортні системи
- Мехатроніка як нова мова автомобіля
- Комп'ютерні та інтегровані системи виробництва
- Комп'ютерне проектування
- Інженерно -виробничі системи
- Упаковка
- Мікроконтролери / ПЛК
- Мікропроцесори

### Фізичні реалізації

Механічне моделювання вимагає моделювання та моделювання явищ фізичного комплексу в рамках багатомасштабного та багатозначного підходу. Це передбачає впровадження та управління методами та інструментами моделювання та оптимізації, які інтегровані у системний підхід. Спеціальність розрахована на студентів -механіків, які хочуть відкрити свій розум для системної інженерії та здатні інтегрувати різні фізичні чи технологічні технології, а також на студентів -мехатроніків, які хочуть збільшити свої знання з методів оптимізації та мультидисциплінарного моделювання. Спеціальність навчає студентів надійним та/або оптимізованим методам концепції конструкцій чи багатьох технологічних систем, а також основним інструментам моделювання та моделювання, що використовуються у НДДКР. Також пропонуються спеціальні курси для оригінальних застосувань (багатоматеріальні композити, новаторські перетворювачі та виконавчі механізми, інтегровані системи...), щоб підготувати студентів до майбутнього прориву у сферах, що охоплюють матеріали та системи. Для деяких мехатронних систем головне питання вже не в тому, як реалізувати систему управління, а в тому, як реалізувати виконавчі механізми. У межах мехатронного поля в основному дві технології використовуються для виробництва руху/руху.

### Галузі мехатроніки

Новий варіант цієї галузі - біомехатроніка, мета якої - інтегрувати механічні частини з людиною, зазвичай у вигляді змінних гаджетів, таких як екзоскелет. Це «реальна» версія кіберзабезпечення.

Іншим варіантом є управління рухом для вдосконаленої мехатроніки, визнане в даний час ключовою технологією в мехатроніці. Надійність управління рухом буде представлена як функція жорсткості та основа для практичної реалізації. Ціль руху визначається жорсткістю управління, яка може змінюватися відповідно до посилання на завдання. Системна стійкість руху завжди вимагає дуже високої жорсткості в контролері. [6]

Авіоніка також вважається варіантом мехатроніки, оскільки вона поєднує кілька галузей, таких як електроніка та телекомунікації з аерокосмічною технікою.

### Інтернет речей

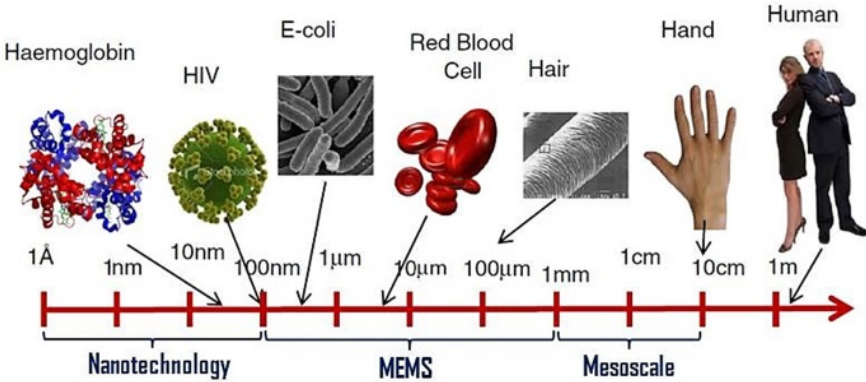
Інтернет речей (IoT) — це взаємозв'язок фізичних пристроїв, вбудований в електроніку, програмне забезпечення, датчики, виконавчі механізми та мережеве з'єднання, що дозволяє цим об'єктам збирати та обмінюватися даними.

Інтернет речей і мехатроніка доповнюють один одного. Багато розумних компонентів, пов'язаних з Інтернетом речей, будуть по суті мехатронними. Розвиток IoT змушує інженерів-механіків, конструкторів, практиків та педагогів досліджувати способи сприйняття, проектування та виготовлення мехатронних систем та компонентів. Це дозволяє їм зіткнутися з новими проблемами, такими як безпека даних, машинна етика та інтерфейс людина-машина

## Мікроелектромеханічні системи

**Мікроелектромеханічні системи** (*Microelectromechanical systems — MEMS*), та відповідні системи мікроелектроніки та мікросистеми складають технологію мікроскопічних пристроїв, особливо тих, що мають рухомі частини. Вони з'єднуються в наномасштабі з наноелектромеханічними системами (NEMS) та нанотехнологіями.

MEMS — це загальний термін для широкого спектра конструкцій, методів та механізмів мікроелектроніки, що передбачає реалізацію рухомих механічних деталей у мікроскопічному масштабі.



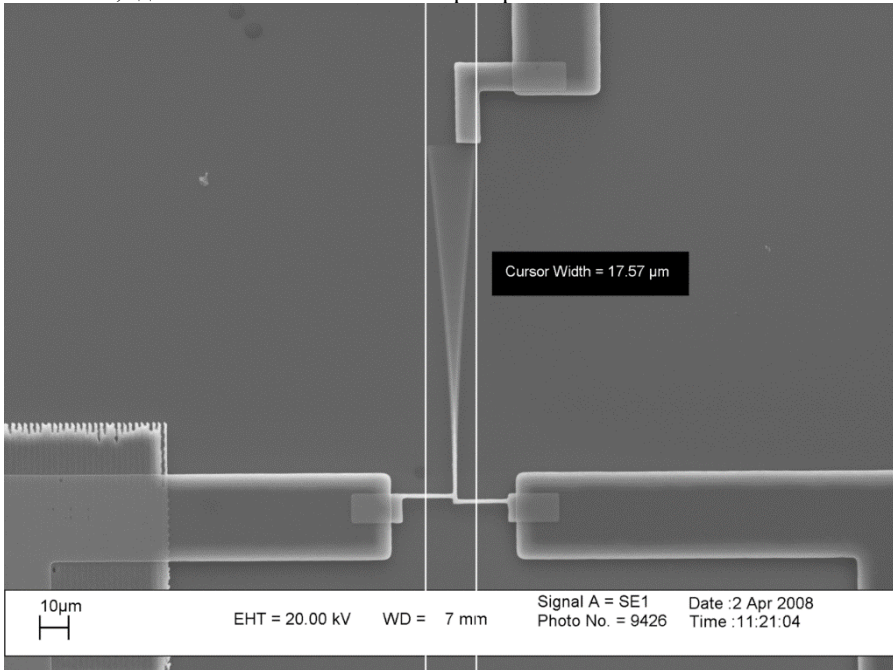
### Мікроскопічна шкала MEMS

Коротко кажучи, MEMS займається перетворенням традиційних громіздких механічних систем у мініатюрні, більш ефективні та високомасштабовані альтернативи, аналогічні тому, що технології інтегральних схем та напівпровідників зроби́ли з електричними та електронними системами.

MEMS складаються з компонентів розміром від 1 до 100 мікрметрів (тобто від 0,001 до 0,1 мм), а пристрої MEMS зазвичай мають розмір від 20 мікрметрів до міліметра (тобто від 0,02 до 1,0 мм), хоча компоненти розташовані в масивах (наприклад, цифрові мікрозеркальні пристрої) можуть бути більше 1000 мм<sup>2</sup>. Зазвичай вони складаються з центрального блоку, який обробляє дані (мікросхема інтегральної схеми, наприклад мікропроцесор), і кількох компонентів, які взаємодіють з навколишнім середовищем (наприклад, мікросенсори). Через велике відношення площі поверхні до об'єму MEMS, сили, викликані електромагнетизмом навколишнього середовища (наприклад, електростатичні заряди та магнітні моменти), та динаміка рідини (наприклад, поверхневий натяг та в'язкість) є більш важливими вимогами щодо конструкції, ніж у механічних пристроях більшого масштабу. Технологія MEMS відрізняється від молекулярної нанотехнології або молекулярної електроніки тим, що остання також повинна враховувати хімію поверхні.

Потенціал дуже маленьких машин був оцінений ще до того, як існувала технологія, яка могла б їх створити (див., Наприклад, відому лекцію Річарда Фейнмана 1959 р. "Там багато місця на дні"). MEMS стали практичними, коли їх можна було виготовити за допомогою модифікованих технологій виготовлення

напівпровідникових пристроїв, які зазвичай використовуються для виробництва електроніки. До них відносяться формування та обшивка, вологе травлення (KOH, TMAH) та сухе травлення (RIE та DRIE), електророзрядна обробка (EDM) та інші технології, здатні виготовляти невеликі пристрої.



*Мікроконсоль MEMS, що резонує в скануючому електронному мікроскопі*

### Історія MEMS

Технологія MEMS має коріння в революції кремнію, яку можна простежити до двох важливих винаходів кремнію напівпровідників з 1959 року: чіпа монолітної інтегральної схеми (IC) Роберта Нойса в Fairchild Semiconductor і MOSFET (польовий ефект оксиду металу та напівпровідника) транзистор або транзистор MOS) Мохамеда М. Аталли та Давона Канга в Bell Labs. Масштабування МОП-транзисторів, мініатюризація МОП-транзисторів на мікросхемах IC, призвело до мініатюризації електроніки (як передбачали закон Мура та масштабування Деннара). Це заклало основи мініатюризації механічних систем, з розвитком технології мікрообробки на основі напівпровідникової технології кремнію, коли інженери почали розуміти, що кремнієві чіпи та МОП -транзистори можуть взаємодіяти та спілкуватися з навколишнім середовищем та обробляти такі речі, як хімікати, рухи та світло. Один з перших кремнієвих датчиків тиску був ізотропно мікрооброблений компанією Honeywell у 1962 р.

Раннім прикладом пристрою MEMS є транзистор із резонансними затворами, адаптація МОП-транзистора, розроблена Харві К. Натансоном у 1965 р. Інший

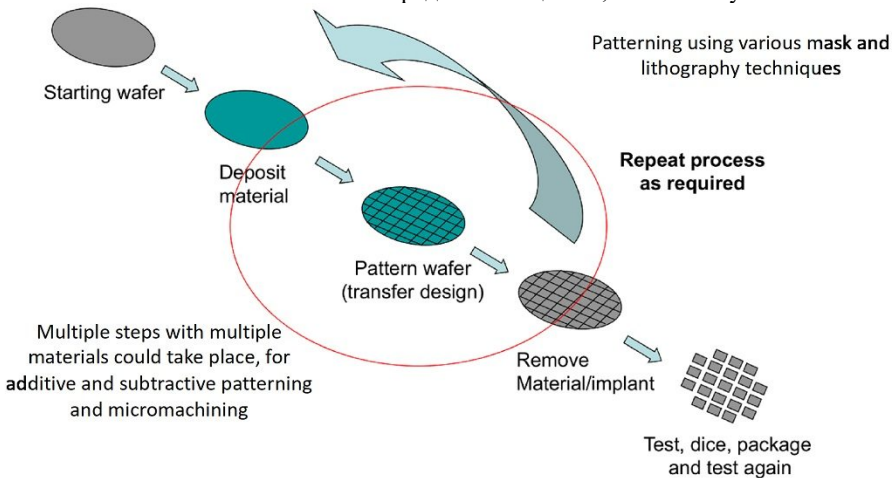
ранній приклад - резоністор, електромеханічний монолітний резонатор, запатентований Реймоном Дж. Вільфінгером між 1966 і 1971 рр. Протягом 1970-х — на початку 1980-х років було розроблено ряд мікросенсорів MOSFET для вимірювання фізичних, хімічних, біологічних та екологічних параметрів.

### Типи MEMS

Існує два основних типи технології перемикачів MEMS: ємнісна та омична. Ємнісний перемикач MEMS розроблений за допомогою рухомої пластини або чутливого елемента, який змінює ємність. Омичні вимикачі управляються консолями з електростатичним керуванням. Омичні вимикачі MEMS можуть вийти з ладу через втому металу приводу MEMS (консолі) та зносу контактів, оскільки консолі з часом можуть деформуватися.

### Технології виробництва MEMS

MEMS класично виготовляються мікробробкою з кремнію. Існують різні типи кремнієвих пластин, і кремній можна легувати до різних рівнів провідності. Додаткова функція можна надати додаткові матеріали для забезпечення різних можливостей, таких як шари електродів або п'єзоелектричні шари. Проектування та виготовлення MEMS включає в себе ряд етапів і циклів, які можна узагальнити:



### Етапи виробництва MEMS

- Проектування, моделювання та моделювання (з використанням аналітичних, числових, CAD та FEA методів)
- Розкладка та розкладка пластин (за допомогою редактора макетів)
- Початкова підкладка (наприклад, кремній, скло, кварц, нержавіюча сталь, пластмаса)
- Процес мікробробництва (цикл через наступні кроки, поки не буде досягнутий бажаний дизайн)
  - Додаток (осадження матеріалу: хімічні пари, розпилення, випаровування, окислення)



- Візерунок (маски, фотолітографія, контактна літографія, проєкційна літографія)
- Віднімається (травлення матеріалу: волога хімічна речовина, сухі іони або плазма, DRIE)
- Нарізання кубиками (лазер, алмазна пила, плазмове травлення)
- Скріплення проводом (для підключення до схеми інтерфейсу)
- Упаковка та інкапсуляція (герметичне ущільнення, пластикове/керамічне/металеve ущільнення, упаковка на рівні пластини)

### Технології мікрообробки

**Об'ємна мікрообробка.** Об'ємна механічна обробка — це найдавніша парадигма кремнію на основі MEMS. Вся товщина кремнієвої пластини використовується для побудови мікроемеханічних конструкцій. Кремній обробляється різними процесами травлення. Анодне скріплення скляних пластин або додаткових кремнієвих пластин використовується для додавання елементів у третьому вимірі та для герметичного інкапсулювання. Об'ємна механічна обробка була важливою для створення високопродуктивних датчиків тиску та акселерометрів, які змінили сенсорну промисловість у 1980-х та 90-х роках.

**Поверхнева мікрообробка.** Поверхнева мікрообробка використовує шари, нанесені на поверхню підкладки, як структурні матеріали, а не використовує саму підкладку. Поверхнева мікрообробка була створена наприкінці 1980-х років для того, щоб зробити мікрообробку кремнію більш сумісною з планарною технологією інтегральної схеми, з метою поєднання MEMS та інтегральних схем на одній і тій самій кремнієвій пластині. Оригінальна концепція мікрообробки поверхні базувалася на тонких полікристалічних шарах кремнію з малюнком рухомих механічних конструкцій, що вивільняється шляхом жертвоприношення травленням нижнього оксидного шару. Міжпальцеві гребінцеві електроди використовувалися для створення сил у площині та для емнісного виявлення руху в площині. Ця парадигма MEMS дозволила виготовити недорогі акселерометри, наприклад, автомобільні системи подушок безпеки та інші застосування, де достатньо низької продуктивності та/або високих діапазонів. Компанія Analog Devices стала першою в галузі індустріалізації поверхневої мікрообробки та реалізувала спільну інтеграцію MEMS та інтегральних схем.

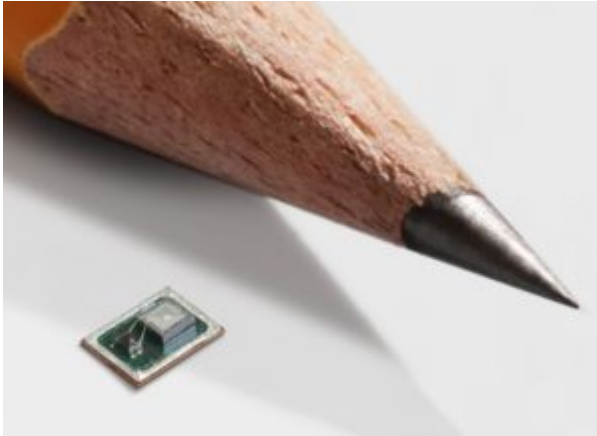
**Термічне окислення.** Для контролю розмірів мікро- та наномасштабних компонентів часто застосовують так звані процеси без травлення. Цей підхід до виготовлення MEMS в основному ґрунтується на окисленні кремнію, як описано в моделі Діла-Гроува. Процеси термічного окислення використовуються для виробництва різноманітних структур кремнію з високоточним регулюванням розмірів. Пристрої, включаючи гребінці з оптичними частотами та кремнієві датчики тиску MEMS, були виготовлені за допомогою процесів термічного окислення для точної настройки кремнієвих структур в одному або двох вимірах. Термічне окислення має особливу цінність у виробництві кремнієвих нанопроводів, які широко використовуються в системах MEMS як механічні, так і електричні компоненти.

**Силіконова мікрообробка з високим співвідношенням сторін (High aspect ratio – HAR).** Силіконова мікрообробка для об'ємного та

поверхневого використання використовується у промисловому виробництві датчиків, струменевих форсунок та інших пристроїв. Але у багатьох випадках різниця між цими двома технологіями зменшилася. Нова технологія травлення, глибоке реактивно-іонне травлення, дали змогу поєднати хороші показники, характерні для об'ємної мікрообробки, з гребінчастими структурами та роботою в площині, характерною для поверхневої мікрообробки. Хоча у поверхневій мікрообробці звичайно структурна товщина шару лежить в діапазоні 2 мкм, у мікромеханічній обробці з HAR товщина може становити від 10 до 100 мкм. Матеріали, які зазвичай використовуються при мікрообробці кремнію HAR, — це товстий полікристалічний кремній, відомий як епі-полі кремній, та скріплені пластини кремнію на ізоляторі (SOI), хоча також були створені процеси для об'ємної кремнієвої пластини (SCREAM). Для захисту структур MEMS використовується скріплення другої пластини шляхом склеювання зі скляним спіканням, анодного скріплення або сплаву. Інтегральні схеми зазвичай не поєднуються з мікромеханічною обробкою HAR.

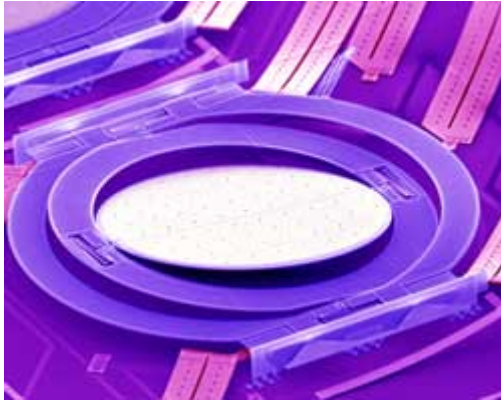
### Області застосування MEMS

MEMS використовуються в широкому діапазоні датчиків, приводів, генераторів, джерел енергії, біохімічних та біомедичних систем та осциляторів. Деякі приклади програм MEMS включають:



*Мікрофон MEMS*

- Датчики, такі як акселерометри MEMS, гіроскопи MEMS, датчики тиску MEMS, датчики нахилу MEMS та інші типи резонансних датчиків MEMS
- Приводи, такі як вимикачі MEMS, мікронасоси, мікро важелі та мікрозахопи
  - Генератори та джерела енергії, такі як збирачі енергії вібрації MEMS, паливні елементи MEMS та радіоізотопні генератори MEMS
  - Біохімічні та біомедичні системи, такі як біосенсиори MEMS, лабораторні мікросхеми та датчики мікрофлюїду та твердих частинок повітря MEMS
  - Осцилятори MEMS для точного обліку часу та застосувань для регулювання частоти

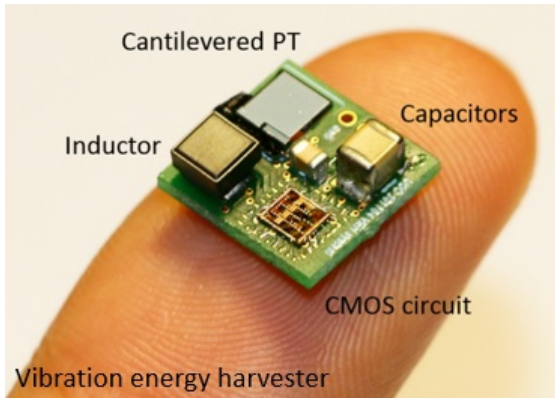


*Оптичний перемикач MEMS*

У ще меншому нанометровому масштабі технологія виготовлення перетворюється на наноелектромеханічну систему (NEMS). Крім того, якщо MEMS інтегровано з іншими технологіями, можуть виникнути різні комбінаційні варіанти здійснення, такі як біоMEMS, де біохімічні та біомедичні системи реалізовані на мікрофабричних пристроях, мікрооптико-електромеханічна система (MOEMS) або ОртоMEMS, де оптичні системи, такі як мікро-дзеркала інтегровані для маніпулювання або відчуття світла в мікроскопічному масштабі, радіочастотна мікроелектромеханічна система (RFMEMS), як правило, передбачає тісну інтеграцію з напівпровідниковою мікроелектронікою для забезпечення радіочастотної трансдукції та комутації.

### **Технологічний прогрес MEMS**

Перша лабораторна демонстрація пристроїв MEMS відбулася у 1960 -х роках у вигляді датчика тиску MEMS. Академічні дослідження набрали обертів у 1980 -х роках, тоді як комерційний розвиток та виробництво почали розвиватися у 1990 -х. Сьогодні кожен носить на собі пристрої MEMS у вигляді смартфонів, розумних годинників та фітнес -трекерів. Раніше аеронавігаційна гіроскопічна система, що використовувалася для визначення нахилу, кроку та повороту в кабіні літаків, важила кілька кілограмів і мала довжину декількох дюймів, тоді як сьогодні гіроскопи MEMS у наших смартфонах важать менше міліграма і еквівалентні за розміром піщинка. З мініатюризацією розмірів також відбувається значне зниження собівартості виробництва та покращення масштабів економіки. Це схоже на продовження мініатюризації та зниження вартості, що спостерігається у напівпровідниковій промисловості.



*Вібраційний енергетичний комбайн MEMS*

Крім того, пристрої MEMS також пропонують менше споживання електроенергії та більшу чутливість, чого традиційні механічні аналоги просто фізично не можуть досягти. Наприклад, резонансний тензорезистор MEMS споживає мікровольт електроенергії, пропонуючи при цьому чутливість у діапазоні нанодеформацій. Це порівняно з сотнями міліватт-ватів споживання електроенергії для звичайних тензодатчиків з фольги, які в кращому випадку можуть виміряти лише до кількох мікронапружень. Інший приклад полягає в тому, що звичайні мікроваги обмежуються точністю від кількох десятків до кількох сотень мікрограмів, тоді як мікроваги MEMS можуть зводитися до пікограм або навіть фемтограм роздільної здатності.

### Переваги та недоліки MEMS

#### Переваги MEMS

- Надзвичайно масштабоване виробництво, що призводить до дуже низьких одиничних витрат при масовому виробництві
- Датчики MEMS мають надзвичайно високу чутливість
- Перемикачі та виконавчі механізми MEMS можуть досягати дуже високих частот
- Пристрої MEMS потребують дуже низького енергоспоживання
- MEMS можна легко інтегрувати з мікроелектронікою для досягнення вбудованих мехатронних систем
- Ефекти масштабування на мікроскопічних рівнях можна використовувати для досягнення конструкцій та динамічних механізмів, інакше це неможливо на макромасштабах

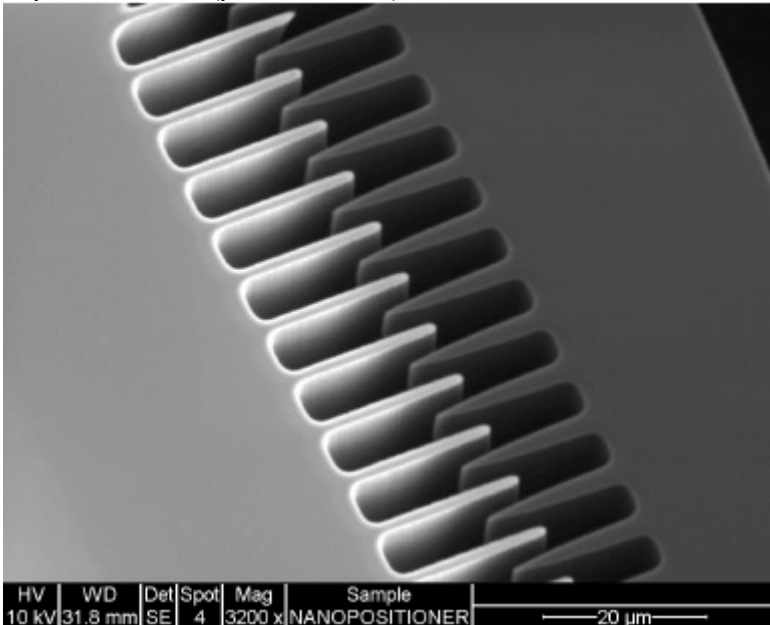
#### Недоліки MEMS

- Дуже дорого на етапі досліджень і розробок для будь-якої нової конструкції або пристроїв MEMS
- Дуже дорогі попередні витрати на встановлення для виробництва чистих приміщень та ливарних приміщень

- Витрати на виготовлення та складання одиниці продукції можуть бути дуже високими для невеликих кількостей. Тому MEMS не підходить для нішевих додатків, якщо тільки вартість не є проблемою
- Тестування обладнання для визначення якості та продуктивності також може бути дорогим

### Типи перетворювачів MEMS

Для взаємодії зі світлом пристрої MEMS можуть використовувати різні типи механізмів трансдукції. Зазвичай це механічно-електричні перетворювачі і навпаки, так що ми можемо керувати пристроями MEMS та їх взаємодією з механічним світлом за допомогою інтерфейсних схем. Крім того, ряд інших типів перетворювачів також може бути використаний для взаємодії з хімічною, світловою, магнітною, радіочастотною (радіочастотною) та іншими областями.



*Електростатичний гребінчастий привід у пристрої MEMS*

Зазвичай електростатичний є найпопулярнішим перетворювачем у кремнієвій MEMS. Це пояснюється тим, що не потрібен додатковий спеціалізований матеріал, і мікроопрацьований кремній можна легувати для забезпечення провідності. Встановивши електричне поле через пару смісних паралельних пластин, можна підтримувати електростатичну силу. Коли механічний рух змінює відстань між паралельними пластинами, можна виміряти електричний сигнал через паралельні пластини. Крім того, шляхом подачі динамічного електричного сигналу можна активувати паралельну пластину. Конструкції з гребінцевими пальцями дуже популярні серед електростатичних перетворювачів MEMS, щоб максимізувати смісну площу поверхні перетворювача.

В останнє десятиліття п'єзоелектричні перетворювачі також стають все більш популярними в конструкції MEMS, оскільки технологія виготовлення мікрообробних п'єзоелектричних матеріалів вдосконалилася. Як правило, сумісні з MEMS п'єзоелектричні матеріали включають нітрид алюмінію (AlN), оксид цинку (ZnO), золь-гель титанат цирконату свинцю (PZT), розріджений об'ємний PZT та різні комбінації ніобатів. По мірі дозрівання технології виготовлення більш функціональні матеріали потенційно можуть бути інтегровані з процесами мікрообробки кремнію.

Деякі з основних перетворювачів, що використовуються в MEMS, включають:

- Електростатичний
- П'єзоелектрик
- Сегнетоелектрик
- Електромагнітні
- Трибоелектрик
- Магнітострикція
- Магнітні
- Радіочастота (РФ)
- Тепловий (градієнт температури або коливання температури)
- Оптичний (світлова енергія або світлові сигнали)
- Хімічна (мікрофлюїдична)
- Біологічні та біомедичні

### Наноелектромеханічні системи (NEMS)

Наноелектромеханічні системи (*Nanoelectromechanical systems* — NEMS) - це клас пристроїв, що інтегрують електричні та механічні функції на нанорозмір. NEMS формують наступний логічний крок мініатюризації з так званих мікроелектромеханічних систем або пристроїв MEMS. NEMS зазвичай інтегрує транзисторну наноелектроніку з механічними виконавчими механізмами, насосами або двигунами, і таким чином може утворювати фізичні, біологічні та хімічні датчики. Назва походить від типових розмірів пристрою в нанометровому діапазоні, що призводить до низької маси, високих частот механічного резонансу, потенційно великих квантово-механічних ефектів, таких як рух нульової точки, і високого співвідношення поверхні до об'єму, корисного для поверхневих сенсорних механізмів. [2] Застосування включають акселерометри та датчики для виявлення хімічних речовин у повітрі.

### Історія

Як зауважив Річард Фейнман у своїй відомій промові 1959 р. «Там, внизу багато місця», існує багато потенційних застосувань машин все менших і менших розмірів; завдяки створенню та контролю пристроїв у менших масштабах, усі переваги технології. Очікувані переваги включають більшу ефективність та зменшення розмірів, зменшення споживання електроенергії та зниження витрат на виробництво електромеханічних систем.

У 1960 році Мохамед М. Аталла та Давон Канг з Bell Labs виготовили перший МОП -транзистор з товщиною оксиду затвору 100 нм. У 1962 році Аталла та Канг

виготовили транзистор з наношарового основного металу напівпровідникового переходу (перехід М – S), який використовував золоті (Au) тонкі плівки товщиною 10 нм. У 1987 році Біджан Даварі очолив дослідницьку групу IBM, яка продемонструвала перший МОП -транзистор з товщиною оксиду 10 нм. [5] МОП-транзистори з багатьма затворами дозволяють масштабувати менше 20 нм довжини каналу, починаючи з FinFET. [6] FinFET походить від дослідження Дайха Хісамото в Центральній дослідницькій лабораторії Хітачі в 1989 році. [7] [8] [9] [10] У Університеті Берклі група під керівництвом Хісамото та Ченмін Ху з TSMC у 1998 році виготовила пристрої FinFET із довжиною каналу до 17 нм. [6]

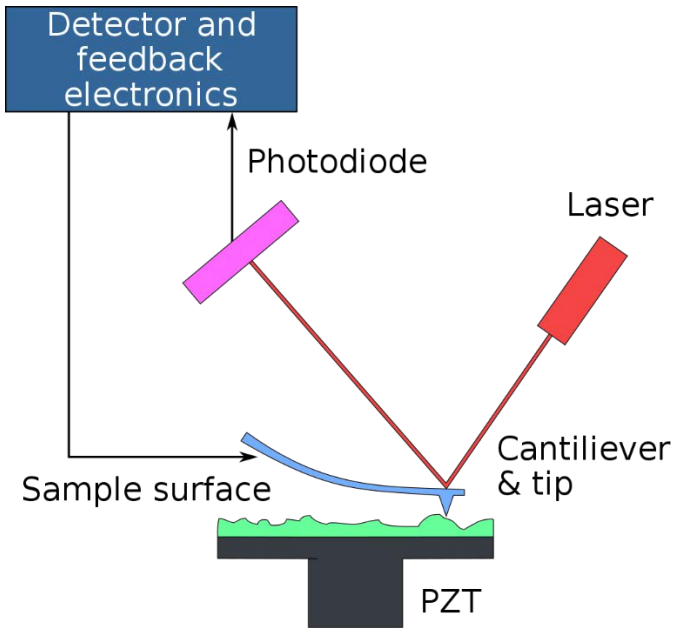
**NEMS.** У 2000 році дослідники IBM продемонстрували перший дуже масштабний інтеграційний пристрій (VLSI) NEMS. Його передумовою був масив AFM -наконечників, які можуть нагрівати/відчувати деформується підкладку, щоб функціонувати як пристрій пам'яті. Подальші пристрої були описані Стефаном де Хананом. У 2007 році Міжнародна технічна дорожня карта для напівпровідників (ITRS) містить пам'ять NEMS як нову статтю для розділу «Нові дослідницькі пристрої».

### Атомно-силова мікроскопія

Ключове застосування NEMS — це наконечники атомно-силового мікроскопа. Атомно-силова мікроскопія (*Atomic force microscopy — AFM*) або скануюча силова мікроскопія (SFM) — це тип скануючої зондової мікроскопії (SPM) з дуже високою роздільною здатністю порядку часток нанометра, що більш ніж у 1000 разів краще, ніж оптична роздільна здатність, обмежена дифракцією. Інформація збирається мікроскопом шляхом "відчуття" або "дотику" до поверхні за допомогою механічного зонда. П'єзоелектричні елементи, що виконують крихітні, але точні рухи під дією електронної команди, дають змогу виконувати точне сканування.

**Здатності AFM.** AFM має три основні здатності: вимірювання сили, отримання топографічного зображення та маніпулювання, тобто переміщення з точністю часток нанометра.

AFM використовується для вимірювання сил між зондом та зразком як функцію їх взаємного поділу. Це може бути застосовано для проведення силової спектроскопії, для вимірювання механічних властивостей зразка, таких як модуль Юнга зразка, міра жорсткості.



*АСМ генерує зображення шляхом сканування невеликої консолі над поверхнею зразка. Гострий кінчик на кінці консолі контактує з поверхнею, згинаючи консоль і змінюючи кількість лазерного світла, відбитого на фотодіоді. Потім висоту консолі регулюють, щоб відновити сигнал відгуку, в результаті чого виміряна висота консолі простежує поверхню.*

Для формування зображення тривимірної форми (топографії) поверхні зразка з високою роздільною здатністю використовується реакція зонда на сили, які на нього накладає зразок.

Це досягається шляхом растрового сканування положення зразка відносно кінчика та запису висоти зонда, що відповідає постійній взаємодії зразка-зонда. Топографія поверхні зазвичай відображається як псевдокольоровий графік. Хоча перша публікація про атомно-силову мікроскопію, зроблена Біннігом, Квате і Гербером у 1986 р., припускала про можливість досягнення атомної роздільної здатності, глибокі експериментальні проблеми необхідно було подолати, перш ніж розкриття атомне дефектів та ступінчастих країв у навколишніх умовах було продемонстровано в 1993 Ohnesorge та Binnig. Справжня атомна роздільна здатність поверхні кремнію 7x7 - атомні зображення цієї поверхні, отримані STM, переконали наукове співтовариство у вражаючій просторовій роздільній здатності скануючої тунельної мікроскопії було показано Гіссіблем.

Під час маніпуляції сили між наконечником і зразком також можна використовувати для зміни властивостей зразка контрольованим чином. Приклади цього включають атомну маніпуляцію, літографію скануючого зонда та локальну стимуляцію клітин.



Одночасно з отриманням топографічних зображень можна вимірювати локально та відображати у вигляді зображення інші властивості зразків, часто з однаково високою роздільною здатністю. Прикладами таких властивостей є механічні властивості, такі як жорсткість або міцність зчеплення та електричні властивості, такі як провідність або поверхневий потенціал.

Підвищена чутливість, досягнута за допомогою NEMS, призводить до використання менших та більш ефективних датчиків для виявлення напружень, вібрацій, сил на атомному рівні та хімічних сигналів.

### **Перемикачі NEMS на основі вуглецевої нанотрубки (carbon nanotube — CNT).**

Основним недоліком перемикачів MEMS у порівнянні з вимикачами NEMS є обмежена швидкість перемикання MEMS в мікросекундному діапазоні, що перешкоджає роботі високошвидкісних пристроїв. Обмеження швидкості перемикання та напруги спрацьовування можна подолати, зменшивши масштаб пристроїв від мікро до нанометрового масштабу. Порівняння параметрів продуктивності між вимикачами NEMS на основі вуглецевої нанотрубки (CNT) та їх аналогом CMOS показало, що комутатори NEMS на основі CNT зберігали продуктивність при більш низьких рівнях споживання енергії і мали підпороговий струм витoku на кілька порядків менший, ніж у CMOS вимикачів. NEMS на основі CNT з подвійно затиснутими структурами далі вивчаються як потенційні рішення для пристроїв енергонезалежної пам'яті з плаваючими затворами.

### **Наноелектромеханічний акселерометр.**

Механічні та електронні властивості графена зробили його сприятливим для інтеграції в акселерометри NEMS, такі як маленькі датчики та приводи для систем моніторингу серця та мобільного захоплення руху. Товщина атомарного графену дає змогу зменшити розміри акселерометрів від мікро до наномасштабу, зберігаючи при цьому необхідні рівні чутливості системи.

Завдяки підвищенню кремнієстійкої маси на двошаровій графеновій стрічці можна створити нанорозмірну пружинну масу і п'єзорезистивний перетворювач з можливістю сучасних перетворювачів в акселерометрах. Пружинна маса забезпечує більшу точність, а п'єзорезистивні властивості графену перетворюють деформацію від прискорення в електричні сигнали для акселерометра. Підвішена графенова стрічка одночасно формує пружинний і п'єзорезистивний перетворювач, ефективно використовуючи простір, одночасно покращуючи продуктивність акселерометрів NEMS.

## ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

У електротехнічній інженерії електрична машина — це загальний термін для машин, що використовують електромагнітні сили, таких як електродвигуни, електрогенератори та ін. Вони є електромеханічними перетворювачами енергії: електродвигун перетворює електричну енергію в механічну, тоді як електричний генератор перетворює механічну енергію в електричну. Рухомі частини машини можуть бути обертовими (обертіві машини) або лінійними (лінійні машини). Окрім двигунів та генераторів, до третьої категорії часто відносяться трансформатори, які, хоча у них немає рухомих частин, є також перетворювачами енергії, що змінюють рівень напруги змінного струму.

Електричні машини у вигляді генераторів виробляють практично всю електроенергію на Землі, а у вигляді електродвигунів споживають приблизно 60% усієї виробленої електроенергії. Електричні машини були розроблені в середині 19 століття і з тих пір є всюдисущим компонентом інфраструктури. Розробка більш ефективної технології електричних машин має вирішальне значення для будь-якої глобальної стратегії збереження, зеленої енергії чи альтернативної енергетики.

### Електричні генератори



*Електрогенератор.*

При виробництві електроенергії генератор — це пристрій, який перетворює рушійну силу (механічну енергію) в електричну для використання у зовнішньому

колі. Джерела механічної енергії включають парові турбіни, газові турбіни, водяні турбіни, двигуни внутрішнього згоряння, вітрогенератори і навіть рукоятки. Перший електромагнітний генератор, *диск Фарадея*, був винайдений у 1831 р. британським ученим Майклом Фарадеєм. Генератори забезпечують майже всю потужність електромереж.

Зворотнє перетворення електричної енергії в механічну здійснюється за допомогою електродвигуна. Двигуни та генератори мають багато подібності. Багато двигунів можуть приводитися в дію механічно для виробництва електроенергії; часто вони виготовляють прийнятні ручні генератори

Генератор змушує електрони протікати через зовнішнє електричне коло. Це аналогічно водяному насосу, який створює потік води, але не створює воду всередині. Джерелом механічної енергії, головним двигуном, може бути поршневий або турбінний паровий двигун, вода, що потрапляє через турбіну або водяне колесо, двигун внутрішнього згоряння, вітрогенератор, рукоятка, стиснене повітря або будь-яке інше джерело механічної енергії.

Дві основні частини електричної машини можна описати як механічно, так і електрично. У механічному відношенні ротор є обертовою частиною, а статор - нерухомою частиною електричної машини. В електричному плані якори є пристроєм, що виробляє електроенергію, а поле-компонентом магнітного поля електричної машини. Обмотки можуть бути як на роторі, так і на статорі. Магнітне поле може забезпечуватися або електромагнітами, або постійними магнітами, встановленими на роторі або на статорі. Генератори поділяються на два типи: генератори змінного струму та генератори постійного струму.

**Термінологія.** Електромагнітні генератори діляться на одну з двох широких категорій, генератори постійного струму (динамо-машина) та генератори змінного струму.

Генератори постійного струму генерують імпульсний постійний струм за допомогою комутатора.

Генератори змінного струму ( $\sim$ ) генерують змінний струм синусоїдальної форми.

Механічно генератор складається з обертової частини та нерухомої частини:

Ротор: частина електричної машини, що обертається.

Статор: Стационарна частина електричної машини, яка оточує ротор.

Одна з цих частин породжує магнітне поле, інша має обмотку з провідників, в якій змінне магнітне поле викликає електричний струм:

Обмотка або постійні магніти: компонент електричної машини, що виробляє магнітне поле. Магнітне поле генератора постійного або змінного струму може забезпечуватися або обмотками з провідників, які називаються котушками поля, або постійними магнітами. Генератори з електричним збудженням включають систему збудження для створення потоку магнітного поля. Генератор з використанням постійних магнітів іноді називають магнето або синхронним генератором з постійним магнітом.

Якір (арматура): компонент електричної машини, що виробляє електроенергію. В генераторі, генераторі чи динамо обмотки якоря генерують електричний струм, який забезпечує живлення зовнішнього кола.

Якір може бути на роторі або на статорі, залежно від конструкції, з котушкою поля або магнітом на іншій частині.

### Історія

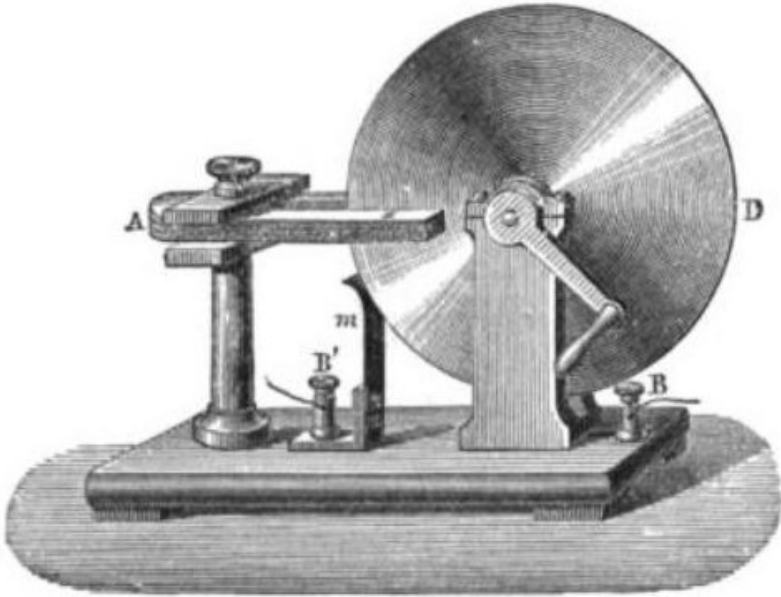
До того, як був виявлений зв'язок між магнетизмом та електрикою, були знайдені електростатичні генератори. Вони працювали на принципах електростатики, використовуючи рухомі електрично заряджені пояси, пластини та диски, які несли заряд до електрода з високим потенціалом. Заряд створювався за допомогою одного з двох механізмів: електростатичної індукції або трибелектричного ефекту. Такі генератори генерували дуже високу напругу і малий струм. Через свою неефективність та труднощі з ізоляційними машинами, які виробляли дуже високі напруги, електростатичні генератори мали низьку потужність і ніколи не використовувалися для виробництва комерційно значних кількостей електричної енергії. Їх єдиним практичним застосуванням було живлення ранніх рентгенівських трубок, а пізніше і деяких прискорювачів атомних частинок.

**Дисковий генератор Фарадея.** Принцип дії електромагнітних генераторів був відкритий у 1831–1832 роках Майклом Фарадеєм. Принцип електромагнітної індукції, пізніше названий *законом Фарадея*, полягає в тому, що в електричному провіднику генерується електрорушійна сила, яка оточує змінний магнітний потік.

Він також побудував перший електромагнітний генератор, що отримав назву диска Фарадея; тип гомополярного генератора, що використовує мідний диск, що обертається між полюсами підковоподібного магніту. Він видав невелику постійну напругу.

Ця конструкція виявилася неефективною через самоусунення протитоків струму в областях диска, які не перебували під впливом магнітного поля. Хоча струм наводився безпосередньо під магнітом, він би циркулював назад в областях, які перебували поза впливом магнітного поля. Цей зустрічний потік обмежував вихідну потужність проводів підбору і викликав нагрівання відходів мідного диска. Пізніше гомополярні генератори вирішували цю проблему, використовуючи масив магнітів, розташованих по периметру диска, для підтримки стійкого ефекту поля в одному напрямку потоку струму.

Іншим недоліком було те, що вихідна напруга була дуже низькою через єдиний шлях струму через магнітний потік. Експериментатори виявили, що використання кількох витків дроту в котушці може призвести до вищих, більш корисних напруг. Оскільки вихідна напруга пропорційна кількості витків, генератори можна легко спроектувати для створення будь-якої бажаної напруги, змінюючи кількість витків. Обмотки дроту стали базовою ознакою всіх наступних конструкцій генераторів.

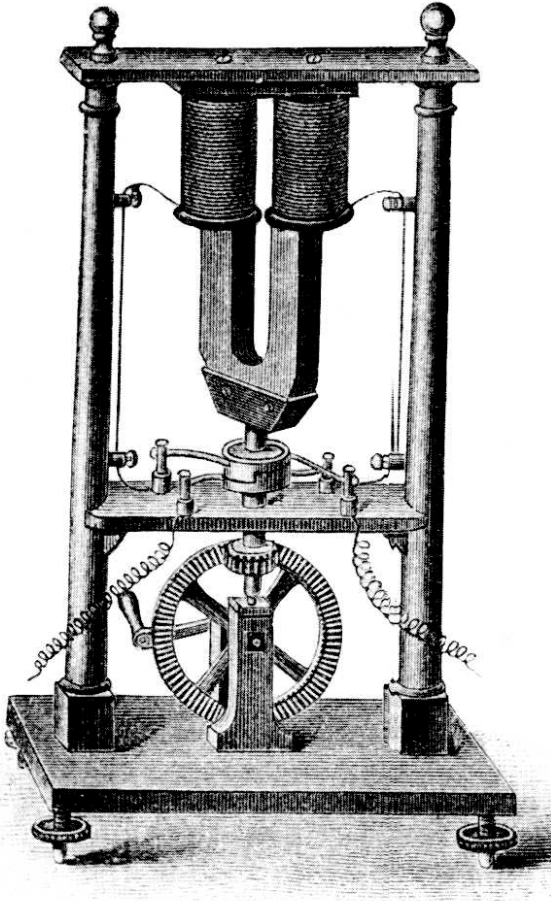


*Диск Фарадея був першим електричним генератором. Підковоподібний магніт (А) створював магнітне поле через диск (D). Коли диск повертався, це викликало електричний струм радіально назовні від центру до обідка. Струм витікав через контакт ковзаючої пружини т, через зовнішню ланцюг і назад у центр диска через вісь.*

**Феномен самозбудження.** Незалежно від Фарадея, Аньос Джедлік (Ányos Jedlik) у 1827 році почав експериментувати з електромагнітними обертовими пристроями, які він назвав електромагнітними самороторами. У прототипі однополюсного електричного стартера (закінченого між 1852 і 1854 роками) як нерухома, так і обертові частини були електромагнітними. Це також було відкриттям принципу самозбудження генератора постійного струму (динамо), яке замінило конструкції постійних магнітів. Він також, можливо, сформулював концепцію динамо в 1861 році (до Сіменса і Уїтстоуна), але не запатентував її, оскільки вважав, що він не перший це усвідомив.

**Генератори постійного струму (динамо).** Котушка дроту, що обертається в магнітному полі, виробляє струм, який змінюється напрямком з кожним обертанням на  $180^\circ$ , змінний струм (AC). Однак багато ранніх видів використання електроенергії вимагали постійного струму (DC). У перших практичних електричних генераторах постійного струму, які називаються *динамо-машинами*, змінний струм був перетворений на постійний струм за допомогою *комутатора*, набору обертових контактів перемикача на валу якоря. Комутатор змінював з'єднання обмотки якоря з ланцюгом кожні  $180^\circ$  обертання валу, створюючи імпульсний

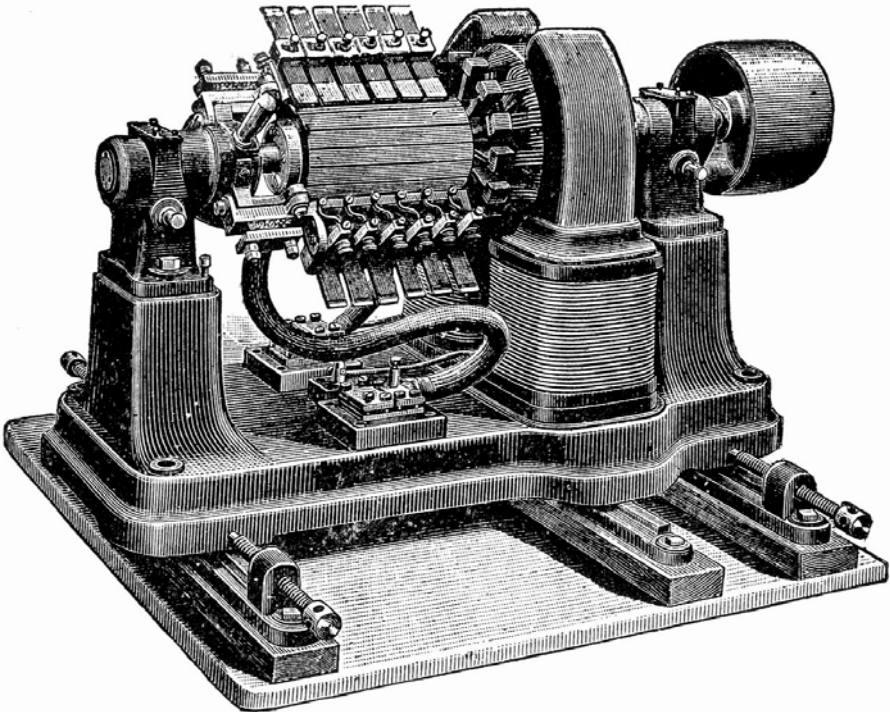
постійний струм. Одне з перших динамо було побудовано Іполітом Піксієм у 1832 році.



*Динамо Іполіта Піксія. Комутатор розташований на валу під обертовим магнітом.*

Динамо було першим електричним генератором, здатним подавати електроенергію для промисловості. Електричний генератор Вулріха 1844 р., який зараз знаходиться в місті Thinktank, Бірмінгемський науковий музей, є найдавнішим електричним генератором, що використовується у промисловому процесі. Він був використаний фірмою Elkingtons для комерційного гальванічного покриття.

Сучасне динамо, придатне для використання у промислових цілях, було самостійно винайдено сером Чарльзом Вігстоном, Вернером фон Сіменсом та Семюелем Альфредом Варлі.



*Це велике струмове динамо з ремінним приводом виробляло 310 ампер при 7 вольтях. Динаміки більше не використовуються через розміри та складність комутатора, необхідного для додатків з високою потужністю.*

У "динамо-електричній машині" для створення статорного поля використовувалися котушки електромагнітного поля із самозбудженням, а не постійні магніти. Конструкція Уйтстоуна була схожа на Siemens, з тією відмінністю, що в конструкції Siemens електромагніти статора були послідовно з ротором, а в конструкції Уйтстоуна вони були паралельні. Використання електромагнітів замість постійних магнітів значно збільшило вихідну потужність динамо та вперше дозволило виробляти велику потужність. Цей винахід призвів безпосередньо до першого великого промислового використання електроенергії. Наприклад, у 1870-х роках Сіменс використовував електромагнітні динамо для живлення електродугових печей для виробництва металів та інших матеріалів.

Розроблена динамо-машина складалася зі стаціонарної конструкції, що забезпечує магнітне поле, і набору обертових обмоток, які обертаються всередині цього поля. На великих машинах постійне магнітне поле забезпечується одним або кількома електромагнітами, які зазвичай називаються котушками поля.

Великі динамічні генератори електроенергії зараз рідко зустрічаються через майже повсюдне використання змінного струму для розподілу електроенергії. До прийняття змінного струму єдиним засобом виробництва та розподілу

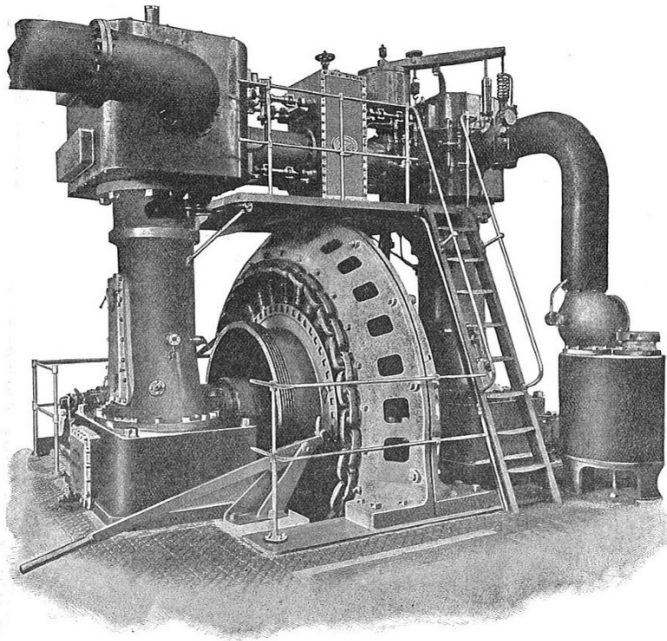
## Електричні машини

електроенергії були дуже великі динамо-машини, тобто генератори постійного струму. Змінний струм став домінувати завдяки здатності змінного струму легко трансформуватися до і від дуже високої напруги, щоб дозволити малі втрати на великі відстані.

**Синхронні генератори (генератори змінного струму).** Завдяки низці відкриттів динамо (генератор постійного струму) змінилося багатьма пізнішими винаходами, особливо генератором змінного струму, який був здатний генерувати змінний струм. Загальновідомо, що це синхронні генератори (SG). Синхронні машини підключаються безпосередньо до електромережі і повинні бути належним чином синхронізовані під час запуску. Крім того, вони збуджуються за допомогою спеціального контролю, щоб підвищити стабільність енергосистеми.

Системи генерації змінного струму були відомі в простих формах з оригінального відкриття Майкла Фарадея магнітної індукції електричного струму. Сам Фарадей побудував ранній генератор. Його машиною був «прямокутник, що обертається», робота якого була гетерополярною — кожен активний провідник послідовно проходив через області, де магнітне поле було в протилежних напрямках.

Великі двофазні генератори змінного струму були побудовані британським електриком Гордоном (*J.E.H. Gordon*), у 1882 році. Першу публічну демонстрацію «системи генератора» було проведено Вільямом Стенлі-молодшим, співробітником Westinghouse Electric у 1886 році.[13]

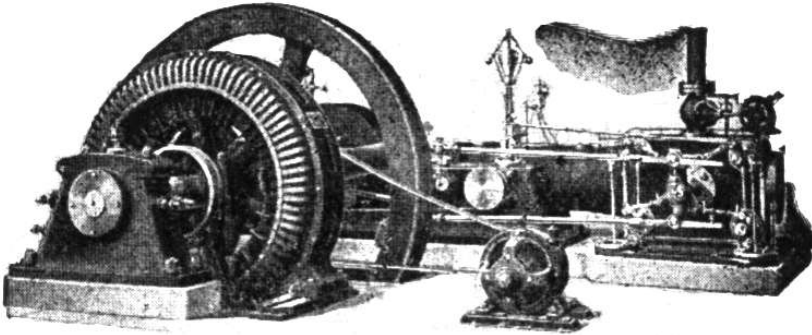


*Генератор змінного струму Ferranti, с. 1900 рік*



Себастьян Зіані де Ферранті (*Sebastian Ziani de Ferranti*) заснував фірму Ferranti, Thompson and Ince у 1882 році, щоб продати свій генератор Ferranti-Thompson, винайдений за допомогою відомого фізика лорда Кельвіна. Його ранні генератори виробляли частоти від 100 до 300 Гц. У 1887 році Ферранті розробив Дептфордську електростанцію для Лондонської електричної корпорації, використовуючи систему змінного струму. Після завершення роботи в 1891 році це була перша по-справжньому сучасна електростанція, яка постачала високовольтне живлення змінного струму, яке потім було «знято» для споживачів на кожній вулиці. Ця базова система використовується сьогодні в усьому світі.

Після 1891 року були введені багатофазні генератори змінного струму для живлення струмів кількох різних фаз. Пізніші генератори змінного струму були розроблені для змінної частоти змінного струму від шістнадцяти до приблизно ста герц, для використання з дуговим освітленням, лампами розжарювання та електродвигунами.



*Невеликий генератор змінного струму на прямій електростанції 75 кВА початку 1900-х років з окремим генератором збуджувача з приводом від ремня.*

**Самозбудження генераторів.** У міру зростання вимог до виробництва електроенергії більшого масштабу зросло нове обмеження: магнітні поля постійних магнітів. Переведення невеликої кількості генерованої генератором потужності на котушку електромагнітного поля дозволило генератору виробляти значно більшу потужність. Це поняття отримало назву самозбудження.

Котушки поля з'єднані послідовно або паралельно обмотці якоря. Коли генератор вперше починає обертатися, невелика кількість залишкового магнетизму, наявного в залізній сердцевині, створює магнітне поле для його запуску, створюючи невеликий струм в якорі. Це протікає через котушки поля, створюючи більше магнітне поле, яке генерує більший струм якоря. Цей процес "завантаження" триває до тих пір, поки магнітне поле в сердечнику не вирівняється через насичення і генератор не досягне вихідної потужності в стаціонарному стані.

Дуже великі генератори електростанцій часто використовують окремий менший генератор для збудження польових котушок більшого розміру. У разі

серйозного широкомасштабного відключення електроенергії, коли сталася висадка електростанцій, станціям може знадобитися виконати чорний запуск для збудження полів своїх найбільших генераторів, щоб відновити обслуговування споживачів.

### Спеціалізовані типи генераторів

#### Генератори постійного струму

**Динамо.** *Динамо* — це електричний генератор, який створює постійний струм за допомогою комутатора. Динамо були першими електричними генераторами, здатними забезпечувати енергію для промисловості, і основою, на якій базувалися багато інших пізніших пристроїв перетворення електричної енергії, включаючи електродвигун, генератор змінного струму та роторний перетворювач.

Сьогодні простіший генератор змінного струму домінує у великомасштабному виробництві електроенергії з міркувань ефективності, надійності та вартості. Динамо має недоліки механічного комутатора. Крім того, перетворення змінного струму в постійний за допомогою випрямлячів (наприклад, вакуумних ламп або нещодавно за допомогою твердотільних технологій) є ефективним і зазвичай економічним.

Слово «динамо» (від грецького слова (δύναμις), що означає сила або потужність) спочатку було іншою назвою для електричного генератора, і досі має деяке регіональне використання як заміну слова генератор.

Електричне динамо використовує обертові котушки проводу та магнітні поля для перетворення механічного обертання в імпульсний постійний електричний струм за допомогою закону індукції Фарадея. Динамо-машина складається з нерухомої конструкції, званої *статором*, яка створює постійне магнітне поле, і набору обертових обмоток, які називаються *якорем*, які обертаються в цьому полі. Завдяки закону індукції Фарадея рух провідника в магнітному полі створює електро рушійну силу, яка діє на електрони в металі, створюючи в провіднику електричний струм. На невеликих машинах постійне магнітне поле може забезпечуватися одним або кількома постійними магнітами; більші машини мають постійне магнітне поле, створене одним або кількома електромагнітами, які зазвичай називають котушками поля.

Для отримання постійного струму необхідний *комутатор*. Коли петля з провідника обертається в магнітному полі, магнітний потік пронизує петлю — і, отже, індукований у ньому потенціал — змінюється на протилежне з кожним півобороту, генеруючи змінний струм. Однак на початкових етапах розвитку електроенергетики змінний струм взагалі не мав відомого застосування. Деякі види використання електроенергії, наприклад гальванічне покриття, використовували постійний струм, який забезпечується брудними рідкими батареями. Динамо були винайдені як заміна батарейок. По суті, комутатор являє собою поворотний перемикач. Він складається з набору контактів, закріплених на валу машини, у поєднанні з нерухомими графітовими контактами, які називаються «*щітками*», оскільки найпершими такими нерухомими контактами були металеві щітки. Коли потенціал

змінюється, комутатор змінює з'єднання обмоток із зовнішнім колом, тож замість змінного струму створюється імпульсний постійний струм.

Перші динамо-машини використовували постійні магніти для створення магнітного поля. Їх називали «*магніто-електричними машинами*» або *магнето*. Однак дослідники виявили, що сильніші магнітні поля — і, отже, більше потужності — можуть бути створені за допомогою електромагнітів (котушок поля) на статорі. Їх називали «*динамо-електричними машинами*» або *динамо*. Котушки поля статора спочатку окремо збуджувалися окремим, меншим генератором, динамо або магнето. Важливим розвитком Уайльда і Сіменса стало відкриття (до 1866 року), що динамо може також самозавантажуватися (*bootstrap*), щоб самозбудитися, використовуючи струм, створений самим динамо. Це дозволило створити набагато більш потужне поле, що дозволило отримати набагато більшу вихідну потужність.

Динамо постійного струму з самозбудженням зазвичай має комбінацію послідовних і паралельних (шунтових) обмоток поля, на які живлення безпосередньо подається ротором через комутатор регенеративним способом. Вони запускаються та експлуатуються подібно до сучасних портативних електрогенераторів змінного струму, які не використовуються з іншими генераторами в електричній мережі.

Існує слабке залишкове магнітне поле, яке зберігається в металевому каркасі пристрою, коли він не працює, яке було нанесено на метал обмотками напруження. Динамо починає обертатися, коли він не підключений до зовнішнього навантаження. Залишкове магнітне поле індукуює дуже малий електричний струм в обмотки ротора, коли вони починають обертатися. Без підключеного зовнішнього навантаження цей невеликий струм потім повністю подається на обмотки збудження, що в поєднанні із залишковим полем змушує ротор виробляти більший струм. Таким чином динамо, що самозбуджується, створює свої внутрішні магнітні поля, поки не досягне нормальної робочої напруги. Коли він здатний виробляти достатній струм, щоб витримати як внутрішні поля, так і зовнішнє навантаження, він готовий до використання.

Динамо, що самозбуджується, з недостатнім залишковим магнітним полем у металевій рамі не зможе виробляти в роторі жодного струму, незалежно від швидкості обертання ротора. Ця ситуація також може виникнути в сучасних портативних генераторах із самозбудженням і вирішується для обох типів генераторів подібним чином шляхом подачі короткого заряду батареї постійного струму до вихідних клем зупиненого генератора. Акумулятор живить обмотки достатньо, щоб відобразити залишкове поле, щоб забезпечити нарощування струму. Це називається блимання поля.

Обидва типи генераторів із самозбудженням, які були підключені до великого зовнішнього навантаження, поки він був нерухомим, не зможуть наростити напругу, навіть якщо присутнє залишкове поле. Навантаження діє як поглинач енергії і безперервно відводить невеликий струм ротора, що створюється залишковим полем, запобігаючи накопиченню магнітного поля в котушці поля.

**Гомополярний генератор.** *Гомополярний генератор* — це електричний генератор постійного струму, що містить електропровідний диск або циліндр, що обертається в площині, перпендикулярній до однорідного статичного

магнітного поля. Між центром диска і ободом (або кінцями циліндра) створюється різниця потенціалів з електричною полярністю, яка залежить від напрямку обертання та орієнтації поля. Він також відомий як уніполярний генератор, ациклічний генератор, дискове динамо або диск Фарадея. Напруга, як правило, низька, близько кількох вольт у випадку невеликих демонстраційних моделей, але великі дослідницькі генератори можуть виробляти сотні вольт, а деякі системи мають кілька генераторів, підключених послідовно, щоб виробляти ще більшу напругу. Вони незвичайні тим, що можуть генерувати величезний електричний струм, деякі з яких більше мільйона ампер, тому що гомополярний генератор може мати дуже низький внутрішній опір. Крім того, гомополярний генератор унікальний тим, що жодна інша роторна електрична машина не може виробляти постійний струм без використання випрямлячів або комутаторів.

**Магнітогідродинамічний (МГД) генератор.** *Магнітогідродинамічний генератор (МГД-генератор)* — це магнітогідродинамічний перетворювач, який використовує цикл Брайтона для перетворення теплової та кінетичної енергії безпосередньо в електрику. Генератори МНД відрізняються від традиційних електрогенераторів тим, що вони працюють без рухомих частин (наприклад, без турбіни), щоб обмежити верхню температуру. Тому вони мають найвищу відому теоретичну термодинамічну ефективність серед будь-якого методу генерації електроенергії. МНД широко розроблявся як цикл доповнення для підвищення ефективності виробництва електроенергії, особливо при спалюванні вугілля або природного газу. Гарячі вихлопні гази від генератора МГД можуть нагрівати котли парової електростанції, підвищуючи загальний ККД.

МГД-генератор, як і звичайний генератор, покладається на переміщення провідника через магнітне поле для створення електричного струму. МГД-генератор використовує гарячий електропровідний іонізований газ (плазму) як рухомий провідник. Механічне динамо, навпаки, використовує для цього рух механічних пристроїв.

Практичні МНД-генератори були розроблені для викопного палива, але їх випередили менш дорогі комбіновані цикли, в яких вихлоп газової турбіни або розплавлений карбонатний паливний елемент нагріває пару для живлення парової турбіни.

МГД-генератор є доповненням до МГД-прискорювачів, які застосовуються для перекачування рідких металів, морської води та плазми.

Природні МГД-генератори є активною областю досліджень у фізиці плазми і представляють великий інтерес для спільнот геофізики та астрофізики, оскільки магнітні поля Землі та Сонця створюються цими природними динамо.

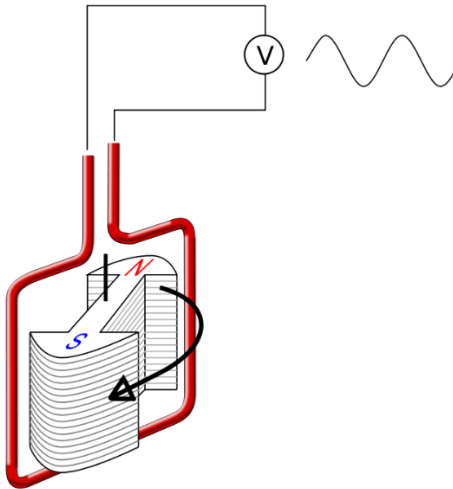
### Генератори змінного струму

**Генератор змінного струму (*alternator*).** Генератор змінного струму — це електричний генератор, який перетворює механічну енергію в електричну у вигляді змінного струму. З міркувань вартості та простоти більшість генераторів змінного струму використовують обертове магнітне поле з нерухомим якорем. Іноді використовується лінійний генератор або обертовий

якір з нерухомим магнітним полем. В принципі, будь-який електричний генератор змінного струму можна назвати генератором змінного струму, але зазвичай цей термін відноситься до невеликих обертових машин, які приводяться в дію від автомобільних та інших двигунів внутрішнього згоряння.

Генератор, який використовує постійний магніт для свого магнітного поля, називається магнето. Генератори на електростанціях з приводом парових турбін називаються турбогенераторами. Великі трифазні генератори змінного струму 50 або 60 Гц на електростанціях виробляють більшу частину світової електроенергії, яка розподіляється електричними мережами.

**Принцип дії.** Провідник, що рухається відносно магнітного поля, розвиває в ньому електрорушійну силу (ЕРС) (закон Фарадея).



*Схема простого генератора змінного струму з обертовим магнітним сердечником (ротором) і нерухомим проводом (статором), що також показує струм, індукований в статорі обертовим магнітним полем ротора.*

Ця ЕРС змінює свою полярність, коли рухається під магнітними полюсами протилежної полярності. Як правило, обертовий магніт, який називається ротором, обертається всередині нерухомого набору провідників, намотаних у котушки на залізному сердечнику, який називається статором. Поле перетинає провідники, генеруючи індуквану ЕРС (електрорушійну силу), оскільки механічний вхід змушує ротор обертатися.

Обертове магнітне поле індукуює змінну напругу в обмотках статора. Оскільки струми в обмотках статора змінюються відповідно до положення ротора, генератор є синхронним генератором.

Магнітне поле ротора може створюватися постійними магнітами або електромагнітом котушки поля. Автомобільні генератори змінного струму використовують обмотку ротора, яка дозволяє керувати напругою, що створюється генератором змінного струму в обмотці поля ротора. Машини з постійними магнітами уникають втрат через струм намагнічування в роторі, але мають обмежений розмір через вартість магнітного матеріалу. Оскільки поле постійного магніту постійне, напруга на клеммах змінюється безпосередньо зі швидкістю генератора. Безщіткові генератори змінного струму зазвичай більші за ті, що використовуються в автомобілях.

Пристрій автоматичного регулювання напруги контролює струм поля, щоб підтримувати вихідну напругу постійною. Якщо вихідна напруга з котушок нерухомого якоря падає через збільшення попиту, через стабілізатор напруги (VR) в котушки обертового поля подається більше струму. Це збільшує магнітне поле навколо котушок поля, що індукуює більшу напругу в котушках якоря. Таким чином вихідна напруга повертається до початкового значення.

Генератори, що використовуються на центральних електростанціях, також контролюють струм поля, щоб регулювати реактивну потужність і допомагати стабілізувати енергосистему від впливу миттєвих збоїв. У більшості випадків застосовуються трифазні генератори, тобто є три комплекти обмоток статора, фізично зміщених так, що обертове магнітне поле створює трифазний струм, зміщений на одну третину періоду один відносно одного.

**Класифікація генераторів змінного струму.** Генератори можуть бути класифіковані за способом збудження, кількістю фаз, типом обертання, способом охолодження та їх застосуванням.

*За збудженням.* Існує два основних способи створення магнітного поля, що використовується в генераторах змінного струму, за допомогою постійних магнітів, які створюють власне стійке магнітне поле, або за допомогою котушок поля. Генератори, в яких використовуються постійні магніти, називаються магнетами.

У інших генераторах змінного струму котушки поля змотування утворюють електромагніт для створення обертового магнітного поля.

Пристрій, який використовує постійні магніти для виробництва змінного струму, називається генератором змінного струму з постійними магнітами (РМА). Генератор постійних магнітів (ПМГ) може виробляти або змінний, або постійний струм, якщо він має комутатор.

*Генератор постійного струму з прямим підключенням.* Цей спосіб збудження складається з меншого генератора постійного струму (DC), закріпленого на одному валу з генератором змінного струму. Генератор постійного струму генерує невелику кількість електроенергії, достатню для того, щоб збудити котушки поля підключеного генератора змінного струму для вироблення

електроенергії. Різновидом цієї системи є тип генератора змінного струму, який використовує постійний струм від батареї для початкового збудження під час запуску, після чого генератор перетворюється на самозбудження.

*Перетворення і випрямлення.* Цей метод залежить від залишкового магнетизму, що зберігається в залізному сердечнику, щоб створити слабе магнітне поле, яке дозволило б створити слабку напругу. Ця напруга використовується для збудження котушок поля для генератора, щоб генерувати сильнішу напругу як частину процесу його нарощування. Після початкового збільшення напруги змінного струму в поле подається випрямлена напруга від генератора змінного струму.

*Безщіткові генератори.* Безщітковий генератор складається з двох генераторів, вбудованих кінець в кінець на одному валу. До 1966 року в генераторах використовувалися щітки з обертовим полем.[20] З розвитком напівпровідникових технологій можливі безщіткові генератори. Менші безщіткові генератори змінного струму можуть виглядати як один блок, але дві частини легко розпізнати на великих версіях. Більша з двох секцій є основним генератором змінного струму, а менша — збудником. Збудник має нерухомі котушки поля і обертовий якорь (силові котушки). В основному генераторі використовується протилежна конфігурація з обертовим полем і нерухомим якорем. На роторі встановлений мостовий випрямляч, який називається обертовим випрямним вузлом. Не використовуються ні щітки, ні контактні кільця, що зменшує кількість деталей, що зношуються. Головний генератор змінного струму має обертове поле, як описано вище, і нерухомий якорь (обмотки генерування електроенергії).

Змінюючи величину струму через котушки поля нерухомого збудника, змінюється 3-фазний вихід збудника. Цей вихід випрямляється випрямлячем, що обертається, встановленим на роторі, і результируючий постійний струм живить обертове поле основного генератора, а отже, і вихід генератора. Результатом усього цього є те, що невеликий постійний струм збудника опосередковано контролює вихід основного генератора змінного струму.[21]

*За кількістю фаз.* Ще один спосіб класифікації генераторів змінного струму - за кількістю фаз їх вихідної напруги. Вихід може бути однофазним або багатофазним. Найпоширенішими є трифазні генератори, але багатофазні можуть бути двофазними, шестифазними або більше.

*За видом обертової частини.* Обертовою частиною генераторів може бути якір або магнітне поле. Поворотний тип якоря має якор, намотаний на ротор, де обмотка рухається через нерухоме магнітне поле. Тип револьверної арматури використовується нечасто. Тип обертового поля має магнітне поле на роторі для обертання через нерухому обмотку якоря. Перевага полягає в тому, що тоді ланцюг ротора несе набагато меншу потужність, ніж ланцюг якоря, що робить з'єднання контактних кілець меншими і менш дорогими; Для ротора постійного струму потрібні лише два контакти, тоді як часто обмотка ротора має три фази та кілька секцій, кожна з яких потребує контактного з'єднання.

Стационарну арматуру можна намотувати на будь-який зручний рівень середньої напруги, до десятків тисяч вольт; виготовлення контактних кілець напругою понад кілька тисяч вольт є дорогим і незручним.

**Методи охолодження.** Багато генераторів змінного струму охолоджуються навколишнім повітрям, яке проштовхується через корпус за допомогою приєднаного вентилятора на тому ж валу, який приводить в рух генератор. У транспортних засобах, таких як транзитні автобуси, великий попит на електричну систему може вимагати масляного охолодження великого генератора змінного струму. У морському застосуванні також використовується водяне охолодження. Дорогі автомобілі можуть використовувати генератори з водяним охолодженням для задоволення високих вимог до електричної системи.

**Індукційний генератор.** Асинхронні двигуни змінного струму можна використовувати як генератори, перетворюючи механічну енергію в електричний струм. Індукційні генератори працюють, механічно обертаючи свій ротор швидше, ніж синхронна швидкість, що дає негативне ковзання. Звичайний асинхронний двигун змінного струму зазвичай може використовуватися як генератор без будь-яких внутрішніх змін. Індукційні генератори корисні в таких сферах застосування, як міні-гідроелектростанції, вітрові турбіни, або для зменшення потоків газу високого тиску до зниження тиску, оскільки вони можуть відновлювати енергію за допомогою відносно простого управління. Вони не потребують схеми збуджувача, оскільки обертове магнітне поле забезпечується індукцією від ланцюга статора. Вони також не потребують обладнання регулятора швидкості, оскільки вони по суті працюють на частоті підключеної мережі.

Для роботи індукційний генератор повинен бути збуджений провідною напругою; зазвичай це робиться шляхом підключення до електричної мережі, або іноді вони самозбуджуються за допомогою фазокоригувальних конденсаторів.

**Лінійний електричний генератор.** У найпростішій формі лінійного електричного генератора ковзний магніт рухається вперед-назад через соленоїд-катушку з мідного дроту. Змінний струм індукується в петлях дроту за законом індукції Фарадея щоразу, коли магніт просувається. Цей тип генератора використовується у ліхтарі Фарадея. У схемах потужності хвиль використовуються більші лінійні генератори електроенергії.

**Генератори зі змінною швидкістю на постійній частоті.** Багато зусиль із відновлюваної енергії намагаються збирати природні джерела механічної енергії (вітер, припливи та відпливи тощо) для виробництва електроенергії. Оскільки ці джерела коливаються в поданій потужності, стандартні генератори, що використовують постійні магніти та нерухомі обмотки, забезпечуватимуть нерегульовану напругу та частоту. Накладні витрати на регулювання (до генератора через редуктор або після генерації електричним шляхом) є великими пропорційно доступній природній енергії.

Нові конструкції генераторів, такі як асинхронний або індукційний генератор з одноразовим живленням, генератор з подвійним живленням або безщітковий намотаний ротор з двосторонньою подачею, мають успіх у застосуваннях зі змінною швидкістю на постійній частоті, таких як вітрогенератори або інші технології



відновлюваної енергії. Таким чином, ці системи пропонують переваги вартості, надійності та ефективності у певних випадках використання.

### Поширені випадки використання електричних генераторів

**Електростанція.** Електростанція або генеруюча станція є промисловим об'єктом для виробництва електроенергії. Більшість електростанцій містять один або кілька генераторів-обертову машину, яка перетворює механічну потужність на трифазну. Відносний рух між магнітним полем і провідником створює електричний струм. Джерела енергії, що приводить у рух генератор, дуже різноманітні. Більшість електростанцій у світі для виробництва електроенергії спалюють викопне паливо, таке як вугілля, нафту та природний газ. Чистіші джерела включають ядерну енергію та все більше використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, хвильова та гідроелектростанція.



*Гідроелектростанція на греблі Глен -Каньйон, Пейдж, Арізона*

**Автомобільні генератори.** Автомобілі потребують електричної енергії для живлення своїх приладів, підтримки роботи самого двигуна та зарядки акумуляторів. Приблизно до 1960 -х років автотранспортні засоби, як правило, використовували генератори постійного струму (динамо) з електромеханічними регуляторами. Слідуючи історичній тенденції вище, і з багатьох тих самих причин, зараз їх замінили генератори змінного струму зі вбудованими випрямними схемами.

**Велосипеди.** Для живлення ходових вогнів та іншого обладнання велосипедів потрібна енергія. Існують два поширених типи генераторів, які використовуються на велосипедах: динамо-пляшки, які за необхідності зачіпають шину велосипеда, та динамо-концентратори, які безпосередньо кріпляться до приводу

велосипеда. Назва загальноприйнята, оскільки це невеликі генератори з постійним магнітом, а не машини самозбудження постійного струму, як динамо. Деякі електричні велосипеди здатні до регенеративного гальмування, коли приводний двигун використовується як генератор для відновлення деякої енергії під час гальмування.

**Вітрильни́ки.** Вітрильні човни можуть використовувати водяний або вітровий генератор для струменевого заряду акумуляторів. Невеликий гвинт, вітрогенератор або робоче колесо приєднано до генератора малої потужності для подачі струмів на типовій швидкості вітру або крейсерській швидкості.

**Електричні самокати.** Електричні скутери з регенеративним гальмуванням стали популярними у всьому світі. Інженери використовують системи рекуперації кінетичної енергії на скутері, щоб зменшити споживання енергії та збільшити її діапазон до 40-60%, просто відновлюючи енергію за допомогою магнітного гальма, яке виробляє електричну енергію для подальшого використання. Сучасні транспортні засоби розвивають швидкість до 25-30 км/год і можуть проїхати до 35-40 км.

**Двигун-генератор.** Двигун-генератор — це поєднання двигуна (первинного двигуна) та електричного генератора, змонтованих разом, щоб утворити єдину частину автономного обладнання. Двигуни, які зазвичай використовуються, це поршневі, але також можна використовувати газові турбіни, і навіть існують гібридні дизельно-газові агрегати, які називаються двопаливними агрегатами. Доступно багато різних версій генераторів двигунів - починаючи від дуже маленьких портативних бензинових наборів і закінчуючи великими турбінними установками. Основною перевагою двигунів-генераторів є можливість самостійного постачання електроенергії, що дозволяє агрегатам виконувати функцію резервного живлення.

**Вимірювання швидкості обертання.** Тахогенератор — це електро-механічний пристрій, який видає вихідну напругу, пропорційну частоті обертання на валу. Його можна використовувати для індикатора швидкості або в системі управління швидкістю зворотного зв'язку. Тахогенератори часто використовуються для живлення тахометрів для вимірювання швидкості електродвигунів, двигунів та обладнання, яке вони живлять. Генератори генерують напругу, приблизно пропорційну швидкості обертання валу. Завдяки точній конструкції та проектуванню можна створити генератори для отримання дуже точної напруги для певних діапазонів частот обертання валу.

### Електричний двигун

Електродвигун — це електрична машина, яка перетворює електричну енергію в механічну. Більшість електродвигунів працює через взаємодію між магнітним полем двигуна та електричним струмом в обмотці, щоб генерувати силу у вигляді крутного моменту, прикладеного до валу двигуна. Електродвигуни можуть жити від джерел постійного струму (наприклад, від акумуляторів або випрямлячів), або від джерел змінного струму (змінного струму), таких як електромережа, інвертори або електричні генератори. Електричний генератор механічно ідентичний електродвигуну, але працює із зворотним потоком потужності, перетворюючи механічну енергію в електричну.

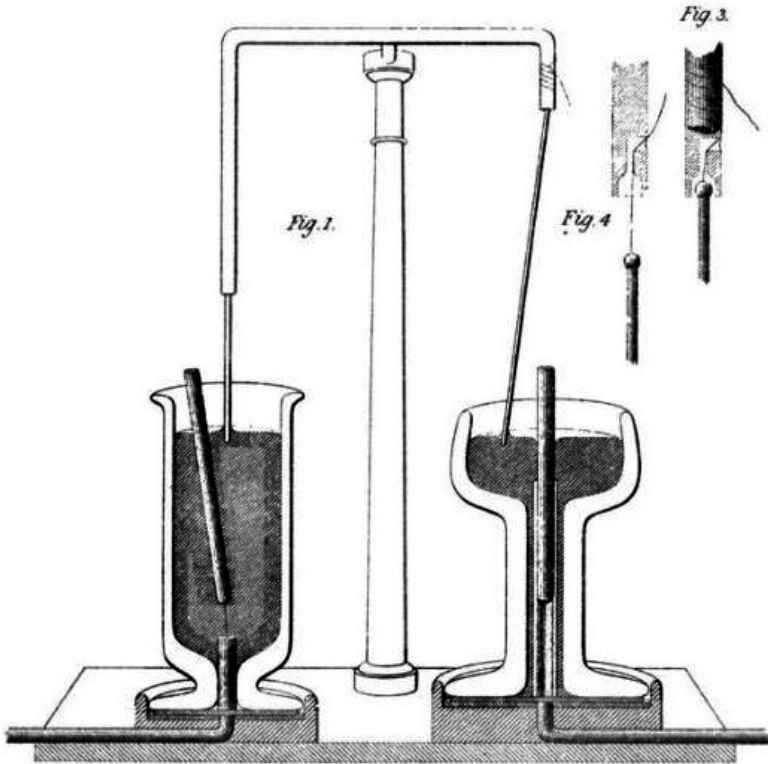
Електродвигуни можна класифікувати за такими міркуваннями, як тип джерела живлення, внутрішня конструкція, застосування та тип виходу руху. Окрім типів постійного чи змінного струму, двигуни можуть бути шітковими або безщітковими, можуть мати різну фазу (однофазну, двофазну або трифазну), а також з повітряним або рідинним охолодженням. Двигуни загального призначення зі стандартними розмірами та характеристиками забезпечують зручну механічну потужність для промислового використання. Найбільші електродвигуни використовуються для суден, створення тиску у трубопроводах, як рушійна сила насосів, потужність яких досягає 100 мегават. Електродвигуни зустрічаються у промислових вентиляторах, повітрорудках та насосах, верстатах, побутовій техніці, електроінструменті та дисководах. В електричних годинниках можна знайти невеликі двигуни. У деяких сферах застосування, таких як регенеративне гальмування з тяговими двигунами, електродвигуни можна використовувати у зворотному напрямку як генератори для відновлення енергії, яка в іншому випадку може бути втрачена у результаті тепла та тертя.

Електродвигуни створюють лінійну силу або обертовий момент (крутний момент), призначену для приведення в дію якогось зовнішнього механізму. Електродвигун, як правило, призначений для безперервного обертання або для лінійного переміщення на значну відстань у порівнянні з його розміром. Магнітні соленоїди також є перетворювачами, які перетворюють електричну енергію на механічний рух, але можуть виробляти рух лише на обмеженій відстані.

Електродвигуни набагато ефективніші за інші двигуни внутрішнього згоряння, що застосовуються у промисловості та на транспорті; Електричні двигуни, як правило, коефіцієнт корисної дії більш ніж 95%, тоді як у двигунів внутрішнього згоряння він значно нижче 50%. Вони також легкі, фізично менші, механічно простіші та дешевші у виготовленні, можуть забезпечувати миттєвий і постійний крутний момент на будь-якій швидкості, можуть працювати на електриці, що виробляється відновлюваними джерелами, і не викидають вуглець в атмосферу. З цих причин електродвигуни замінюють систему внутрішнього згоряння в транспорті та промисловості, хоча їх використання в транспортних засобах наразі обмежене високою вартістю та масою акумуляторів, що може забезпечити достатній діапазон між зарядами.

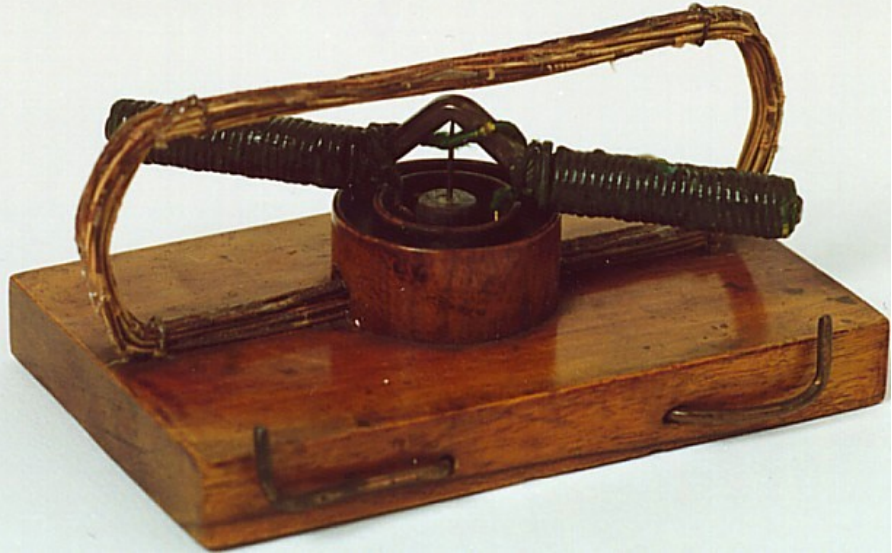
### Історія

**Ранні двигуни.** До сучасних електромагнітних двигунів досліджувались експериментальні двигуни, які працювали під дією електростатичної сили. Перші електродвигуни були простими електростатичними пристроями, описаними в експериментах шотландського ченця Ендрю Гордона та американського експериментатора Бенджаміна Франкліна в 1740-х роках.



*Електромагнітний експеримент Фарадея, 1821 р.*

Теоретичний принцип, що стоїть за ними, закон Кулона, був відкритий, але не опублікований, Генрі Кавендішем у 1771 р. Цей закон був незалежно відкритий Шарлем-Августином де Кулоном у 1785 р., який опублікував його так, що він тепер відомий під його ім'ям. Через труднощі створення необхідної високої напруги електростатичні двигуни ніколи не використовувалися в практичних цілях.



*"Електромагнітний авторотор" Джедліка, 1827 (Музей прикладного мистецтва, Будапешт). Історичний мотор працює і сьогодні бездоганно.*

Винахід електрохімічної батареї Алессандро Вольта в 1799 р. зробив можливим виробництво постійних електричних струмів. Ганс Крістіан Ерстед відкрив у 1820 році, що електричний струм створює магнітне поле, яке може чинити силу на магніт. Андре-Марі Ампер пройшло лише кілька тижнів, щоб розробити першу формулу електромагнітної взаємодії та представити закон сили Ампера, який описував виробництво механічної сили взаємодією електричного струму та магнітного поля. Першу демонстрацію ефекту з обертальним рухом дав Майкл Фарадей у 1821 р. Вільно висячий дріт був занурений у басейн з ртуттю, на якому був розміщений постійний магніт. Коли через провід пропускав струм, провід обертася навколо магніту, показуючи, що струм викликав близьке кругове магнітне поле навколо дроту. Цей двигун часто демонструють у фізичних експериментах, замінюючи розсіл (токсичною) ртуттю. Колесо Барлоу було першим вдосконаленням цієї демонстрації Фарадея, хоча ці та подібні гомополярні двигуни залишалися непридатними для практичного застосування до кінця століття.

У 1827 році угорський фізик Аньош Джедлік почав експериментувати з електромагнітними котушками. Після того, як Джедлік вирішив технічні проблеми безперервного обертання винаходом комутатора, він назвав свої ранні пристрої "електромагнітними самороторами". Хоча вони використовувалися лише для навчання, в 1828 році Джедлік продемонстрував перший пристрій, який містив три основні компоненти практичних двигунів постійного струму: статор, ротор та комутатор. Пристрій не використовував постійних магнітів, оскільки магнітні поля як нерухомих, так і обертючих компонентів створювалися виключно струмами, що протікали через їх обмотки.



*Електродвигун, подарований Кельвіну Джеймсом Джоулем у 1842 р., Хунтеріанський музей, Глазго*

### Двигуни постійного струму

*Двигун постійного струму (DC motor)* — це будь-який з класу обертових електродвигунів, який перетворює електричну енергію постійного струму в механічну енергію. Найпоширеніші типи покладаються на сили, створювані магнітними полями. Майже всі типи двигунів постійного струму мають внутрішній механізм, або електромеханічний, або електронний, для періодичної зміни напрямку струму в частині двигуна.

Двигуни постійного струму були першою формою двигунів, які широко використовувалися, оскільки вони могли живитися від існуючих систем розподілу електроенергії для освітлення постійного струму. Швидкістю двигуна постійного струму можна керувати в широкому діапазоні, використовуючи змінну напругу живлення або змінюючи силу струму в його обмотках збудження. Невеликі двигуни постійного струму використовуються в інструментах, іграшках та приладах. Універсальний двигун може працювати на постійному струмі, але це легкий щітковий двигун, який використовується для портативних електроінструментів та приладів. Більші двигуни постійного струму в даний час використовуються в приводі електромобілів, ліфтів і підійомників, а також у приводах сталевих прокатних станів. Поява силової електроніки зробила заміну двигунів постійного струму двигунами змінного струму можливою в багатьох сферах застосування.

Перший комутаторний електродвигун постійного струму, здатний обертати машини, був винайдений британським ученим Вільямом Стердженом (*William Sturgeon*) у 1832 р. Після роботи Стерджона американський винахідник Томас

Девенпорт (*Thomas Davenport*) та його дружина Емілі Девенпорт () створили електродвигун постійного струму комутаційного типу, який він запатентував у 1837 р. Мотори працювали зі швидкістю до 600 обертів на хвилину, інструменти та друкарський верстат. Через високу вартість первинної батареї двигуни були комерційно невдалими і Девенпорти збанкрутували. Кілька винахідників слідували Sturgeon у розробці двигунів постійного струму, але всі стикалися з тими ж проблемами вартості акумулятора. Оскільки в той час не існувало системи розподілу електроенергії, для цих двигунів не виникло практичного комерційного ринку.

Після багатьох інших більш-менш успішних спроб із відносно слабким обертовим та зворотно-поступальним апаратом прусський/росіянин Моріц фон Якобі створив перший справжній обертовий електродвигун у травні 1834 р. Він розвинув чудову механічну вихідну потужність. Його двигун встановив світовий рекорд, який Якобі поліпшив через чотири роки, у вересні 1838 р. Його другий двигун був достатньо потужним, щоб переправити човен з 14 людьми через широку річку. Також у 1839/40 роках іншим розробником вдалося побудувати двигуни з подібними, а потім і більш високими характеристиками.

У 1855 році Джедлік побудував пристрій, що використовує принципи, подібні до тих, що використовувалися у його електромагнітних автороторах, який був здатний корисно працювати. Того ж року він побудував модель електромобіля [21].

Великий поворотний момент припав на 1864 рік, коли Антоніо Пачінотті вперше описав кільцеву обмотку (хоча спочатку задумана в генераторі постійного струму, тобто динамо). Це представлені симетрично згруповані котушки, закриті на собі і з'єднані з брусками комутатора, щітки яких подавали практично неперемінний струм. Перші комерційно успішні двигуни постійного струму слідували за розвитком Зенобе Грамме, який у 1871 році заново винайшов конструкцію Пачінотті та прийняв деякі рішення Вернера Сіменса.

Користь для машин постійного струму принесла відкриття оборотності електричної машини, яке було оголошено компанією Siemens у 1867 р. і яке спостерігалося Пачінотті у 1869 р. Грамм випадково продемонстрував це з нагоди Всесвітньої виставки у Відні 1873 року, коли він підключив два таких пристрої постійного струму на відстані до 2 км один від одного, використовуючи один з них як генератор, а інший як двигун.

Барабанний ротор був представлений Фрідріхом фон Хефнером-Альтенеком з Siemens & Halske для заміни кільцевої обмотки Пачінотті в 1872 р., Таким чином покращивши ефективність машини. Ламінований ротор був представлений компанією Siemens & Halske наступного року, що дозволило зменшити втрати заліза та збільшити індуквану напругу. У 1880 році Йонас Венстрем надав ротору прорізи для розміщення обмотки, що ще більше підвищило ефективність.

У 1886 р. Френк Джуліан Спраг (*Frank Julian Sprague*) винайшов перший практичний двигун постійного струму — неіскровий пристрій, який підтримував відносно постійну швидкість при змінних навантаженнях. Інші винаходи компанії Sprague в цей час значно покращили розподіл електромережі (попередня робота, виконана Томасом Едісоном), дозволили повернути електроенергію до електромережі, забезпечити розподіл електроенергії до візків за допомогою повітряних проводів та стовпа візка, та забезпечили системи управління електричними

операціями. Це дозволило Sprague використати електродвигуни, щоб винайти першу систему електричних візків у 1887–1888 роках у Річмонді, штат Вірджинія, електричний ліфт та систему управління в 1892 році, а також електричний метрополітен з вагонами з центральним управлінням, що працюють незалежно. Остро-політен був вперше встановлений в 1892 році в Чикаго на підйомній залізниці Південної сторони, де він став популярним під назвою "L". Мотор Sprague та пов'язані з ним винаходи призвели до вибуху інтересу та використання в електродвигунах для промисловості. Розвиток електродвигунів з прийнятною ефективністю затримувався на кілька десятиліть через невміння визнати надзвичайну важливість повітряного зазору між ротором і статором. Ефективні конструкції мають порівняно невеликий повітряний зазор. Двигун Сент-Луїса, який здавна використовується в класах для ілюстрування моторних принципів, надзвичайно неефективний з тієї ж причини, і не виглядає нічим подібним до сучасного двигуна.

Електродвигуни зробили революцію в промисловості. Промислові процеси більше не обмежувалися передачею електроенергії за допомогою валів, ременів, стисненого повітря або гідравлічного тиску. Натомість кожна машина може бути обладнана власним джерелом живлення, що забезпечує легке управління на місці використання та покращує ефективність передачі електроенергії. Електродвигуни, що застосовуються в сільському господарстві, виключали силу м'язів людини і тварин від таких завдань, як обробка зерна або перекачування води. Побутове використання (наприклад, у пральних машинах, посудомийних машинах, вентиляторах, кондиціонерах та холодильниках (заміни ящиків для льоду)) електродвигунів зменшило важку працю вдома та зробило більш високі стандарти зручності, комфорту і можлива безпека. Сьогодні електродвигуни споживають більше половини електроенергії, виробленої в США.

**Електромагнітні двигуни.** Простий двигун постійного струму має стаціонарний набір магнітів у статорі та якорі з однією або кількома обмотками ізольованого проводу, обмотаних навколо м'якого залізного сердечника, який концентрує магнітне поле. Кінці обмотки дроту з'єднані з комутатором. Комутатор дозволяє по черзі живити кожну котушку якоря і з'єднує обертові котушки із зовнішнім джерелом живлення через щітки. (Безщіткові двигуни постійного струму мають електроніку, яка вмикає і вимикає постійний струм на кожен котушку, і не мають щіток.)

Послідовність включення або вимикання певної котушки визначає, в якому напрямку спрямовані ефективні електромагнітні поля. Послідовно вмикаючи та вимикаючи котушки, можна створити обертове магнітне поле. Ці обертові магнітні поля взаємодіють з магнітними полями магнітів (постійних або електромагнітів) у нерухомій частині двигуна (статора), створюючи крутний момент на якорі, який змушує його обертатися. У деяких конструкціях двигунів постійного струму поля статора використовують електромагніти для створення своїх магнітних полів, що дозволяє краще контролювати двигун.

При високих рівнях потужності двигуни постійного струму майже завжди охолоджуються за допомогою примусового повітря.

Різна кількість полів статора та якоря, а також спосіб їх з'єднання забезпечують різні характеристики регулювання швидкості та крутного моменту.



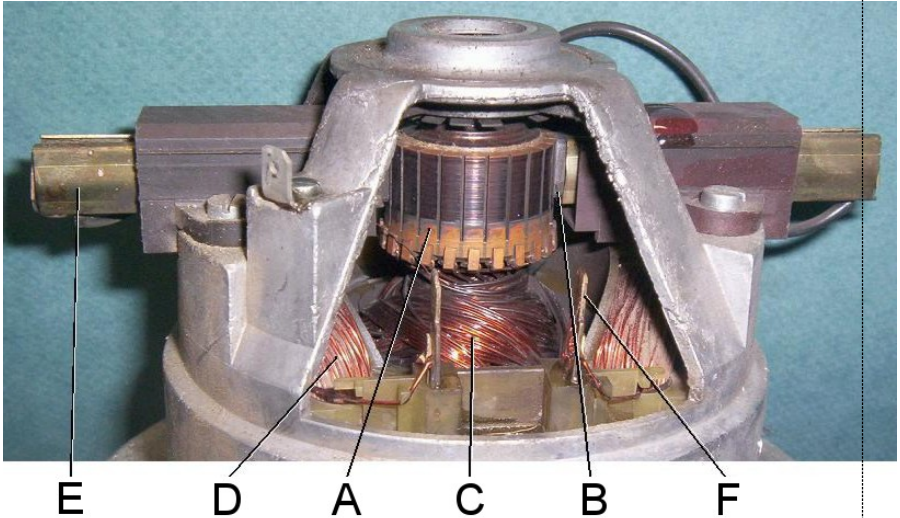
Швидкістю двигуна постійного струму можна керувати зміною напруги, що подається на якір. Змінний опір у колі якоря або в електромагніті дозволяє регулювати швидкість. Сучасні двигуни постійного струму часто керуються системами силової електроніки, які регулюють напругу, «розбиваючи» постійний струм на цикли включення та вимкнення, які мають ефективну нижчу напругу.

Оскільки двигун постійного струму з послідовною обмоткою розвиває найвищий крутний момент на низькій швидкості, він часто використовується в тягових установках, таких як електровози та трамваї. Двигун постійного струму був основою електричних тягових приводів як на електричних, так і на дизель-електричних локомотивах, трамваях, тролейбусах і дизель-електричних бурових установках протягом багатьох років. Впровадження двигунів постійного струму та системи електричної мережі для роботи машин, починаючи з 1870-х років, почало нову другу промислову революцію. Двигуни постійного струму можуть працювати безпосередньо від акумуляторних батарей, забезпечуючи енергію для перших електромобілів і сучасних гібридних автомобілів і електромобілів, а також керуючи безліччю акумуляторних інструментів. Сьогодні двигуни постійного струму все ще зустрічаються в таких малих пристроях, як іграшки та дисководи, або у великих розмірах для роботи сталевих прокатних станів і паперобробних машин. Великі двигуни постійного струму з роздільними збудженими полями, як правило, використовувалися з приводами моталки для шахтних підйомників, для високого крутного моменту, а також плавного регулювання швидкості за допомогою тиристорних приводів. Зараз вони замінені великими двигунами змінного струму з приводами змінної частоти.

Якщо до двигуна постійного струму подається зовнішня механічна сила, він діє як генератор постійного струму, динамо. Ця функція використовується для уповільнення та підзарядки батарей на гібридних автомобілях та електромобілях або для повернення електроенергії в електричну мережу, яка використовується в трамваї або електропоїзді, коли вони сповільнюються. Цей процес називається *рекуперативним гальмуванням* на гібридних та електромобілях. У дизельних електровозах вони також використовують свої двигуни постійного струму як генератори, щоб уповільнити, але розсіювати енергію в резисторних комплектах.

**Щітковий електродвигун постійного струму.** *Щітковий електродвигун постійного струму* — це електродвигун з внутрішньою комутацією, призначений для роботи від джерела живлення постійного струму.

*Щітковий комутатор.* У щіткових двигунах це робиться за допомогою поворотного перемикача на валу двигуна, який називається комутатором. Він складається з обертового циліндра, розділеного на кілька металевих контактних сегментів на роторі.



*Комутатор в універсальному двигуні від пилососа. Частини: (А) комутатор, (В) щітка, (С) обмотки ротора (якір), (D) обмотки статора (поля), (Е) напрямні щітки, (F) електричні з'єднання.*

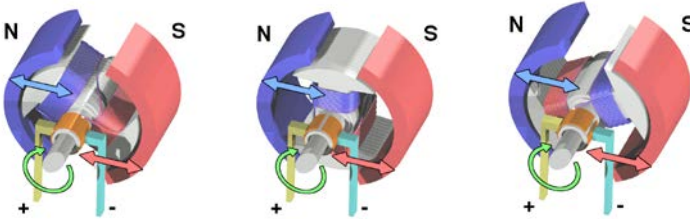
Сегменти з'єднані з обмотками провідників на роторі. Два або більше нерухомих контакту, які називаються **щітками**, виготовлені з м'якого провідника, наприклад графіту, притискаються до комутатора, створюючи ковзний електричний контакт з послідовними сегментами під час обертання ротора. Щітки вибірково подають електричний струм на обмотки. Коли ротор обертається, комутатор вибирає різні обмотки, і спрямований струм прикладається до даної обмотки таким чином, що магнітне поле ротора залишається несумісним зі статором і створює крутний момент в одному напрямку.

*Недоліки комутатора.* У комутатора є недоліки, які призвели до зниження використання щіткових двигунів:

- Тертя щіток, що ковзають уздовж обертових колекторних сегментів, спричиняє втрати потужності, які можуть бути значними в двигуні малої потужності.
- М'який матеріал щітки зношується через тертя, утворюючи пил, і в кінцевому підсумку щітки необхідно замінити. Це робить комутовані двигуни непридатними для застосування з низьким вмістом твердих частинок або герметичних пристроїв, таких як двигуни жорстких дисків, а також для додатків, які потребують експлуатації без технічного обслуговування.
- Електричний опір ковзного контакту щітки викликає падіння напруги в ланцюзі двигуна, яке називається падінням щітки, яке споживає енергію.
- Багаторазове різке перемикання струму через індуктивність обмоток викликає іскри на контактах комутатора, що є небезпекою пожежі у вибухонебезпечних середовищах і джерелом електронних шумів, які можуть викликати електромагнітні перешкоди в сусідніх мікроелектронних ланцюгах.

Протягом останніх ста років потужні щіткові двигуни постійного струму, які колись були основою промисловості, були замінені синхронними двигунами змінного струму (АС). Сьогодні щіткові двигуни використовуються лише в пристроях малої потужності або там, де доступний лише постійний струм, але вищезгадані недоліки обмежують їх використання навіть у цих пристроях.

Щіткові двигуни були першим комерційно важливим застосуванням електричної енергії для приводу механічної енергії, а системи розподілу постійного струму використовувалися більше 100 років для роботи двигунів у комерційних і промислових будівлях. Швидкість щіткових двигунів постійного струму можна змінювати, змінюючи робочу напругу або інтенсивність магнітного поля.



*Простий електродвигун постійного струму.*

Залежно від підключення поля до джерела живлення, характеристики швидкості та крутного моменту щіткового двигуна можуть бути змінені, щоб забезпечити стабільну швидкість або швидкість, обернено пропорційну механічному навантаженню. Щіткові двигуни продовжують використовуватися для електричних двигунів, кранів, папероробних машин і сталепрокатних станів. Оскільки щітки зношуються та потребують заміни, безщіткові двигуни постійного струму, які використовують силові електронні пристрої, витіснили щіткові двигуни з багатьох застосувань.

**Безщітковий електродвигун постійного струму.** *Безщітковий електродвигун постійного струму (brushless DC electric motor)*, також відомий як *електродвигун з електронною комутацією (electronically commutated motor)* або синхронний двигун постійного струму, є двигуном, який використовує джерело живлення постійного струму (DC). Він використовує електронний контролер із замкненим контуром для перемикання постійних струмів на обмотки двигуна, створюючи магнітні поля, які ефективно обертаються в просторі і за якими слідує ротор з постійними магнітами. Контролер регулює фазу і амплітуду імпульсів постійного струму, щоб контролювати швидкість і крутний момент двигуна. Ця система управління є альтернативою механічному комутатору (щітці), що використовується в багатьох звичайних електродвигунах.

Конструкція системи безщіткового двигуна, як правило, подібна до синхронного двигуна з постійними магнітами (*permanent magnet synchronous motor*), але також може бути двигуном із перемиканням реактивності або асинхронним двигуном. Вони також можуть використовувати неодимові магніти і бути зовнішнім (статор оточений ротором), внутрішніми (ротор оточений статором) або осьовими (ротор і статор плоскі і паралельні).

Перевагами безщіткового двигуна перед щітковими є високе співвідношення потужності та ваги, висока швидкість, майже миттєвий контроль швидкості (об/хв) і крутного моменту, висока ефективність і низький рівень обслуговування. Безщіткові двигуни знаходять застосування в таких місцях, як комп'ютерні периферійні пристрої (дисківоди, принтери), ручні електроінструменти та транспортні засоби, починаючи від літаків і закінчуючи автомобілями. У сучасних пральних машинах безщіткові двигуни постійного струму дозволили замінити гумові ремені і коробки передач на конструкцію з прямим приводом.

Щіткові двигуни постійного струму були винайдені в 19 столітті і досі поширені. Безщіткові двигуни постійного струму стали можливими завдяки розвитку твердотільної електроніки в 1960-х роках.

Безщітковий електричний двигун розвиває крутний момент, зберігаючи магнітні поля ротора (обертової частини машини) і статора (фіксованої частини машини) зміщеними один відносно другого. Один або обидва комплекти магнітів є електромагнітами, виготовленими з котушки провідника, намотаної навколо залізного сердечника. Постійний струм, що проходить через обмотку, створює магнітне поле, забезпечуючи живлення двигуна. Зміщення створює крутний момент, який намагається вирівняти поля. Коли ротор рухається, і поля вирівнюються, необхідно переміщати або поле ротора, або поле статора, щоб підтримувати зміщення і продовжувати генерувати крутний момент і рух. Пристрій, який переміщує поля в залежності від положення ротора, називається комутатором.

*Безщіткова комутація.* У безщіткових двигунах постійного струму електронна система комутації замінює контакти механічного комутатора, який має істотні недоліки. Електронний датчик виявляє кут нахилу ротора та керує напівпровідниковими перемикачами, такими як транзистори, які перемикають струм через обмотки, або змінюючи напрямок струму, або, в деяких двигунах, вимикаючи його, під правильним кутом, щоб електромагніти створювали крутний момент в одному напрямку. Усунення ковзного контакту дає змогу безщітковим двигунам мати менше тертя і довший термін служби; їх термін служби обмежений лише терміном служби їх підшипників.

Щіткові двигуни постійного струму розвивають максимальний крутний момент у нерухомому стані, який лінійно зменшується зі збільшенням швидкості. Деякі обмеження щіткових двигунів можна подолати за допомогою безщіткових двигунів; вони включають більш високу ефективність і меншу схильність до механічного зносу. Ці переваги досягаються ціною потенційно менш міцної, складнішої та дорожчої електроніки керування.

Типовий безщітковий двигун має постійні магніти, які обертаються навколо нерухомого якоря, усуваючи проблеми, пов'язані з підключенням струму до рухомого якоря. Електронний контролер замінює вузол колектора щіткового двигуна постійного струму, який постійно перемикає фазу на обмотки, щоб підтримувати обертання двигуна. Контролер виконує подібне розподілення потужності з часом, використовуючи твердотільний пристрій, а не комутаційну систему.

Безщіткові двигуни мають ряд переваг перед щітковими двигунами постійного струму, включаючи високе відношення крутного моменту до ваги, підвищену ефективність, створюючи більший крутний момент на ват, підвищену надійність,

зниження шуму, більший термін служби за рахунок усунення ерозії щіток і колекторів, усунення іонізуючих іскор з колектора і загальне зниження електромагнітних перешкод. Без обмоток на роторі вони не піддаються впливу відцентрових сил, а оскільки обмотки спіраються на корпус, їх можна охолоджувати за допомогою провідності, не вимагаючи для охолодження повітряного потоку всередині двигуна. Це, у свою чергу, означає, що внутрішні частини двигуна можуть бути повністю закриті та захищені від бруду та інших сторонніх предметів.

Безщіткова комутація двигуна може бути реалізована програмно, використовуючи мікроконтролер, або може бути реалізована за допомогою аналогових або цифрових схем. Комутація за допомогою електроніки замість щіток забезпечує більшу гнучкість і можливості, недоступні для щіткових двигунів постійного струму, включаючи обмеження швидкості, мікрокрокову операцію для управління повільним і точним рухом, а також утримуючий момент у нерухомому стані. Програмне забезпечення контролера можна налаштувати до конкретного двигуна, який використовується в пристрої, що призводить до більшої ефективності комутації.

Максимальна потужність, яку можна застосувати до безщіткового двигуна, обмежена майже виключно теплом; занадто велика кількість тепла послаблює магніти та пошкодить ізоляцію обмоток.

При перетворенні електроенергії в механічну безщіткові двигуни є більш ефективними, ніж щіткові двигуни, насамперед через відсутність щіток, що зменшує втрати механічної енергії через тертя. Підвищена ефективність є найбільшою в областях без навантаження та низького навантаження на кривій продуктивності двигуна.

Середовища та вимоги, в яких виробники використовують безщіткові двигуни постійного струму, включають експлуатацію без технічного обслуговування, високі швидкості та роботу, коли іскри є небезпечними (тобто вибухонебезпечні середовища) або можуть вплинути на чутливе до електроніки обладнання.

Конструкція безщіткового двигуна нагадує кроковий двигун, але двигуни мають важливі відмінності через відмінності в реалізації та експлуатації. У той час як крокові двигуни часто зупиняються з ротором у певному кутовому положенні, безщітковий двигун зазвичай призначений для безперервного обертання. Обидва типи двигунів можуть мати датчик положення ротора для внутрішнього зворотного зв'язку. І кроковий двигун, і добре сконструйований безщітковий двигун можуть утримувати кінцевий крутний момент при нульових обертах.

### Двигуни змінного струму

*Двигун змінного струму* - це електродвигун, який приводиться в рух змінним струмом (АС). Двигун змінного струму зазвичай складається з двох основних частин: зовнішнього статора, що має котушки, які живляться змінним струмом для створення обертового магнітного поля, і внутрішнього ротора, прикріпленого до вихідного валу, що створює друге обертове магнітне поле. Магнітне поле ротора може створюватися постійними магнітами, реактивністю або електричними обмотками постійного або змінного струму.

Менш поширені лінійні двигуни змінного струму працюють за тими ж принципами, що й обертові двигуни, але мають їх нерухомі та рухомі частини, розташовані у прямолінійній конфігурації, створюючи лінійний рух замість обертання.

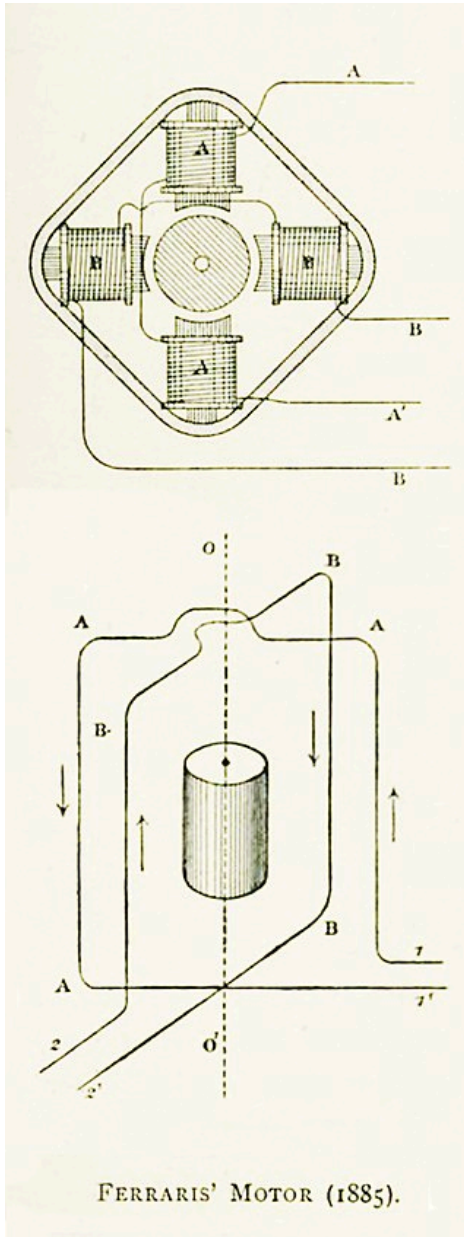
**Принципи роботи.** Два основних типи двигунів змінного струму — це асинхронні двигуни та синхронні двигуни. Асинхронний двигун (або асинхронний двигун) завжди покладається на невелику різницю в швидкості між обертовим магнітним полем статора та швидкістю валу ротора, що називається ковзанням, щоб викликати струм ротора в обмотці змінного струму ротора. В результаті асинхронний двигун не може створювати крутний момент близько синхронної швидкості, коли індукція (або ковзання) не має значення або перестає існувати. На відміну від цього, синхронний двигун не покладається на індукцію ковзання для роботи і використовує або постійні магніти, виступаючі полюси (мають виступаючі магнітні полюси), або обмотку ротора з незалежним збудженням. Синхронний двигун виробляє свій номінальний крутний момент точно на синхронній швидкості. Система синхронного двигуна з подвійним живленням безщіткового ротора має обмотку ротора з незалежним збудженням, яка не покладається на принципи ковзання-індукції струму. Двигун з безщітковим ротором з подвійним живленням є синхронним двигуном, який може функціонувати точно на частоті живлення або на частоті, кратній частоті живлення.

Інші типи двигунів включають вихреструміві двигуни, а також машини з механічною комутацією змінного та постійного струму, в яких швидкість залежить від напруги та підключення обмотки.

**Історія двигунів змінного струму.** Технологія змінного струму була заснована на відкритті Майкла Фарадея та Джозефа Генрі в 1830–1831 роках, що змінне магнітне поле може індукувати електричний струм у ланцюзі. Фарадею зазвичай приписують це відкриття, оскільки він першим опублікував свої висновки.

У 1832 році французький виробник інструментів Іполіт Піксі (*Hippolyte Pixii*) створив грубу форму змінного струму, коли він спроектував і побудував перший генератор змінного струму. Він складався з обертового підковоподібного магніту, що проходить через дві котушки з намотаним дротом.

Через переваги змінного струму в передачі високої напруги на великі відстані, наприкінці 19 століття в Сполучених Штатах та Європі було багато винахідників, які намагалися розробити працездатні двигуни змінного струму. Першою людиною, яка придумала обертове магнітне поле, був Уолтер Бейлі (*Walter Baily*), який 28 червня 1879 року продемонстрував працездатну демонстрацію свого багатофазного двигуна з батарейним живленням за допомогою комутатора для Лондонського фізичного товариства. Описуючи апарат, майже ідентичний апарату Бейлі, французький інженер-електрик Марсель Депре (*Marcel Deprez*) опублікував у 1880 році роботу, в якій визначив принцип обертового магнітного поля та принцип двофазної системи змінного струму для його виробництва. Ніколи практично не продемонстрований, конструкція була хибною, оскільки один з двох струмів був «забезпечений самою машиною».



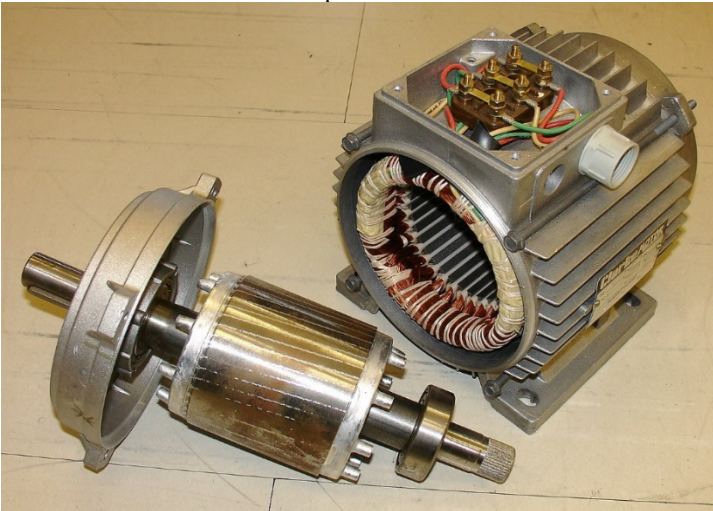
FERRARIS' MOTOR (1885).

*Перший у світі двигун змінного струму італійського фізика Галілео Ферраріса*

У 1886 році англійський інженер Еліху Томсон (*Elihu Thomson*) побудував двигун змінного струму, розширивши принцип індукційного відштовхування та свій ватметр. У 1887 році американський винахідник Чарльз Шенк Бредлі (*Charles Schenk Bradley*) першим запатентував двофазну передачу живлення змінного струму з чогирма проводами.

«Безкоммутаторні» асинхронні двигуни змінного струму, здається, були незалежно винайдені Галілео Феррарісом (*Galileo Ferraris*) і Нікола Тесла (*Nikola Tesla*). Ферраріс продемонстрував робочу модель свого однофазного асинхронного двигуна в 1885 році, а Тесла побудував свій робочий двофазний асинхронний двигун у 1887 році і продемонстрував його в Американському інституті інженерів-електриків у 1888 році. У 1888 році Ферраріс опублікував свої дослідження в Королівській академії наук у Турині, де детально виклав основи роботи двигуна; у тому ж році Тесла отримав патент Сполучених Штатів на свій власний двигун. Виходячи з експериментів Ferrarі, Михайло Доліво-Добровольський у 1890 році представив перший трифазний асинхронний двигун, набагато більш потужну конструкцію, яка стала прототипом, який використовувався в Європі та США. Він також винайшов перший трифазний генератор і трансформатор і об'єднав їх у першу повну трифазну систему змінного струму в 1891 році. Над конструкцією трифазного двигуна також працював швейцарський інженер Чарльз Юджин Ланселот Браун (*Charles Eugene Lancelot Brown*), а інші трифазні системи змінного струму розробили німецький технік Фрідріх Август Хазельвандер (*Friedrich August Haselwander*) та шведський інженер Йонас Венстрьом (*Jonas Wenström*).

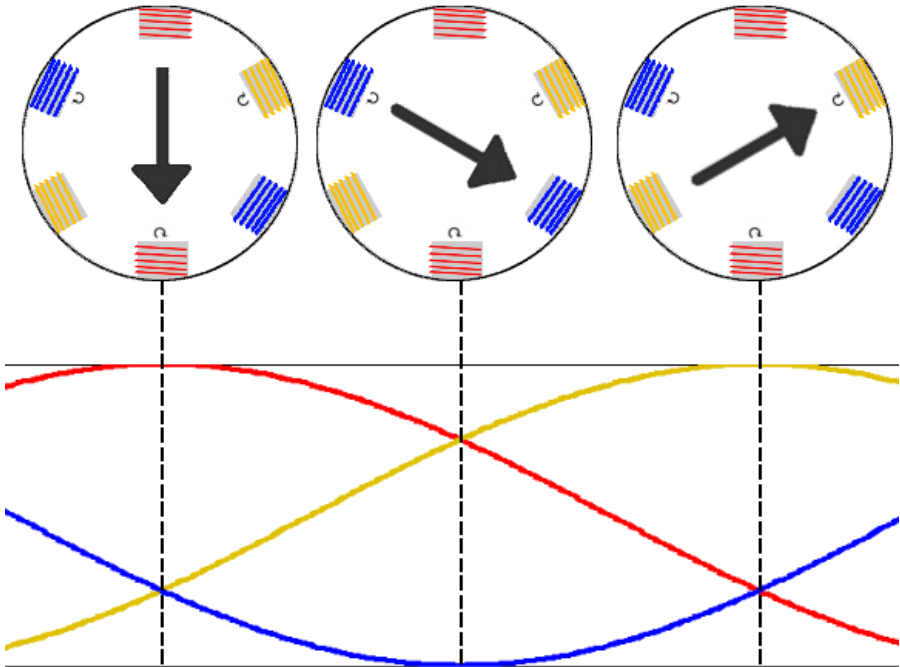
**Асинхронний двигун.** *Асинхронний двигун (induction motor)* — це електродвигун змінного струму, в якому електричний струм в роторі, необхідний для створення крутного моменту, отримується за допомогою електромагнітної індукції від магнітного поля обмотки статора.



Ротор асинхронного електродвигуна (ліворуч) та статор (праворуч)



## Розділ 9



*Трифазний блок живлення забезпечує обертове магнітне поле в асинхронному двигуні*

Таким чином, асинхронний двигун може бути виготовлений без електричних з'єднань з ротором. Ротор асинхронного двигуна може бути типу з обмоткою або короткозамкнутого типу.

Трифазні асинхронні двигуни з короткозамкнутою кліткою широко використовуються як промислові приводи, оскільки вони самозапускаються, надійні та економічні. Однофазні асинхронні двигуни широко використовуються для невеликих навантажень, таких як побутові прилади, вентилятори. Хоча асинхронні двигуни традиційно використовуються в обслуговуванні з фіксованою швидкістю, асинхронні двигуни все частіше використовуються з приводами змінної частоти (VFD) в обслуговуванні зі змінною швидкістю. VFD пропонують особливо важливі можливості для економії енергії для існуючих і перспективних асинхронних двигунів у відцентрових вентиляторах, насосах і компресорах із змінним крутним моментом. Асинхронні двигуни з короткозамкнутою кліткою дуже широко використовуються як у приводах із фіксованою швидкістю, так і з змінною частотою.

*Принцип дії 3 фазного асинхронного двигуна.* Як в асинхронних, так і в синхронних двигунах, потужність змінного струму, що подається на статор двигуна, створює магнітне поле, яке обертається синхронно з коливаннями змінного струму. У той час як ротор синхронного двигуна обертається з тією ж швидкістю, що й поле статора, ротор асинхронного двигуна обертається з дещо меншою швидкістю, ніж поле статора. Таким чином, магнітне поле статора асинхронного

двигуна змінюється або обертається відносно ротора. Це індукує протилежний струм в роторі асинхронного двигуна, по суті, вторинний обмотці двигуна. Обертовий магнітний потік індукує струми в обмотках ротора подібно до струмів, індукованих у вторинній обмотці (обмотках) трансформатора.

Індуковані струми в обмотках ротора, у свою чергу, створюють магнітні поля в роторі, які реагують на поле статора. Напрямок створюваного магнітного поля буде таким, щоб протистояти зміні струму через обмотки ротора, відповідно до закону Ленца. Причиною індукованого струму в обмотках ротора є обертове магнітне поле статора, тому для протидії зміні струмів обмотки ротора ротор почне обертатися в напрямку обертового магнітного поля статора. Ротор прискорюється до тих пір, поки величина наведеного роторного струму і моменту не врівноважить прикладене механічне навантаження на обертання ротора. Оскільки обертання на синхронній швидкості не призведе до відсутності індукованого струму ротора, асинхронний двигун завжди працює трохи повільніше, ніж синхронна швидкість. Різниця між фактичною та синхронною швидкістю коливається приблизно від 0,5% до 5,0% для асинхронних двигунів із кривою крутного моменту стандартної конструкції В. Основна характеристика асинхронного двигуна полягає в тому, що він створюється виключно індукцією, а не окремо збуджується, як у синхронних машинах чи машинах постійного струму, або самомагнічується, як у двигунах з постійними магнітами.

Щоб індукувати роторний струм, швидкість фізичного ротора має бути нижчою, ніж швидкість обертового магнітного поля статора, інакше магнітне поле не рухалося б відносно провідників ротора і не індукувалися б струми. Коли швидкість ротора падає нижче синхронної, швидкість обертання магнітного поля в роторі збільшується, викликаючи більше струму в обмотках і створюючи більший крутний момент. Співвідношення між швидкістю обертання магнітного поля, індукованого в роторі, і швидкістю обертання обертового поля статора називається «ковзанням». Під навантаженням швидкість падає, а ковзання збільшується достатньо, щоб створити достатній крутний момент для повороту вантажу. З цієї причини ці двигуни називають *асинхронними двигунами*.

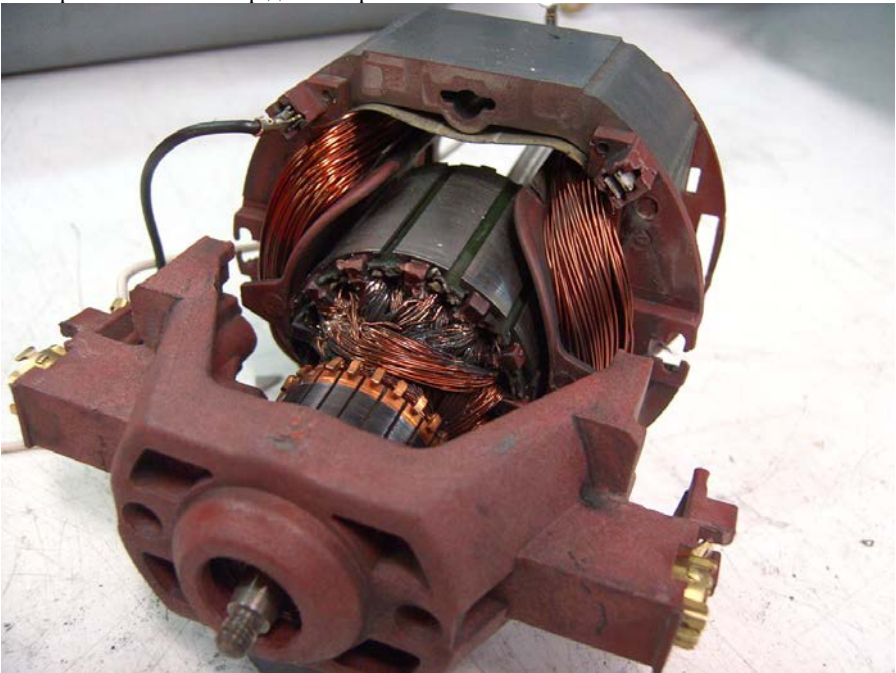
**Синхронний електродвигун.** *Синхронний електродвигун* — це двигун змінного струму, в якому в усталеному стані обертання вала синхронізовано з частотою струму живлення; період обертання в точності дорівнює цілій кількості циклів змінного струму. Синхронні двигуни містять багатофазні електромагніти змінного струму на статорі двигуна, які створюють магнітне поле, яке обертається в часі з коливаннями лінійного струму. Ротор з постійними магнітами або електромагнітами обертається синхронно з полем статора з однаковою швидкістю і в результаті створює друге синхронізоване обертове магнітне поле будь-якого двигуна змінного струму. Синхронний двигун називається подвійним живленням, якщо він забезпечений незалежно збудженими багатофазними електромагнітами змінного струму як на роторі, так і на статорі.

Синхронний двигун та асинхронний двигун є найбільш широко використовуваними типами двигунів змінного струму. Різниця між цими двома типами полягає в тому, що синхронний двигун обертається зі швидкістю, що відповідає частоті мережі, оскільки він не залежить від індукції струму для створення магнітного

поля ротора. Навпаки, асинхронний двигун вимагає ковзання: ротор повинен обертатися трохи повільніше, ніж зміна змінного струму, щоб індукувати струм в обмотці ротора. Малі синхронні двигуни використовуються в пристроях синхронізації, таких як синхронні годинники, таймери в приладах, магнітофони та прецизійні сервомеханізми, в яких двигун повинен працювати з точною швидкістю; точність швидкості — це частота лінії електропередачі, яка ретельно контролюється у великих взаємопов'язаних мережевих системах.

Синхронні двигуни з самозбудженням застосовуються в діапазоні від потужності одиниць ват до значної потужності промислових розмірів. У діапазоні малих потужностей більшість синхронних двигунів використовуються там, де потрібна точна постійна швидкість. Ці машини зазвичай використовуються в аналогових електричних годинниках, таймерах та інших пристроях, де потрібен правильний час. У діапазоні промислових потужностей синхронний двигун виконує дві важливі функції. По-перше, це високоєфективний засіб перетворення енергії змінного струму у механічну роботу. По-друге, він може працювати з випереджаючим або одиничним коефіцієнтом потужності і тим самим забезпечувати корекцію коефіцієнта потужності.

**Універсальний двигун.** *Універсальний двигун* — це тип електродвигуна, який може працювати від змінного або постійного струму та використовує електромагніт як статор для створення свого магнітного поля.



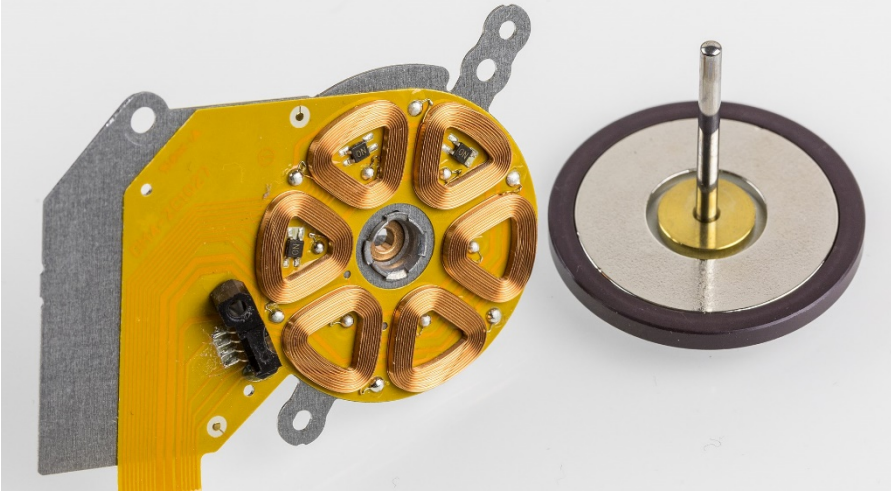
*Сучасний недорогий універсальний мотор, від пилососа. Обмотки поля з обох боків виконані з мідного дроту. Ламінований металевий сердечник ротора сірого*

кольору з більш темними прорізами для намотування котушок, що мають високу ефективність. Металевий комутатор подібної форми (частково прихований у передній частині) став темним від використання. Велика коричнева деталь із формованого пластику на передньому плані підтримує напрямні й щітки (з обох боків), а також передній підшипник двигуна.

Це комутований двигун із послідовною обмоткою, де котушки поля статора з'єднані послідовно з обмотками ротора через комутатор. Його часто називають двигуном серії змінного струму. Універсальний двигун за конструкцією дуже схожий на двигун серії постійного струму, але дещо модифікований, щоб забезпечити належну роботу двигуна від змінного струму. Цей тип електродвигуна може добре працювати на змінному струмі, оскільки струм як в котушках поля, так і в якорі (і в результаті магнітних полів) буде змінюватися (зворотна полярність) синхронно з джерелом живлення. Отже, результуюча механічна сила буде виникати в постійному напрямку обертання, незалежно від напрямку прикладеної напруги, але визначається комутатором і полярністю котушок поля.

Універсальні двигуни мають високий пусковий момент, можуть працювати на високій швидкості, легкі та компактні. Вони зазвичай використовуються в портативних електроінструментах та обладнанні, а також у багатьох побутових приладах. Ними також відносно легко керувати, електромеханічно з використанням різьбових котушок або електронно. Однак у комутатора є щітки, які зношуються, тому їх набагато рідше використовують для обладнання, яке постійно використовується. Крім того, частково через комутатор, універсальні двигуни зазвичай дуже шумні, як акустично, так і електромагнітно.

**Електродвигун з осьовим магнітним потоком.** *Електродвигун з осьовим магнітним потоком* (*axial flux motor, axial gap motor, or pancake motor*) — це геометрія конструкції електродвигуна, де зазор між ротором і статором, а отже, напрямок магнітного потоку між ними, вирівняний паралельно осі обертання, а не радіально, як із концентричною циліндричною геометрією більш поширеного двигуна з радіальним зазором.



*Мініатюрний безщітковий осьовий двигун постійного струму, що демонструє інтеграцію з технікою конструювання друкованих плат. Ротор, показаний праворуч, намагнічується по осі зі змінною полярністю.*

Незважаючи на те, що ця геометрія використовувалася з моменту розробки перших електромагнітних двигунів, її використання було рідкісним явищем до широкого поширення сильних постійних магнітів і розвитку безщіткових двигунів постійного струму, які могли б краще використовувати деякі переваги осьової геометрії. Осьова геометрія може бути застосована майже до будь-якого принципу роботи (наприклад, щітковий DC, індукція, кроковий, реактивний), який можна використовувати в радіальному двигуні, і може допускати деякі топології, які не були б практичними в радіальній геометрії, але навіть для за тим же принципом роботи є міркування в застосуванні та дизайні, які змусять одну геометрію бути більш придатною, ніж іншу. Двигуни з осьовою геометрією, як правило, коротші та ширші, ніж еквівалентні радіальні двигуни.

Аксіальні електродвигуни без хомутів забезпечують чудову щільність крутного моменту. Осьові двигуни деякий час використовувалися для малопотужних недорогих безщіткових двигунів постійного струму, оскільки двигун можна легко побудувати безпосередньо на **друкованій платі** (*printed circuit board — PCB*), або навіть використовувати провідники РСВ як обмотки статора, але останнім часом з'явилися було докладено більше зусиль для розробки високопотужних безщіткових двигунів з осьовою геометрією. Успішним осьовим двигуном постійного струму з щіткою є двигун Лінча, де ротор майже повністю складається з плоских мідних смужок із вставленими невеликими залізними сердечниками, що дозволяє працювати з дуже високою потужністю.

*Переваги двигунів з осьовою геометрією.*

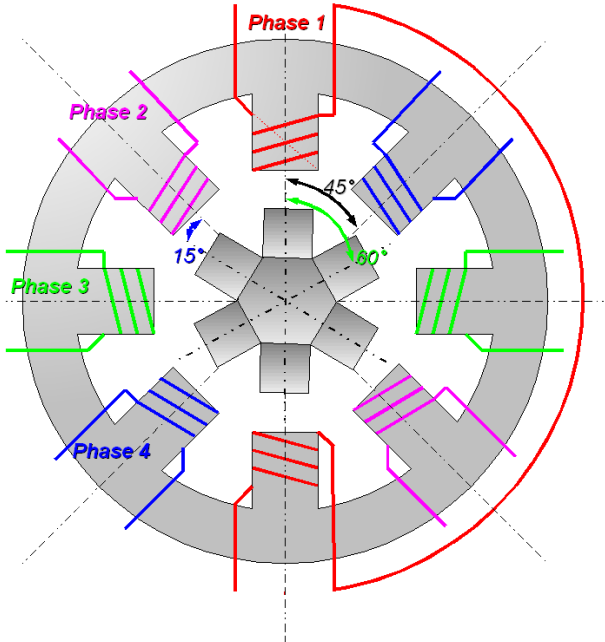
- Двигун може бути побудований на будь-якій плоскій конструкції, наприклад, на друкованій платі, лише з додаванням котушок і підшипника.

- Процес намотування котушки може бути значно простішим, як і процес з'єднання котушки і сердечника.
- Оскільки котушки плоскі, прямокутні мідні смужки можна легше використовувати, що дозволяє спростити сильнострумові обмотки.
- Часто можна значно полегшити ротор.
- Зазор ротор-статор може бути меншим, оскільки на нього не впливають відцентрові сили і його можна регулювати після будівництва.
- Потенційно менша довжина магнітного шляху.
- Більшість конструктивних компонентів є плоскими і можуть бути виготовлені без спеціального інструменту для лиття або штампування.
- Оскільки магнітний шлях через обмотки прямий, можна легко використовувати електротехнічну сталь, орієнтовану на зернистість, що має вищу проникність і менші втрати в сердцевині.

### Недоліки.

- Ротор, як правило, набагато ширший, що викликає збільшення інерції обертання та відцентрові сили, які можуть зменшити максимальну швидкість обертання.
- Нерівномірний розподіл потоку через клиноподібні сегменти.
- Оскільки сегменти звужуються до центру, залишається менше місця для розташування обмоток і з'єднань.

**Реактивний двигун.** *Реактивний двигун (switched reluctance motor — SRM)* — це електричний двигун, який працює за допомогою реактивного моменту.



Перетин SRM з 8 статорними та 6 роторними полюсами

На відміну від звичайних щіткових двигунів постійного струму, потужність подається на обмотки в статорі (корпусі), а не на ротор. Це значно спрощує механічну конструкцію, оскільки енергію не потрібно доставляти до рухомої частини, але це ускладнює електричну конструкцію, оскільки для подачі живлення до різних обмоток потрібно використовувати якусь систему комутації. Електронні пристрої можуть точно розраховувати перемикання струмів, полегшуючи конфігурації SRM. Його основним недоліком є пульсація крутного моменту.

Така ж електромеханічна конструкція може бути використана в генераторі. Навантаження перемикається на котушки послідовно для синхронізації потоку струму з обертанням. Такі генератори можуть працювати на набагато більших швидкостях, ніж звичайні типи, оскільки якір може бути виготовлено як один шматок матеріалу, що намагнічується, у вигляді циліндра з прорізами Топологія, яка є одночасно двигуном і генератором, корисна для запуску основного двигуна, оскільки економить виділений стартер.

**Серводвигун.** *Серводвигун* — це поворотний або лінійний привод, який дозволяє точно керувати кутовим або лінійним положенням, швидкістю та прискоренням.[1] Він складається з відповідного двигуна, з'єднаного з датчиком для зворотного зв'язку положення. Для цього також потрібен відносно складний контролер, часто спеціальний модуль, розроблений спеціально для використання із сервомоторами.

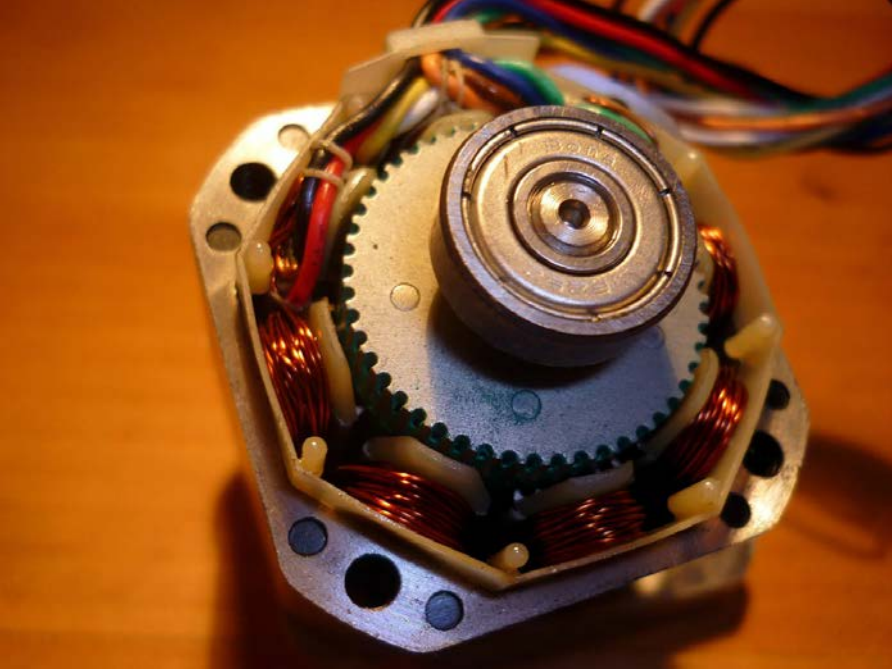
Серводвигуни не є окремим класом двигунів, хоча термін серводвигун часто використовується для позначення двигуна, придатного для використання в системі керування із замкненим контуром.

Серводвигун дуже часто продається як цілісний модуль, який використовується в системі керування положенням або швидкістю. Серводвигуни використовуються в таких програмах, як верстати, ручні плоттери та інші технологічні системи. Двигуни, призначені для використання в сервомеханізмі, повинні мати добре задокументовані характеристики швидкості, крутного моменту та потужності. Крива швидкості та крутного моменту є досить важливою і є високим співвідношенням для серводвигуна. Також важливі характеристики динамічної реакції, такі як індуктивність обмотки та інерція ротора; ці фактори обмежують загальну продуктивність контуру сервомеханізму. Великі, потужні, але інерційні контури сервоприводів можуть використовувати звичайні двигуни змінного або постійного струму та системи приводу зі зворотним зв'язком положення або швидкості двигуна. Оскільки вимоги до динамічної реакції зростають, використовуються більш спеціалізовані конструкції двигунів, такі як двигуни без сердечника. Значна густина потужності та характеристики прискорення двигунів змінного струму в порівнянні з двигунами постійного струму, як правило, надають перевагу синхронним, BLDC, індукційним та SRM-приводам.

Сервосистема відрізняється від деяких застосувань крокового двигуна тим, що зворотний зв'язок положення є безперервним під час роботи двигуна. Покрокова система за своєю суттю працює в розімкненому циклі,

покладаючись на те, що двигун не «пропускає кроки» для короткочасної точності, при цьому будь-який зворотний зв'язок, наприклад, перемикач «домашній» або енкодер положення, є зовнішніми для системи двигуна.

**Кроковий двигун.** *Кроковий двигун (stepper motor, step motor or stepping motor)* — це безщітковий електродвигун постійного струму, який розділяє повний оберт на кількість рівних кроків. Положення двигуна можна налаштувати на переміщення та утримання на одному з цих кроків без будь-якого датчика положення для зворотного зв'язку (контролер із розімкнутим контуром), якщо двигун правильно підібраний для застосування щодо крутного моменту та швидкості.



*Кроковий двигун*

Крокові двигуни часто використовуються, коли потрібні точні обертання. У кроковому двигуні внутрішнім ротором, що містить постійні магніти, або магнітно-м'яким ротором із виступаючими полюсами, керують набором зовнішніх магнітів, які перемикаються електронним шляхом. Кроковий двигун також можна розглядати як щось середнє між електродвигуном постійного струму та обертовим соленоїдом. Оскільки кожна котушка по черзі отримує напругу, ротор вирівнюється з магнітним полем, створеним обмоткою під напругою. На відміну від синхронного двигуна, при його застосуванні кроковий двигун може не обертатися безперервно; натомість він «переходить» — запускається, а потім швидко зупиняється — з одного положення в інше, оскільки



обмотки поля послідовно підключаються та знеструмлюються. Залежно від послідовності ротор може повертатися вперед або назад, і він може змінювати напрямок, зупинятися, прискорюватися або сповільнюватись у будь-який момент.

Прості драйвери крокових двигунів повністю подають або повністю знеструмлюють обмотки збудження, приводячи ротор у «гвинтик» до обмеженої кількості положень; більш досконалі драйвери можуть пропорційно керувати живленням обмоток збудження, дозволяючи роторам розташовуватися між зубчастими точками і, таким чином, обертатися надзвичайно плавно. Такий режим роботи часто називають мікрокроком. Крокові двигуни, керовані комп'ютером, є однією з найбільш універсальних форм систем позиціонування, особливо якщо вони є частиною цифрової сервокерованої системи.

Крокові двигуни можна з легкістю повертати на певний кут дискретними кроками, і, отже, крокові двигуни використовуються для позиціонування голівки читання/запису в комп'ютерних дискетах.

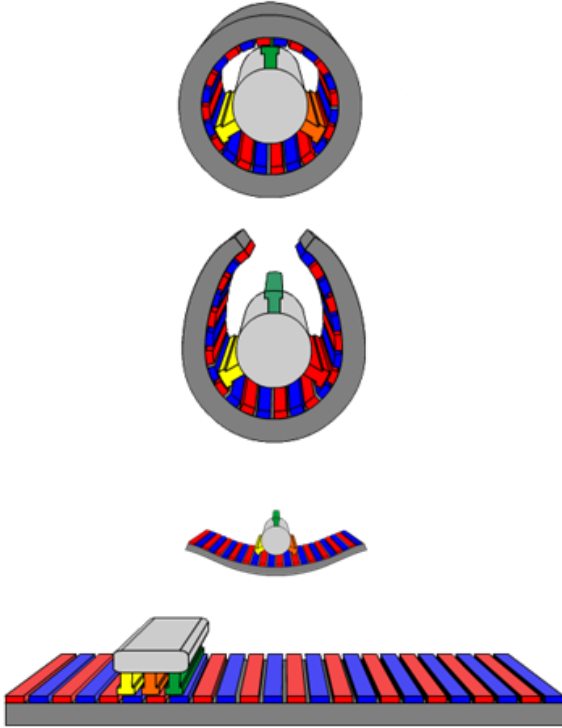
Крокові двигуни часто використовувалися і досі часто використовуються в комп'ютерних принтерах, оптичних сканерах і цифрових копіювальних апаратах для переміщення елемента оптичного сканування, каретки друкуючої головки (матричних і струменевих принтерів), а також валика або роликів подачі. Так само багато комп'ютерних плотерів (які з початку 1990-х були замінені на широкоформатні струменеві та лазерні принтери) використовували обертові крокові двигуни для переміщення ручки та валика; Типовими альтернативами тут були або лінійні крокові двигуни, або серводвигуни з аналоговими системами керування замкненим контуром.

Так звані кварцові аналогові наручні годинники містять найменші звичайні крокові двигуни; вони мають одну котушку, споживають дуже мало енергії та мають ротор з постійними магнітами. Такий же двигун приводить в рух кварцові годинники, що живляться від батарейок. Деякі з цих годинників, наприклад, хронографи, містять більше одного крокового двигуна.

Тісно пов'язані за конструкцією з трифазними синхронними двигунами змінного струму, крокові двигуни та SRM класифікуються як двигуни зі змінним опірністю. Крокові двигуни часто використовувалися і використовуються в комп'ютерних принтерах, оптичних сканерах і машинах з числовим програмним керуванням (ЧПУ), таких як маршрутизатори, плазмові різачки та токарні верстати з ЧПУ.

Двигуни з реактивним перемиканням є дуже великими кроковими двигунами зі зменшеним числом полюсів і, як правило, комутовані з замкненим контуром.

**Лінійний електродвигун.** *Лінійний електродвигун* — це електродвигун, у якого статор і ротор "розгорнулися", тому замість того, щоб створювати крутний момент (обертання), він створює лінійну силу по своїй довжині.



*Синхронні лінійні двигуни є випрямленими версіями роторних двигунів з постійними магнітами*

Однак лінійні двигуни не обов'язково є прямими. Характерно, що активна ділянка лінійного двигуна має кінці, тоді як більш звичайні двигуни влаштовані як безперервний цикл.

Типовий режим роботи — це привод типу Лоренца, в якому прикладена сила лінійно пропорційна струму та магнітному полю ( $\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}$ ).

Лінійні двигуни найбільш часто зустрічаються у високоточних інженерних пристроях. Це процвітаюча сфера прикладних досліджень із спеціалізованими науковими конференціями та інженерними підручниками.

Для лінійних двигунів було запропоновано багато конструкцій, які поділяються на дві основні категорії: лінійні двигуни з низьким прискоренням і з високим прискоренням. Лінійні двигуни з низьким прискоренням підходять для поїздів на магнітній підвісці та інших наземних транспортних засобів. Лінійні двигуни з високим прискоренням зазвичай є досить короткими і призначені для прискорення об'єкта до дуже високої швидкості, наприклад, спіраль.

Лінійні двигуни з високим прискоренням зазвичай використовуються в дослідженнях гіпершвидкісних зіткнень, як зброя або як двигуни масових

двигунів космічних кораблів. Зазвичай вони мають конструкцію лінійного асинхронного двигуна змінного струму (*linear induction motor* — *LIM*) з активною трифазною обмоткою на ньому з одного боку повітряного зазору та пасивної провідникової пластини з іншого боку. Однак гомополярний лінійний двигун постійного струму є ще однією конструкцією лінійного двигуна з високим прискоренням. Двигуни з низьким прискоренням, високою швидкістю та високою потужністю зазвичай мають конструкцію лінійного синхронного двигуна (*linear synchronous motor* — *LSM*), з активною обмоткою з одного боку повітряного зазору та набором магнітів із змінними полюсами з іншого боку. Ці магніти можуть бути постійними або електромагнітами. Наприклад, двигун для шанхайського маглевого поїзда - це LSM.

### Трансформатори

**Трансформатор** — це пасивний пристрій, який передає електричну енергію від одного електричного кола до іншого або кількох ланцюгів. Змінний струм в будь-якій одній котушці трансформатора створює змінний магнітний потік в сердечнику трансформатора, який індукуює різну електрорушійну силу через будь-які інші котушки, намотані навколо того ж сердечника. Електрична енергія може передаватися між окремими котушками без металевого (провідного) з'єднання між двома ланцюгами. Закон індукції Фарадея, відкритий у 1831 році, описує ефект індукованої напруги в будь-якій котушці через змінний магнітний потік, оточений котушкою.

Трансформатори найчастіше використовуються для підвищення низької напруги змінного струму при великому струмі (підвищувальний трансформатор) або зниження високої напруги змінного струму при низькому струмі (понижувальний трансформатор) в електричних енергетичних установках, а також для з'єднання окремих ланок пристроїв обробки сигналів. Трансформатори також можна використовувати для ізоляції, де напруга на вході дорівнює напрузі на виході, при цьому окремі котушки електрично не з'єднані одна з одною. Після винаходу першого трансформатора постійного потенціалу в 1885 році трансформатори стали важливими для передачі, розподілу та використання електроенергії змінного струму. Широкий спектр конструкцій трансформаторів зустрічається в електронних та електричних енергетичних застосунках. Розміри трансформаторів варіюються від радіочастотних трансформаторів об'ємом менше кубічного сантиметра до агрегатів вагою в сотні тон, які використовуються для з'єднання електромереж.

### Історія

**Відкриття електромагнітної індукції.** Електромагнітна індукція, принцип роботи трансформатора, була відкрита незалежно Майклом Фарадеєм у 1831 році та Джозефом Генрі в 1832 році. Тільки Фарадей продовжив свої експерименти до точки розробки рівняння, що описує взаємозв'язок між ЕРС та магнітним потоком, тепер відомим як закон індукції Фарадея:

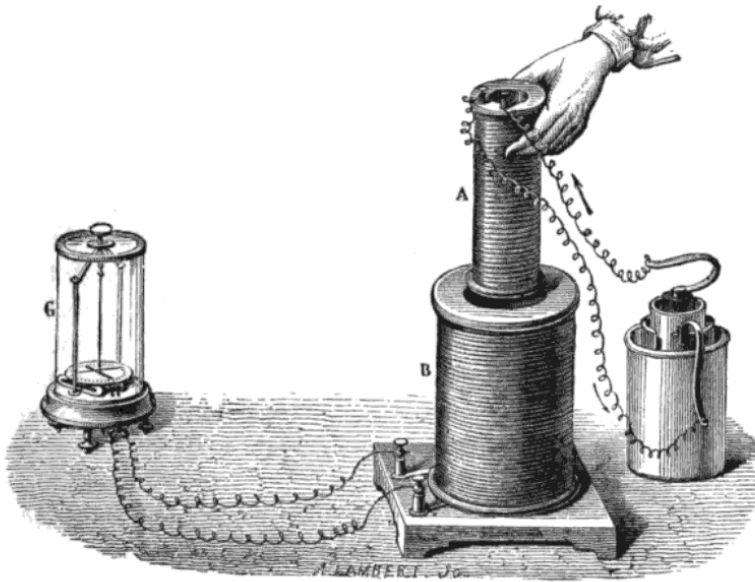
$$e(t) = \left| \frac{d\Phi(t)}{dt} \right|$$

## Електричні машини

де  $e(t)$  – ЕРС у вольтах, а  $\Phi(t)$  – магнітний потік через контур у веберах.

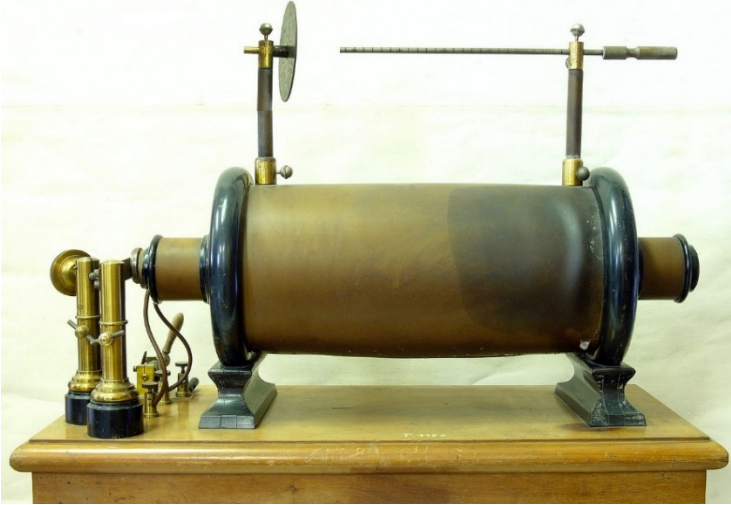
Фарадей провів ранні експерименти з індукції між котушками провідника, включаючи намотування пари котушок навколо залізного кільця, створивши таким чином перший тороїдальний трансформатор із закритим сердечником. Однак він подав лише окремі імпульси струму до свого трансформатора і ніколи не виявив зв'язку між співвідношенням витків і ЕРС в обмотках.

Першим типом трансформатора, який отримав широке застосування, була індукційна котушка, винайдена преподобним Ніколасом Калланом з коледжу Мейнута, Ірландія в 1836 році.[57] Він був одним із перших дослідників, які зрозуміли, що чим більше витків має вторинна обмотка по відношенню до первинної, тим більшою буде індукована вторинна ЕРС. Індукційні котушки виникли в результаті зусиль вчених і винахідників отримати вищу напругу від батарей. Оскільки батареї виробляють постійний струм (постійний), а не змінний струм, індукційні котушки поклалися на вібруючі електричні контакти, які регулярно переривали струм в первинній обмотці, щоб створити зміни потоку, необхідні для індукції. У період між 1830-ми і 1870-ми роками зусилля по створенню кращих індукційних котушок, переважно методом проб і помилок, повільно розкривали основні принципи трансформаторів.



*Експеримент Фарадея з індукцією між котушками*

**Індукційні котушки.** Першим типом трансформатора, який отримав широке застосування, була індукційна котушка, винайдена преподобним Ніколасом Калланом з коледжу Мейнута, Ірландія в 1836 році.



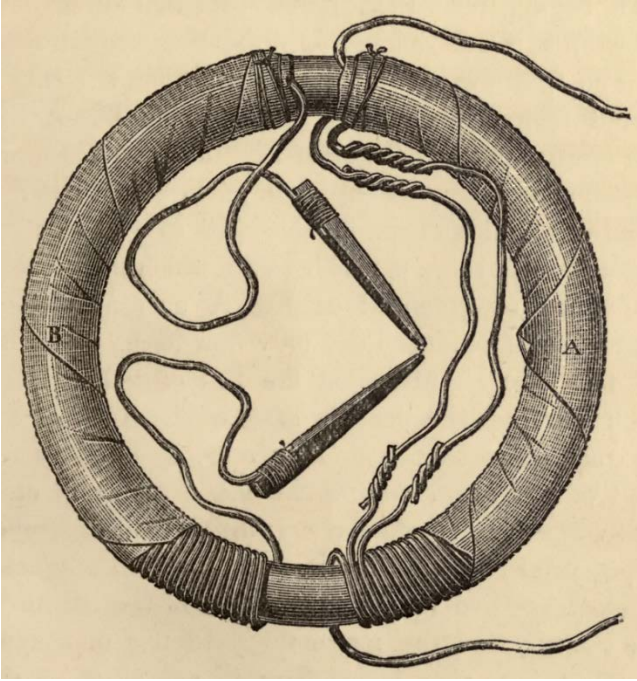
*Індукційна котушка, 1900, Бремерхафен, Німеччина*

Він був одним із перших дослідників, які зрозуміли, що чим більше витків має вторинна обмотка по відношенню до первинної, тим більшою буде індукована вторинна ЕРС. Індукційні котушки виникли в результаті зусиль вчених і винахідників отримати вищу напругу від батарей. Оскільки батареї виробляють постійний струм (постійний), а не змінний струм, індукційні котушки поклалися на вібруючі електричні контакти, які регулярно переривали струм в первинній обмотці, щоб створити зміни потоку, необхідні для індукції. У період між 1830-ми і 1870-ми роками зусилля по створенню кращих індукційних котушок, переважно методом проб і помилок, повільно розкривали основні принципи трансформаторів.

**Перші трансформатори змінного струму.** До 1870-х років були доступні ефективні генератори, що виробляли змінний струм (АС), і було виявлено, що змінний струм міг жити індукційну котушку безпосередньо, без переривника.

У 1876 році російський інженер Павло Яблочков винайшов систему освітлення на основі набору індукційних котушок, де первинні обмотки були підключені до джерела змінного струму. Вторинні обмотки можна було підключити до кількох «електричних свічок» (дугових ламп) власної конструкції. Котушки, які використовував Яблочков, функціонували по суті як трансформатори.[60]

У 1878 році фабрика Ганца в Будапешті, Угорщина, розпочала виробництво обладнання для електричного освітлення і до 1883 року встановила понад п'ятдесят систем в Австро-Угорщині. Їхні системи змінного струму використовували дугові лампи та лампи розжарювання, генератори та інше обладнання.



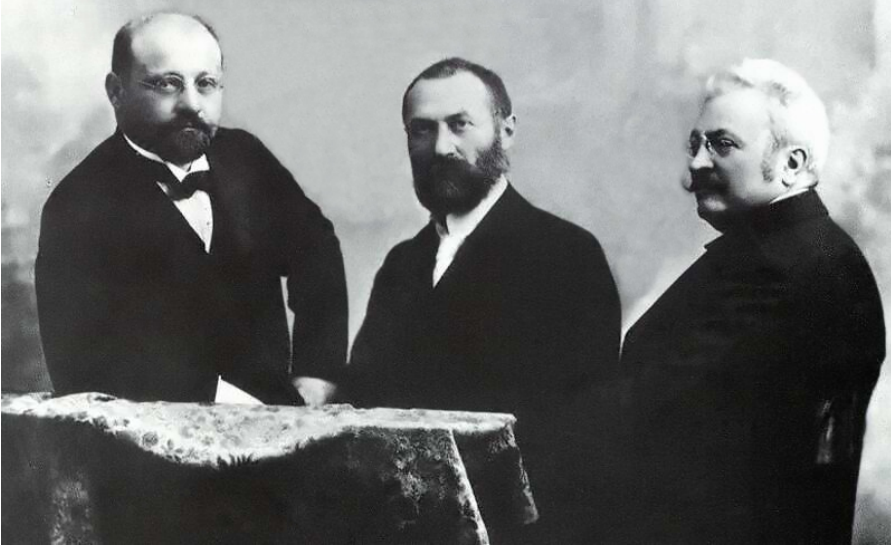
*Кільцевий трансформатор Фарадея*

Люсьєн Голард і Джон Діксон Гіббс вперше продемонстрували пристрій з відкритим залізним сердечником під назвою «вторинний генератор» у Лондоні в 1882 році, а потім продали цю ідею компанії Westinghouse у Сполучених Штатах. Вони також виставили винахід в Турині, Італія, в 1884 році, де він був прийнятий для системи електричного освітлення.

**Ранні послідовні схеми з'єднання трансформаторів.** Індукційні котушки з розімкнутими магнітопроводами малоефективні при передачі потужності на навантаження. Приблизно до 1880 року парадигма передачі електроенергії змінним струмом від джерела високої напруги до навантаження низької напруги була послідовним колом. Трансформатори з відкритим сердечником зі співвідношенням близько 1:1 були з'єднані з їх первинними обмотками послідовно, щоб дозволити використовувати високу напругу для передачі при подачі низької напруги на лампи. Внутрішня вада цього методу полягала в тому, що вимкнення однієї лампи (або іншого електричного пристрою) впливало на напругу, яка подається на всі інші в тій самій ланцюзі. Багато конструкцій регульованих трансформаторів були введені для компенсації цієї проблемної характеристики послідовної схеми, включаючи ті, що використовують методи регулювання сердечника або обходу магнітного потоку навколо частини котушки. Ефективні, практичні конструкції трансформаторів з'явилися лише в 1880-х роках, але протягом десятиліття трансформатор зіграє важливу роль у боротьбі з течією, а також побачить, що системи

розподілу змінного струму перемагають над своїми аналогами постійного струму, в позиції, в якій вони залишаються домінуючими. відтоді.

**Трансформатори із закритим сердечником і паралельний розподіл живлення.** Восени 1884 року Каролі Зіперновський (Károly Zipernowsky), Отто Блаті (Ottó Bláthy) та Мікса Дері (Miksa Déri) (ZBD), троє угорських інженерів, пов'язаних із заводом Ганца, визначили, що пристрої з відкритим ядром є нездійсненно, оскільки вони не були здатні надійно регулювати напругу.



*Команда ZBD складалася з Каролі Зіперновського, Отто Блаті та Мікси Дері*

У своїх спільних патентних заявках 1885 року на нові трансформатори (пізніше названі трансформаторами ZBD) вони описали дві конструкції із закритими магнітними ланцюгами, де мідні обмотки були або намотані навколо кільцевого сердечника із залізного дроту, або оточені сердечником із залізного дроту.[62] Ці дві конструкції були першим застосуванням двох основних конструкцій трансформаторів, які широко використовуються донині, іменованих «формою сердечника» або «формою оболонки». Також восени 1884 року фабрика Ганц здійснила поставку перших у світі п'яти високоефективних трансформаторів змінного струму, перший з яких був відвантажений 16 вересня 1884 року. Цей перший блок був виготовлений за такими характеристиками: 1400 Вт, 40 Гц, 120:72 В, 11,6:19,4 А, співвідношення 1,67:1, однофазний, у формі корпусу.

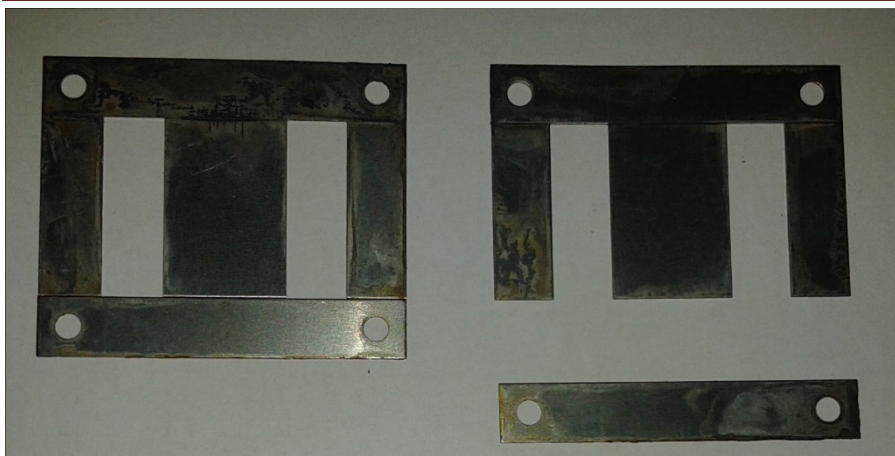
В обох конструкціях магнітний потік, що з'єднує первинну та вторинну обмотки, майже повністю переміщався в межах залізного сердечника, без навмисного проходження через повітря. Нові трансформатори були в 3,4 рази ефективнішими, ніж біполярні пристрої з відкритим сердечником Голарда і Гіббса. Патенти ZBD включали два інших важливих взаємопов'язаних нововведення: одне стосується використання навантажень, з'єднаних паралельно, а не послідовно, а інше –

можливість мати трансформатори з високим коефіцієнтом витків, щоб напруга мережі живлення могла бути набагато вищою (спочатку 1400 до 2000 В), ніж напруга навантажень використання (спочатку бажано 100 В). При використанні в паралельно підключених електричних розподільних системах трансформатори із закритим сердечником нарешті зробили технічно та економічно доцільним забезпечення електроенергією для освітлення будинків, підприємств та громадських приміщень. Блаті запропонував використовувати закриті жили, Зіперновський запропонував використовувати паралельні шунтові з'єднання, а Дері провів експерименти. На початку 1885 року троє інженерів також усунули проблему втрат на вихрові струми з винаходом ламінування електромагнітних сердечників.

Сьогодні трансформатори розроблені за принципами, відкритими трьома інженерами. Вони також популяризували слово «трансформатор» для опису пристрою для зміни ЕРС електричного струму, хоча цей термін вже використовувався до 1882 року. У 1886 році інженери ZBD спроектували, а фабрика Ганца поставила електричне обладнання для першої в світі електростанції, яка використовувала генератори змінного струму для живлення паралельно підключеної загальної електричної мережі, парової електростанції Рим-Черкі.

**Покращення Вестінгауза.** Хоча Джордж Вестінгауз купив патенти Голарда і Гіббса в 1885 році, компанія Edison Electric Light Company мала опціон щодо прав США на трансформатори ZBD, вимагаючи від Westinghouse продовжити альтернативні проекти на тих же принципах. Він доручив Вільяму Стенлі розробити пристрій для комерційного використання в Сполучених Штатах. Перша запатентована конструкція Стенлі була для індукційних котушок з одинарними сердечниками з м'якого заліза і регульованими зазорами для регулювання ЕРС, наявної у вторинній обмотці. Ця конструкція була вперше використана комерційно в США в 1886 році, але Хоча Джордж Вестінгауз купив патенти Голарда і Гіббса в 1885 році, компанія Edison Electric Light Company мала опціон щодо прав США на трансформатори ZBD, вимагаючи від Westinghouse продовжити альтернативні проекти на тих же принципах. Він доручив Вільяму Стенлі розробити пристрій для комерційного використання в Сполучених Штатах.[75] Перша запатентована конструкція Стенлі була для індукційних котушок з одинарними сердечниками з м'якого заліза і регульованими зазорами для регулювання ЕРС, наявної у вторинній обмотці. Ця конструкція була вперше використана комерційно в США в 1886 році, але Вестінгауз мав намір покращити конструкцію Стенлі, щоб зробити його (на відміну від типу ZBD) простим і дешевим у виробництві.





*Е-образні пластини для сердечників трансформаторів, розроблені Westinghouse*

Вестінгауз, Стенлі та партнери невдовзі розробили сердечник, який було легше у виготовленні, який складався з стопки тонких «Е-подібних» залізних пластин, ізольованих тонкими аркушами паперу або іншим ізоляційним матеріалом. Попередньо намотані мідні котушки можна було вставити на місце, а прямі залізні пластини покласти всередину, щоб створити замкнутий магнітний ланцюг. У 1887 році Westinghouse отримав патент на нову недорогу конструкцію.

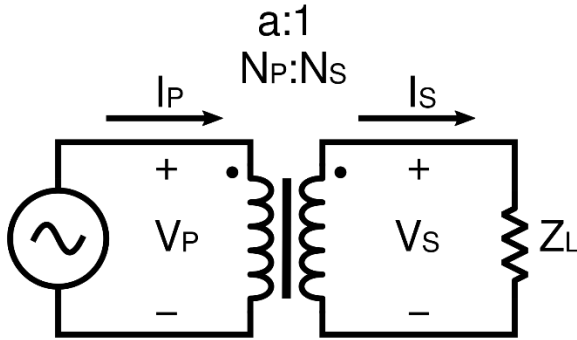
Інші ранні конструкції трансформаторів. У 1889 році інженер російського походження Михайло Доливо-Добровольський розробив перший трифазний трансформатор у Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft ("General Electricity Company") у Німеччині.

У 1891 році Нікола Тесла винайшов котушку Тесли, резонансний трансформатор із повітряним сердечником з подвійною настрійкою для виробництва дуже високої напруги на високій частоті.

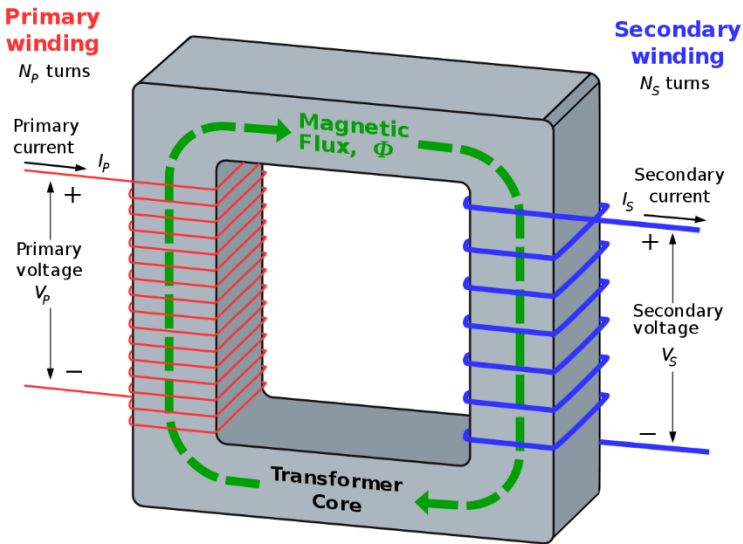
### Принципи роботи

**Ідеальний трансформатор.** *Ідеальний трансформатор* — це теоретичний лінійний трансформатор, який без втрат і з ідеальним магнітним зв'язком. Ідеальний магнітний зв'язок передбачає нескінченно високу магнітну проникність сердечника, індуктивність обмотки та нульову магніторушійну силу.

Змінний струм в первинній обмотці трансформатора намагається створити змінний магнітний потік в осерді трансформатора, який також оточений вторинною обмоткою. Цей змінний потік на вторинній обмотці індуктує змінну електрорушійну силу (ЕРС, напруга) у вторинній обмотці через електромагнітну індукцію, а вторинний струм, створений таким чином, створює потік, рівний і протилежний тому, що створюється первинною обмоткою, відповідно до закону Ленца.



Ідеальний трансформатор, з'єднаний з джерелом  $V_P$  на первинному та опір навантаження  $Z_L$  на вторинні, де  $0 < Z_L < \infty$ .



*Ідеальний трансформатор та індукційний закон*

Обмотки намотані навколо сердечника з нескінченно високою магнітною проникністю, так що весь магнітний потік проходить як через первинну, так і через вторинну обмотки. З джерелом напруги, підключеним до первинної обмотки, і

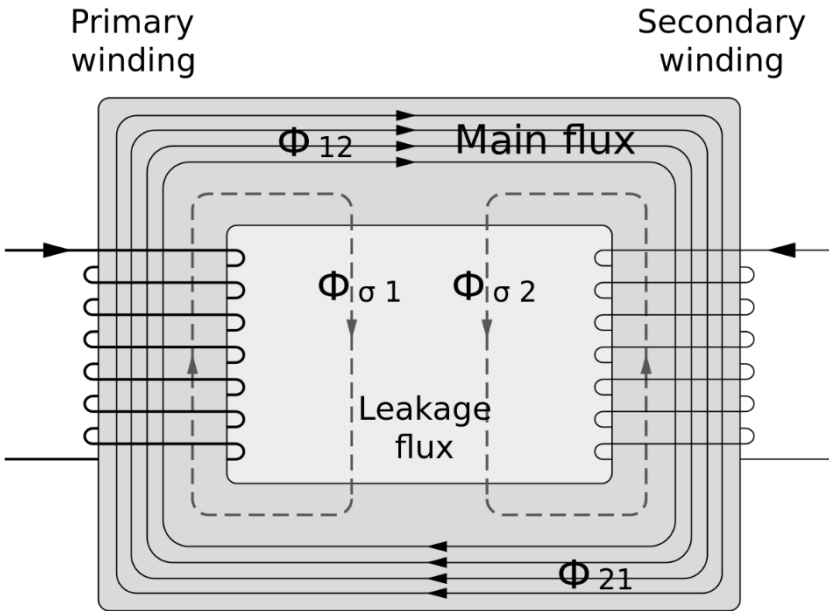
навантаженням, підключеним до вторинної, струми трансформатора протікають у вказаних напрямках, а магнітурушійна сила сердечника скасовується до нуля.

Відповідно до закону Фарадея, оскільки в ідеальному трансформаторі через первинну і вторинну обмотки проходить однаковий магнітний потік, в кожній обмотці індукується напруга, пропорційна її кількості обмоток. Коефіцієнт напруги обмотки трансформатора прямо пропорційний коефіцієнту витків обмотки.

Ідеальний трансформатор, показаний в екв. 5 є розумним наближенням для типового комерційного трансформатора, при цьому коефіцієнт напруги та коефіцієнт витків обмотки обернено пропорційні відповідному коефіцієнту струму.

Опір навантаження, що відноситься до первинного ланцюга, дорівнює квадрату відношення витків, помноженому на опір навантаження вторинного контуру.

### Реальний трансформатор



### Потік витoku трансформатора

**Відхилення від ідеального трансформатора.** Ідеальна модель трансформатора нехтує такими основними лінійними аспектами реальних трансформаторів:

(а) Втрати сердечника, які спільно називаються втратами струму намагнічування, складаються з

- Втрати на гістерезис через нелінійні магнітні ефекти в осерді трансформатора, і

- Втрати на вихровий струм через нагрів джоулів в осердді, пропорційні квадрату прикладеної напруги трансформатора.

(b) На відміну від ідеальної моделі, обмотки в реальному трансформаторі мають ненульові опори та індуктивності, пов'язані з:

- Джоулеві втрати через опір у первинній і вторинній обмотках[9]
- Потік витоку, який витікає з сердечника і проходить через одну обмотку, призводить лише до первинного та вторинного реактивного опору.

(c) схожий на індуктивність, паразитна ємність і явище саморезонансу через розподіл електричного поля. Зазвичай розглядаються три види паразитної ємності та наводяться рівняння із замкнутим циклом

- Ємність між сусідніми витками в якомусь одному шарі;
- Ємність між сусідніми шарами;
- Ємність між сердечником і шаром(ами), що прилягає до сердечника;

Включення ємності в модель трансформатора є складним і рідко намагається; Еквівалентна схема "справжньої" моделі трансформатора, показана нижче, не включає паразитну ємність. Однак ефект ємності можна виміряти шляхом порівняння індуктивності разомкненого ланцюга, тобто індуктивності первинної обмотки, коли вторинний ланцюг розімкнений, з індуктивністю короткого замикання, коли вторинна обмотка замикається.

**Магнітні потоки розсіювання.** Ідеальна модель трансформатора передбачає, що весь потік, створений первинною обмоткою, з'єднує всі витки кожної обмотки, включаючи її саму. На практиці деякий потік проходить шляхи, які виводять його за межі обмоток. Такий потік називається потоком витоку, і він призводить до індуктивності витоку послідовно з взаємно пов'язаними обмотками трансформатора. Потік витоку призводить до того, що енергія по черзі зберігається і розряджається з магнітних полів з кожним циклом джерела живлення. Це не є прямою втратою потужності, але призводить до нижчого регулювання напруги, через що вторинна напруга не буде прямо пропорційною первинній напрузі, особливо при великому навантаженні. Таким чином, трансформатори зазвичай розробляються з дуже низькою індуктивністю витоку.

У деяких застосуваннях бажано збільшити витік, і довгі магнітні шляхи, повітряні зазори або шунти магнітного байпаса можуть бути навмисно введені в конструкцію трансформатора, щоб обмежити струм короткого замикання, який він буде подавати. Негерметичні трансформатори можна використовувати для живлення навантажень з негативним опором, таких як електричні дуги, ртутні та натрієві лампи та неонові вивіски, або для безпечного поводження з навантаженнями, які періодично замикаються, наприклад у електродугових зварників.

Повітряні зазори також використовуються для запобігання насичення трансформатора, особливо трансформаторів аудіочастот у ланцюгах, які мають постійний компонент, що протікає в обмотках. Насичення реактор використовує насичення активної зони для контролю змінного струму.

Знання індуктивності витоку також корисно, коли трансформатори працюють паралельно. Можна показати, що якби відсоток імпедансу  $[d]$  і пов'язане відношення реактивного опору до опору витоку  $(X/R)$  двох трансформаторів були

## Розділ 9

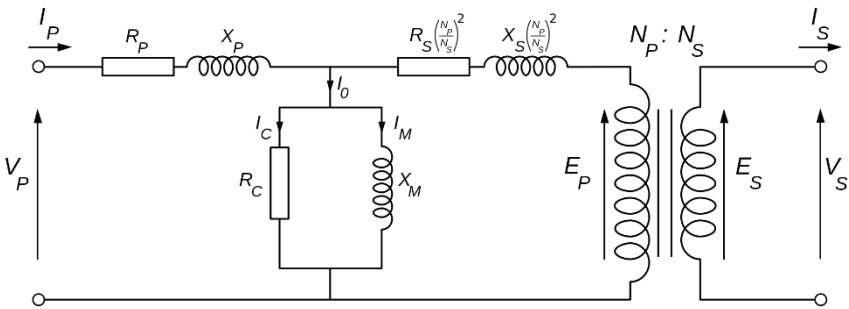
однаковими, трансформатори розподілили б потужність навантаження пропорційно їхнім відповідним номінальним характеристикам. Однак допуски імпедансу комерційних трансформаторів є значними. Крім того, імпеданс і співвідношення  $X/R$  трансформаторів різної потужності мають тенденцію відрізнятися.

**Еквівалентна схема.** Посилаючись на діаграму, фізична поведінка практичного трансформатора може бути представлена моделлю еквівалентної схеми, яка може включати ідеальний трансформатор.

Втрати в джоулях обмотки та реактивні опори витoku представлені наступними послідовними опороми петлі моделі:

- Первинна обмотка:  $R_P$ ,  $X_P$
- Вторинна обмотка:  $R_S$ ,  $X_S$ .

У звичайному ході перетворення еквівалентності схеми  $R_S$  і  $X_S$  на практиці зазвичай відносять до первинної сторони шляхом множення цих опорів на відношення витків у квадраті  $(N_P/N_S)^2 = a^2$ .



*Реальна схема заміщення трансформатора*

Втрати в сердечнику та реактивний опір представлені наступними опороми шунта моделі:

- Втрати сердечника або заліза:  $R_C$
- Реактивний опір намагнічування:  $X_M$ .
- $R_C$  і  $X_M$  спільно називають намагнічувальною віткою моделі.

Втрати в сердечнику викликані переважно гістерезисом і ефектами вихрових струмів в сердечнику і пропорційні квадрату потоку сердечника для роботи на заданій частоті. Скінченна магнітна проникність магнітопроводу обумовлює струм намагнічування  $I_M$  для підтримки сумарного магнітного потоку в магнітопроводі. Струм намагнічування знаходиться в фазі з потоком, зв'язок між ними є нелінійною через ефект насичення. Однак усі імпеданси показаної еквівалентної схеми за визначенням є лінійними, і такі ефекти нелінійності, як правило, не відображаються в схемах еквівалентних трансформаторів. При синусоїдальному живленні потік у магнітопроводі відстає від індукованої ЕРС на  $90^\circ$ . При розімкнутій вторинній обмотці струм вітки намагнічування  $I_0$  дорівнює струму холостого ходу трансформатора.

Отримана модель, хоча іноді її називають «точною» еквівалентною схемою, заснованою на припущеннях лінійності, зберігає ряд наближень. Аналіз можна

спростити, припустивши, що опір гілки намагнічування є відносно високим, і перемістивши гілку ліворуч від первинного опору. Це вносить похибку, але дозволяє комбінувати первинний та вторинний опори та реактивні опори шляхом простого підсумовування у вигляді двох послідовних опорів.

Опір еквівалентної схеми трансформатора і параметри коефіцієнта трансформатора можна отримати з таких випробувань: випробування на обрив, коротке замикання, перевірка опору обмотки та перевірка коефіцієнта трансформатора.

**Вплив частоти на характеристики трансформатора.** ЕРС трансформатора при заданому потоці збільшується з частотою. Працюючи на вищих частотах, трансформатори можуть бути фізично більш компактними, оскільки магнітопровід здатний передавати більше потужності, не досягаючи насичення, і для досягнення того ж імпедансу потрібно менше витків.

Однак такі властивості, як втрата сердечника та скин-ефект провідника, також збільшуються з частотою. Літаки та військово обладнання використовують джерела живлення 400 Гц, які зменшують вагу магнітопроводу та обмотки. І навпаки, частоти, використовувани для деяких систем електрифікації залізниць, були набагато нижчими (наприклад, 16,7 Гц і 25 Гц), ніж звичайні частоти комунальних послуг (50–60 Гц), з історичних причин, пов'язаних головним чином з обмеженнями раннях електротягових двигунів. Отже, трансформатори, які використовувалися для зниження напруги високої повітряної лінії, були набагато більшими та важчими для тієї самої потужності, ніж трансформатори, необхідні для вищих частот.

Робота трансформатора на його проектній напрузі, але на частоті, вищій, ніж передбачено, призведе до зниження струму намагнічування. При меншій частоті струм намагнічування буде збільшуватися. Робота великого трансформатора на частоті, відмінній від його проектної, може вимагати оцінки напруги, втрат і охолодження, щоб визначити, чи безпечна експлуатація є практичною. Трансформаторам можуть знадобитися захисні реле для захисту трансформатора від перенапруги на частоті вище номінальної.

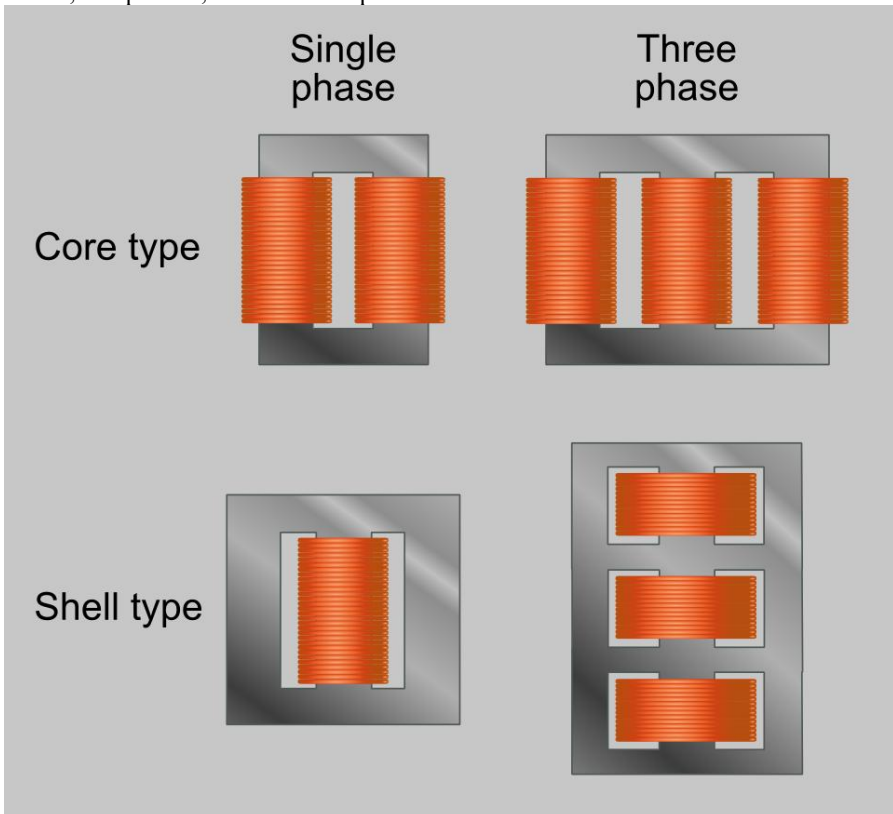
Одним із прикладів є тягові трансформатори, що використовуються для електричних багатоблокових та високошвидкісних поїздів, що працюють у регіонах з різними електричними стандартами. Обладнання перетворювачів і тягові трансформатори повинні відповідати різним вхідним частотам і напрузі (від 50 Гц до 16,7 Гц і номінальною напругою до 25 кВ).

На набагато вищих частотах необхідний розмір сердечника трансформатора різко падає: фізично невеликий трансформатор може впоратися з такими рівнями потужності, які потребують масивного залізного сердечника на частоті мережі. Розвиток імпульсних силових напівпровідникових пристроїв зробив джерела живлення імпульсного режиму життєздатними, щоб генерувати високу частоту, а потім змінювати рівень напруги за допомогою невеликого трансформатора.

Великі силові трансформатори вразливі до руйнування ізоляції через перехідні напруги з високочастотними компонентами, наприклад, викликані перемиканням або блискавкою.

**Конструкції трансформаторів**

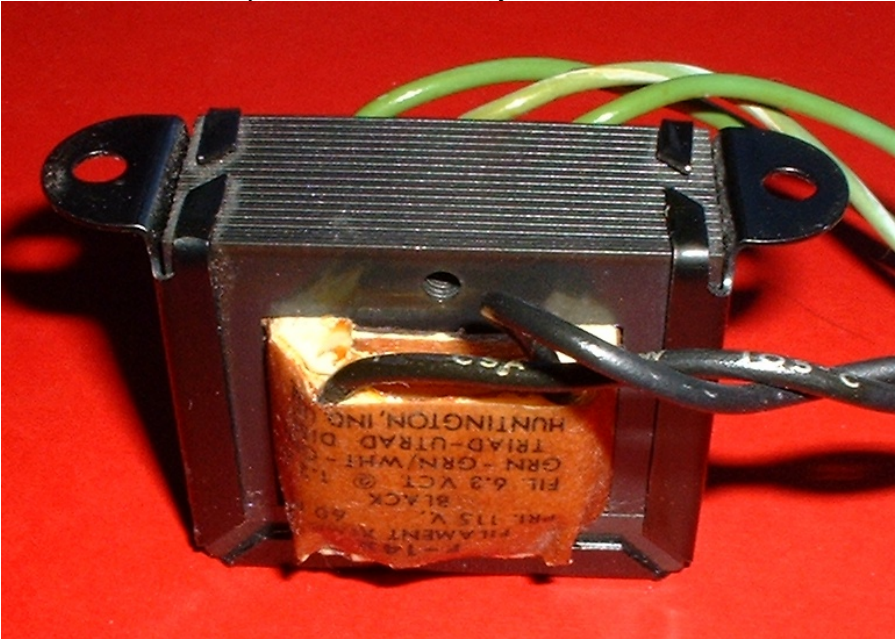
**Конструкція магнітопроводів.** Трансформатори із закритим сердечником сконструйовані у «формі сердечника» або «формі оболонки». Коли обмотки оточують сердечник, трансформатор має форму сердечника; коли обмотки оточені сердечником, трансформатор має форму оболонки.[25] Конструкція форми оболонки може бути більш поширеною, ніж конструкція форми сердечника для застосувань розподільних трансформаторів через відносну легкість укладання сердечника навколо котушок обмотки.[25] Конструкція сердечника, як правило, є більш економічною, а отже, більш поширеною, ніж конструкція форми оболонки для застосування високовольтних силових трансформаторів на нижньому кінці їх діапазонів напруги та номінальної потужності (менше або дорівнює номінально, 230 кВ або 75 МВА). При більш високій напрузі та потужності трансформатори у формі оболонки, як правило, є більш поширеними.



Конструкція у формі корпусу, як правило, є кращою для застосувань із надвисокою напругою та вищими MVA, оскільки, хоча трансформатори у формі оболонки є більш трудомісткими у виробництві, характеризуються кращим

відношенням кВА до ваги, кращими характеристиками міцності при короткому замиканні та вищими імунітетом до пошкоджень при транспортуванні.

**Ламіновані сталеві сердечники.** Трансформатори для використання на промислових, або аудіочастотах зазвичай мають сердечники з високопроникної кремнієвої сталі. Сталь має проникність у багато разів більше, ніж вільний простір, і, таким чином, сердечник значно зменшує струм намагнічування та обмежує потік на шляху, який тісно з'єднує обмотки. Перші розробники трансформаторів незабаром зрозуміли, що сердечники, виготовлені з твердого заліза, призводили до непомірних втрат на вихрові струми, і їхні конструкції пом'якшили цей ефект за допомогою сердечників, що склалися з пучків ізолюваних залізних проводів. Пізніші конструкції створили сердцевину шляхом укладання шарів тонких сталевих пластин, принцип, який залишився у використанні. Кожна пластина ізолювана від сусідів тонким непровідним шаром ізоляції. Універсальне рівняння ЕРС трансформатора можна використовувати для обчислення площі поперечного перерізу сердечника для бажаного рівня магнітного потоку.



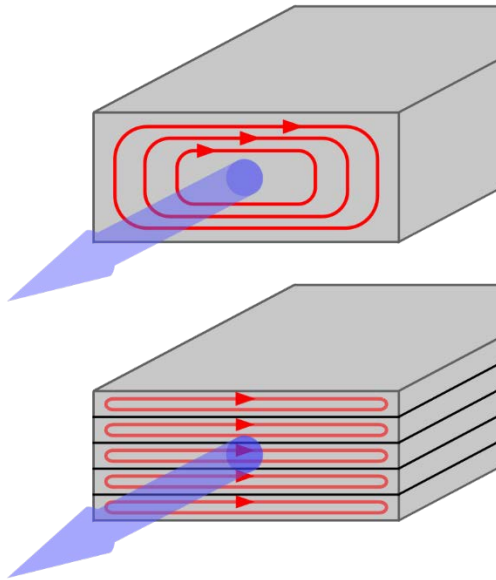
*Трансформатор із ламінованим сердечником із краєм ламінацій у верхній частині фотографії*

Ефект ламінування полягає в тому, щоб обмежувати вихрові струми високоеліптичними шляхами, які охоплюють невеликий потік, і таким чином зменшують їх величину. Більш тонкі пластини зменшують втрати, але є більш трудомісткими та дорогими у виготовленні. Тонкі пластини зазвичай використовуються на високочастотних трансформаторах, причому деякі з дуже тонких сталевих шарів здатні працювати на частоті до 10 кГц.



Одна з поширених конструкцій ламінованого сердечника виготовляється з переплетених стопок Е-подібних сталевих листів, закритих І-подібними шматками, що призвело до його назви «Е-І трансформатор». Така конструкція, як правило, має більші втрати, але є дуже економічною у виготовленні. Вирізаний або С-сердечник виготовляється шляхом намотування сталевих смуги навколо прямокутної форми, а потім з'єднання шарів разом. Потім його розрізають на дві частини, утворюючи дві форми С, а сердцевину збирають шляхом зв'язування двох половин С між собою сталевим ремінцем.[32] Вони мають перевагу в тому, що потік завжди орієнтований паралельно зернам металу, зменшуючи опір.

Реманентність сталевих сердечників означає, що він зберігає статичне магнітне поле при відключенні живлення. Коли живлення потім подається знову, залишкове поле спричинить високий пусковий струм, доки ефект магнетизму, що залишився, не зменшиться, зазвичай після кількох циклів застосованої форми хвилі змінного струму. Пристрої захисту від перевантаження струму, такі як запобіжники, повинні бути вибрані, щоб забезпечити проходження цього нешкідливого стрибка.



*Ламінування сердцевини значно зменшує втрати на вихровий струм.*

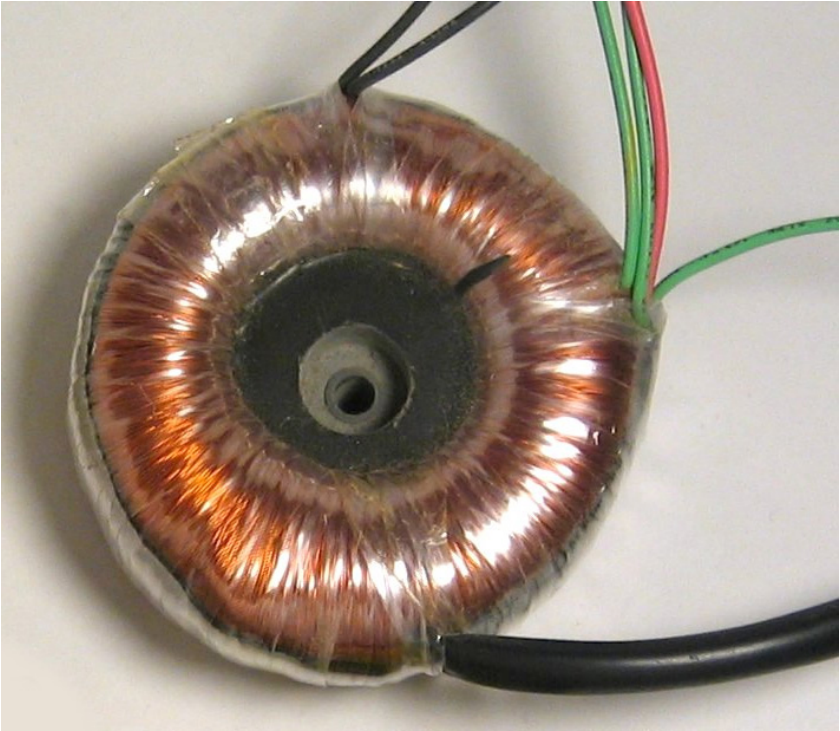
На трансформаторах, підключених до довгих повітряних ліній електропередачі, індуковані струми через геомагнітні збурення під час сонячних бур можуть спричинити насичення осердя та спрацювання пристроїв захисту трансформаторів.

Розподільні трансформатори можуть досягати низьких втрат на холостому ході, використовуючи сердечники, виготовлені з кремнієвої сталі з низькими втратами і високою проникністю або аморфного (некристалічного) металевих сплаву.

Вища початкова вартість матеріалу сердечника компенсується протягом терміну служби трансформатора його меншими втратами при невеликому навантаженні.

**Суцільні магнітопроводи трансформатора.** Порошкові залізні сердечники використовуються в таких схемах, як блоки живлення з імпульсним режимом, які працюють вище частоти мережі і до кількох десятків кілогерц. Ці матеріали поєднують високу магнітну проникність з високим питомим електричним опором. Для частот, що виходять за межі діапазону УКХ, поширені сердечники, виготовлені з непровідних магнітних керамічних матеріалів, які називаються феритами. Деякі радіочастотні трансформатори також мають рухомі сердечники (іноді їх називають «заглушками»), які дозволяють регулювати коефіцієнт зв'язку (і пропускну здатність) налаштованих радіочастотних кіл.

**Тороїдальні сердечники.** Тороїдальні трансформатори побудовані навколо кільцеподібного сердечника, який, залежно від робочої частоти, виготовляється з довгої смуги кремнієвої сталі або пермаллою, намотаної в котушку, порошкоподібного заліза або фериту. Конструкція стрічки забезпечує оптимальне вирівнювання меж зерен, покращуючи ефективність трансформатора за рахунок зменшення опору сердечника. Замкнута кільцева форма усуває повітряні зазори, властиві конструкції сердечника Е-І. Перетин кільця зазвичай квадратний або прямокутний, але доступні й дорожчі сердечники з круглим перерізом. Первинна і вторинна котушки часто намотані концентрично, щоб покрити всю поверхню сердечника. Це мінімізує необхідну довжину дроту та забезпечує екранування, щоб мінімізувати магнітне поле сердечника від створення електромагнітних перешкод.



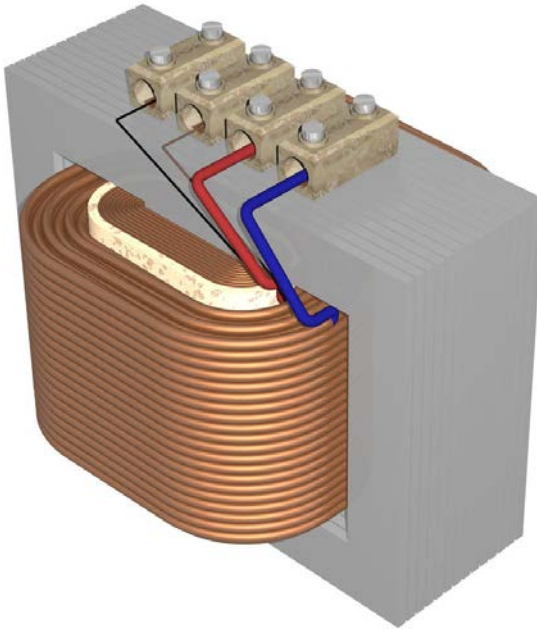
*Невеликий тороїдальний трансформатор*

Тороїдальні трансформатори більш ефективні, ніж дешевші ламіновані типи E-I для подібного рівня потужності. Інші переваги порівняно з типами EI включають менший розмір (приблизно наполовину), меншу вагу (приблизно наполовину), менший механічний гул (що робить їх кращими в аудіопідсилювачах), нижче зовнішнє магнітне поле (приблизно одну десяту), низькі втрати при розвантаженні (що робить їх більш ефективними в режимах очікування), кріплення одним болтом і більший вибір форм. Основними недоліками є висока вартість та обмежена потужність. Через відсутність залишкового зазору в магнітному тракті тороїдні трансформатори також мають тенденцію демонструвати більший пусковий струм, порівняно з ламінованими типами E-I.

Феритові тороїдні сердечники використовуються на більш високих частотах, як правило, від кількох десятків кілогерц до сотень мегагерц, щоб зменшити втрати, фізичні розміри та вагу індуктивних компонентів. Недоліком конструкції тороїдального трансформатора є більш високі витрати праці на обмотку. Це пояснюється тим, що необхідно пропускати всю довжину котушки через отвір сердечника щоразу, коли до котушки додається один виток. Як наслідок, тороїдні трансформатори потужністю більше кількох кВА зустрічаються рідко. Відносно небагато тороїдів пропонуються з номінальною потужністю вище 10 кВА і практично жодного з потужністю вище 25 кВА. Невеликі розподільні трансформатори

можуть досягти деяких переваг тороїдального сердечника, розщеплюючи його та примусово відкриваючи, а потім вставляючи шпульку, що містить первинну та вторинну обмотки.

**Обмотки.** Електричний провідник, який використовується для обмоток, залежить від застосування, але в усіх випадках окремі витки повинні бути електрично ізолювані один від одного, щоб гарантувати, що струм проходить через кожен виток. Для невеликих трансформаторів, в яких струми низькі, а різниця потенціалів між сусідніми витками мала, котушки часто намотують з емальованого магнітного дроту. Більші силові трансформатори можуть бути намотані мідними прямокутними стрічковими провідниками, ізолюваними папером, просоченим маслом, і блоками пресового картону.



*Обмотки зазвичай розташовані концентрично, щоб мінімізувати витік потоку.*

Високочастотні трансформатори, що працюють на частотах від десятків до сотень кілогерц, часто мають обмотки з плетеного літцевого дроту для мінімізації втрат від скін-ефекту та ефекту близькості. Великі силові трансформатори також використовують багатожильні провідники, оскільки навіть на низьких частотах потужності в іншому випадку існував би нерівномірний розподіл струму у сильнотумових обмотках. Кожна жила окремо ізолювана, а жили розташовані так, що в певних точках обмотки або по всій обмотці кожна частина займає різні взаємні положення в повному провіднику. Транспозиція вирівнює струм, що протікає в кожній жилі провідника, і зменшує втрати на вихрові струми в самій обмотці.

Багатожильний провідник також більш гнучкий, ніж суцільний провідник аналогічного розміру, що сприяє виготовленню.

Обмотки сигнальних трансформаторів мінімізують індуктивність розсіювання та паразитну ємність для покращення високочастотної характеристики. Котушки розбиваються на секції, і ці секції чергуються між секціями іншої обмотки.

Силкові трансформатори частоти можуть мати відводи в проміжних точках на обмотці, зазвичай на стороні обмотки вищої напруги, для регулювання напруги. Відгалуження можна повторно під'єднати вручну, або можна надати ручний або автоматичний перемикач для зміни відгалужень.

**Охолодження трансформаторів.** Невеликі трансформатори сухого і рідинного типу часто самоохолоджуються за рахунок природної конвекції та випромінювання тепла. Зі збільшенням номінальної потужності трансформатори часто охолоджуються за допомогою примусового повітряного охолодження, примусового масляного охолодження, водяного охолодження або їх комбінації.[42] Великі трансформатори заповнені трансформаторним маслом, яке одночасно охолоджує та ізолює обмотки.[43] Трансформаторне масло - це високоочищене мінеральне масло, яке охолоджує обмотки та ізолює шляхом циркуляції в баку трансформатора. Система ізоляції мінеральних масел і паперу детально вивчена та використовується вже більше 100 років. Підраховано, що 50% силових трансформаторів втримають 50 років експлуатації, що середній вік виходу з ладу силових трансформаторів становить приблизно 10-15 років, і що близько 30% відмов силових трансформаторів пов'язані з порушенням ізоляції та перевантаженням.[ 44][45] Тривала робота при підвищеній температурі погіршує ізоляційні властивості ізоляції обмотки та діелектричного теплоносія, що не тільки скорочує термін служби трансформатора, але й може призвести до катастрофічного виходу з ладу.[41] Випробування трансформаторного масла, включаючи аналіз розчиненого газу, надає цінну інформацію про технічне обслуговування.

Основним правилом є те, що тривалість життя електричної ізоляції скорочується вдвічі приблизно на кожні 7 °C до 10 °C підвищення робочої температури (приклад застосування рівняння Арреніуса).

Будівельні норми в багатьох юрисдикціях вимагають, щоб внутрішні трансформатори, заповнені рідиною, використовували діелектричні рідини, менш займісті, ніж масло, або встановлювалися у вогнестійких приміщеннях. Сухі трансформатори з повітряним охолодженням можуть бути більш економічними, якщо вони виключають вартість вогнетривкого трансформаторного приміщення.



*Вид у розрізі зануреного в рідину трансформатора. Розширювач (резервуар) у верхній частині забезпечує ізоляцію рідини від атмосфери при зміні рівня охолоджуючої рідини та температури. Стінки та ребра забезпечують необхідну тепловіддачу.*

Бак наповнених рідиною трансформаторів часто має радіатори, через які рідкий теплоносій циркулює за допомогою природної конвекції або ребра. Деякі великі трансформатори використовують електричні вентилятори для примусового повітряного охолодження, насоси для примусового рідинного охолодження або мають теплообмінники для водяного охолодження. Масляний трансформатор

може бути оснащений реле Бухгольца, яке, залежно від ступеня скупчення газу внаслідок внутрішньої дуги, використовується для сигналізації або знеструмлення трансформатора. Установки трансформаторів із зануренням в масло зазвичай включають заходи протипожежного захисту, такі як стіни, герметичність мастила та системи пожежогасіння.

Поліхлоровані біфеніли (ПХБ) мають властивості, які колись сприяли їх використанню в якості діелектричного охолоджувача, хоча занепокоєння щодо їх стійкості до навколишнього середовища призвело до широкого поширення заборони на їх використання. Сьогодні можна використовувати нетоксичні, стабільні масла на основі силікону або фторовані вуглеводні, якщо витрати на вогнестійку рідину компенсують додаткові витрати на будівництво трансформаторного сховища.

Деякі трансформатори мають газову ізоляцію. Їх обмотки укладені в герметичні ємності під тиском і охолоджуються газоподібним гексафторидом азоту або сірки.

Експериментальні силові трансформатори в діапазоні від 500 до 1000 кВА були побудовані з надпровідними обмотками, що охолоджуються рідким азотом або гелієм, що усуває втрати в обмотці, не впливаючи на втрати в сердцевині.

**Ізоляція.** Міжштовка ізоляція малих трансформаторів може представляти собою шар ізоляційного лаку на проводі. Між шарами обмоток, а також між первинною і вторинною обмотками може бути вставлений шар паперу або полімерної плівки. Трансформатор може бути покритий або занурений у полімерну смолу, щоб підвищити міцність обмоток і захистити їх від вологи або корозії. Смола може бути просочена в ізоляцію обмотки за допомогою комбінації вакууму і тиску під час процесу нанесення покриття, усуваючи всі повітряні порожнечі в обмотці. У обмеженому обсязі вся котушка може бути поміщена в форму, і смола відлита навколо неї як суцільний блок, що інкапсулює обмотки

Ізоляція повинна бути забезпечена між окремими витками обмоток, між обмотками, між обмотками та сердечником, а також на клеммах обмотки.

Великі масляні силові трансформатори використовують обмотки, обмотані ізоляційним папером, який просочується маслом під час складання трансформатора. Маслонаповнені трансформатори використовують високоочищене мінеральне масло для ізоляції та охолодження обмоток і сердечника. Конструкція маслонаповнених трансформаторів вимагає, щоб ізоляція, що покриває обмотки, була ретельно висушена від залишкової вологи перед введенням масла. Висушування може здійснюватися шляхом циркуляції гарячого повітря навколо сердечника, шляхом циркуляції трансформаторного масла з зовнішнім підігрівом або шляхом сушіння в паровій фазі (VPD), коли випарений розчинник передає тепло шляхом конденсації на котушці та сердечнику. Для невеликих трансформаторів використовується нагрів опором шляхом введення струму в обмотки.

### Параметри класифікації

Трансформатори можна класифікувати багатьма способами, наприклад:

- Номінальна потужність: від частки вольт-ампера (ВА) до понад тисячу МВА.

## Електричні машини

- Робота трансформатора: безперервна, короткочасна, переривчаста, періодична, змінна.
- Частотний діапазон: Силова частота, звукова частота або радіочастота.
- Клас напруги: від кількох вольт до сотень кіловольт.
- Тип охолодження: сухе або рідинне; самоохолодження, примусове повітряне охолодження; примусове масляне охолодження, водяне.
- Застосування: джерело живлення, узгодження імпедансу, стабілізатор вихідної напруги та струму, імпульс, ізоляція ланцюгів, розподіл живлення, випрямляч, дугова піч, вихід підсилювача тощо.
- Основна магнітна форма: форма ядра, форма оболонки, концентрична, сандвіч.
- Deskриптор трансформатора постійного потенціалу: підвищення, зниження, ізоляція.
- Загальна конфігурація обмотки: за групою векторів ІЕС, комбінації двох обмоток фазових позначень трійка, напрямок або зірка та зигзаг; автотрансформатор, Scott-T
- Конфігурація обмотки фазового зсуву випрямляча: 2-обмоткова, 6-імпульсна; 3-обмотковий, 12-імпульсний; . . . n-обмотка,  $[n-1]*6$ -імпульс; багатокутник; тощо.



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Електротранспорт — вид транспорту, що використовує як джерело енергії електрику, а в приводі використовується один або кілька електродвигунів для руху.

Електричний транспортний засіб може живитися від колекторної системи, електрикою від позаавтомобільних джерел, або може житися автономно від батареї (іноді заряджається від сонячних панелей, або шляхом перетворення палива в електрику за допомогою паливних елементів або генератора). Електромобілі включають, але не обмежуються ними, автомобільні та залізничні транспортні засоби, надводні та підводні судна, електричні літаки та електричні космічні кораблі.

Електромобілі вперше з'явилися в середині 19 століття, коли електрика була одним з переважних методів руху транспортних засобів, забезпечуючи рівень комфорту та простоти експлуатації, якого не могли досягти бензинові автомобілі того часу. Двигуни внутрішнього згоряння були домінуючим методом руху легкових і вантажних автомобілів протягом приблизно 100 років, але електрична енергія залишалася звичним явищем в інших типах транспортних засобів, таких як потяги та менші транспортні засоби всіх типів.

Основними перевагами електротранспорту перед транспортом із двигунами зовнішнього або внутрішнього згоряння є більш висока продуктивність та екологічність.

У 21 столітті електромобілі відроджуються через технологічні розробки та посилення уваги на відновлювані джерела енергії та потенційне зменшення впливу транспорту на зміну клімату та інші екологічні проблеми

Урядові стимули для посилення впровадження були вперше запроваджені наприкінці 2000-х, у тому числі в Сполучених Штатах та Європейському Союзі, що призвело до зростання ринку транспортних засобів у 2010-х. У 2021 році Міжнародне енергетичне агентство заявило, що уряди повинні робити більше для досягнення кліматичних цілей, включаючи політику щодо важких електромобілів.

Енергія, що приводить у рух транспортний засіб, може бути отримана з кількох джерел:

- з хімічної енергії бортових батарей та акумуляторів (електромобіль, електробус тощо);
- із запасеної енергії в конденсаторах (капабус)
- спільно з бортового акумулятора та паливної силової установки (гібридний автомобіль);
- вироблятися на борту, використовуючи бензиновий двигун або дизельний двигун (тепловоз, кар'єрний самоскид тощо);
- вироблятися на борту, використовуючи паливні елементи;
- вироблятися на борту, використовуючи атомну енергію (атомний підводний човен, авіаносець);
- з більш екзотичних джерел, таких як маховики, вітер та Сонце (гіробус, електромобілі на сонячних батареях);
- шляхом прямого підключення до наземної електростанції через підстанції (трамвай, тролейбус, монорейка, метро, електропоїзд, електровоз тощо).

### Види електротранспорту

**Пасажи́рський електротранспорт.** У розвинених країнах електротранспорт є основним перевізником пасажирів усередині міста, на його частку припадає понад 50% перевезень. У країнах відсоток перевезень електротранспортом у містах становить від 15 %. Основними засобами міського пасажирського електротранспорту є трамваї, тролейбуси, метрополітен, електропоїзди, застосовуються також монорейки, фунікулери та ін.

- Електромобіль
- Електроскутер
- Електровелосипед

**Електричний транспортний засіб на акумуляторних батареях (battery electric vehicle – BEV).** Повністю електричний транспортний засіб – це тип транспортного засобу, який використовує виключно хімічну енергію, що зберігається в акумуляторних батареях, без вторинного джерела руху (наприклад, водню, паливного елемента, двигуна внутрішнього згоряння тощо). BEV використовують електродвигуни та контролери двигунів замість двигунів внутрішнього згоряння (ДВС) для руху. Вони отримують всю енергію від акумуляторних батарей і, таким чином, не мають двигуна внутрішнього згоряння, паливних елементів або паливного бака. BEV включають – але не обмежуються ними – мотоцикли, велосипеди, скутери, скейтборди, залізничні вагони, водні транспортні засоби, навантажувачі, автобуси, вантажівки та автомобілі.

У 2016 році в усьому світі щодня використовувалося 210 мільйонів електровелосипедів. У вересні 2016 року загальний глобальний обсяг продажів легких електромобілів, які працюють на шосе, перевищив віху в один мільйон одиниць.

**Гібри́дний електричний транспортний засіб. Гібри́дний електричний транспортний засіб (hybrid electric vehicle — HEV)** — це тип транспортного засобу, який поєднує в собі звичайну систему **двигуна внутрішнього згоряння (internal combustion engine — ICE)** з електричною силовою установкою. Електрична установка призначена для досягнення або кращої економії палива, ніж звичайний автомобіль, або кращої продуктивності. Існує безліч типів гібридних транспортних засобів, і ступінь виконання кожного з них як електромобіля також різниться. Найпоширенішою формою гібридного транспортного засобу є гібридні електромобілі, хоча існують також гібридні електровантажівки (пікапи та трактори), автобуси, човни та літаки.

Сучасні гібридні транспортні засоби використовують технології підвищення ефективності, такі як рекуперативні гальма, які перетворюють кінетичну енергію автомобіля в електричну, яка зберігається в акумуляторі або суперконденсаторі. Деякі різновиди гібридних транспортних засобів використовують двигун внутрішнього згоряння для обертання електричного генератора, який або заряджає акумулятори автомобіля, або безпосередньо живить його електродвигуни; ця комбінація відома як двигун-генератор. Багато гібридних

## Електричний транспорт

транспортних засобів зменшують викиди на холостому ходу, вимикаючи двигун на холостому ходу та перезапускаючи його, коли це необхідно; ця технологія відома як система старт-стоп. Гібридно-електричний двигун виробляє менші викиди у вихлопну трубу, ніж бензиновий автомобіль порівнянного розміру, оскільки бензиновий двигун гібрида зазвичай менший, ніж у автомобіля з бензиновим двигуном. Якщо двигун не використовується для керування автомобілем безпосередньо, його можна налаштувати на максимальну ефективність, що ще більше підвищить економію палива.

**Вантажний електротранспорт.** Вантажний електротранспорт застосовується у перевезеннях, що потребують великого ККД транспортного засобу, наприклад вантажні тролейбуси застосовуються на відкритих кар'єрах, а електропоїзди та електровози постійного та змінного струму використовуються на залізницях. Також до вантажного електротранспорту належать електрокари, електровізки, електротягачі, електронавантажувачі, деякі види самохідних кранів та екскаваторів.

**Індивідуальний електротранспорт.** До індивідуального електротранспорту відносяться сегвей, гіроскутер, електросамокат, моноколесо та електровелосипед. Правовий статус індивідуального електротранспорту визначено у Росії неоднозначно. Чинні правила дорожнього руху спеціально не відносять ці транспортні засоби до якогось окремого виду транспорту.

**Інші види електротранспорту.** Практично будь-який неелектричний двигун можна замінити на електричний. Відповідно будь-який транспортний засіб, що використовує для руху неелектричний двигун (ДВЗ, дизельний двигун, паровий двигун та ін) може використовувати як тягу і електричний двигун.

Існують у вигляді розробок, дрібних копій чи серій різні електротранспортні засоби:

- електричний літак (літаки на електричній тязі),
- електромобілі, гіробуси, електробуси.

### Джерела електроенергії для електротранспорту

Існує багато способів виробництва електроенергії різної вартості, ефективності та екологічної доцільності.

**Підключення до генераторних установок.** Пряме підключення до електростанцій, як це звичайно для електричок, трамваїв, тролейбусів та тролейбусів (Див. Також: повітряні лінії, третій залізничний та трубопровід)

Онлайн електромобіль збирає електроенергію з електричних смуг, захованих під поверхнею дороги, за допомогою електромагнітної індукції

### Вбудовані генератори та гібридні електромобілі.

- Створюється на борту за допомогою дизельного двигуна: дизель-електричний локомотив та дизель-електричний мультягрегат;
- Генерується на борту з використанням паливного елемента: транспортного засобу з паливними елементами
- Генерується на борту з використанням ядерної енергії: атомні підводні човни та авіаносці

▪ Відновлювані джерела, такі як сонячна енергія: сонячний автомобіль  
Також можна мати гібридні електромобілі, які отримують електрику з різних джерел, таких як:

▪ Вбудована акумуляторна система накопичення електроенергії (RESS) і пряме безпервне з'єднання з наземними генеруючими установками для цілей підзарядки на шосе з необмеженим діапазоном автомобільних доріг

▪ Вбудована акумуляторна система накопичення електроенергії та джерело живлення з паливом (двигун внутрішнього згоряння): вбудований гібрид

Для особливо великих електромобілів, таких як підводні човни, хімічну енергію дизель-електрики можна замінити ядерним реактором. Ядерний реактор завжди забезпечує тепло, яке приводить в рух парову турбіну, яке приводить в рух генератор, який потім подається на рушій. Див. Ядерний морський рух.

Деякі експериментальні транспортні засоби, такі як деякі автомобілі та кілька літаків, використовують сонячні батареї для електроенергії.

**Вбудовані джерело енергії (Акумулятори енергії).** Ці системи живляться від зовнішньої генераторної установки (майже завжди в стаціонарному стані), а потім відключаються до початку руху, а електроенергія зберігається в автомобілі до необхідності.

▪ Повні електричні транспортні засоби. Способи накопичення електроенергії включають:

- Хімічна енергія, що зберігається на автомобілі в бортових акумуляторах: Електричний електромобіль (BEV), як правило, з літій-іонним акумулятором
- Зберігання кінетичної енергії: маховики
- Статична енергія, що зберігається на автомобілі в бортових електричних двошарових конденсаторах

Акумулятори, електричні двошарові конденсатори та накопичувач енергії маховика-це форми акумуляторних бортових систем зберігання електроенергії. Унікаючи проміжного механічного етапу, ефективність перетворення енергії можна покращити порівняно з гібридами, унікаючи непотрібних перетворень енергії. Крім того, перетворення електрохімічних батарей легко повернути назад, що дозволяє зберігати електричну енергію в хімічній формі.

**Літій-іонний акумулятор.** Більшість електромобілів використовують літій-іонні акумулятори (літій-іонні або LIB). Літій-іонні акумулятори мають більшу густину енергії, більший термін служби та вищу густину енергії, ніж більшість інших практичних акумуляторів. Ускладнюючі фактори включають безпеку, довговічність, термічний пробій та вартість. Для безпечної та ефективної роботи літій-іонні акумулятори слід використовувати в межах безпечних діапазонів температур і напруги. [35]

Збільшення терміну служби акумулятора знижує ефективні витрати. Один із способів полягає в тому, щоб одночасно керувати підмножиною елементів живлення акумулятора та перемикаючи ці підмножини.

У минулому нікель-металгідридні акумуляторні батареї використовувались у деяких електромобілях, наприклад у тих, що виготовлялися компанією General Motors. Ці типи акумуляторів вважаються застарілими через їх схильність до

## Електричний транспорт

саморозряду в спеку. Крім того, патент на цей тип акумуляторів був у власності компанії Chevron, що створило проблему для їх широкого розвитку [39]. Ці фактори разом з їх високою вартістю призвели до того, що літій-іонні акумулятори стали провідними акумуляторами для електромобілів.

Ціни на літій-іонні акумулятори постійно знижуються, що сприяє зниженню цін на електромобілі.



*Акумуляторний електричний автобус, що живиться від літій-іонних батарей*

**Електричний двигун в електротранспорті.** Потужність електродвигуна транспортного засобу, як і в інших машинах, вимірюється в кіловатах (кВт). Електродвигуни можуть доставити свій максимальний крутний момент у широкому діапазоні обертів. Це означає, що продуктивність автомобіля з електродвигуном потужністю 100 кВт перевищує показники автомобіля з двигуном внутрішнього згорання потужністю 100 кВт, який може доставити свій максимальний крутний момент лише в обмеженому діапазоні частоти обертання двигуна.

Ефективність зарядки значно змінюється в залежності від типу зарядного пристрою, а енергія втрачається під час процесу перетворення електричної енергії на механічну.

Зазвичай електроенергія постійного струму подається в інвертор постійного/змінного струму, де вона перетворюється на електрику змінного струму, і ця електрика змінного струму підключається до трифазного двигуна змінного струму.

Для електропоїздів, навантажувачів та деяких електромобілів часто використовуються двигуни постійного струму. У деяких випадках використовуються універсальні двигуни, і тоді можуть бути використані змінне або постійне живлення. В останніх автомобілях серійного виробництва були впроваджені різні типи двигунів; наприклад, асинхронні двигуни в автомобілях Tesla та машини з постійним магнітом у Nissan Leaf та Chevrolet Bolt.

**Тяговий двигун** — це електродвигун, який використовується для руху транспортних засобів, таких як локомотиви, електричні або водневі транспортні засоби, ліфти або електричні агрегати.

Тягові двигуни використовуються в залізничних транспортних засобах з електричним приводом та інших електричних транспортних засобах, включаючи електричні поплавки для молока, ліфти, американські гірки, конвеєри та тролейбуси, а також транспортні засоби з електричними системами передачі (дизель-електричні локомотиви, електричні гібридні транспортні засоби) та електромобілів з акумулятором.

**Типи двигунів та управління.** Двигуни постійного струму з послідовними обмотками збудження магнітного поля є найдавнішим типом тягових двигунів. Вони забезпечують характеристику швидкості-крутного моменту, корисну для руху, забезпечуючи високий крутний момент на менших швидкостях для прискорення автомобіля та зменшуючи крутний момент зі збільшенням швидкості. Влаштувавши обмотку поля з кількома відводами, можна змінювати характеристику швидкості, що дає змогу водієві відносно плавно керувати прискоренням. Подальший захід контрольно забезпечується використанням двигунів на транспортному засобі в послідовно-паралельному управлінні; для повільної роботи або великих навантажень два двигуни можуть працювати послідовно від джерела постійного струму. Там, де бажана більша швидкість, ці двигуни можуть працювати паралельно, забезпечуючи доступність більшої напруги на кожному і таким чином дозволяючи більш високі швидкості. Частина залізничної системи можуть використовувати різну напругу, з більшою напругою в тривалих пробігах між станціями та нижчою напругою поблизу станцій, де потрібна лише повільна робота.

Варіантом системи постійного струму є двигун серії змінного струму, також відомий як універсальний двигун, який по суті є тим самим пристроєм, але працює на змінному струмі. Оскільки як у якорі, так і у обмотках збудження струм змінюються одночасно, поведінка двигуна подібна до того, коли він під напругою від постійного струму. Для досягнення кращих умов експлуатації залізниці змінного струму часто отримують струм на меншій частоті, ніж комерційне живлення, що використовується для загального освітлення та живлення; використовуються спеціальні електростанції тягового струму або роторні перетворювачі, що використовуються для перетворення комерційної потужності 50 або 60 Гц на частоту 25 Гц або  $16+2/3$  Гц, що використовуються для тягових двигунів змінного струму. Система змінного струму дає змогу ефективно розподіляти потужність по довжині залізничної лінії, а також дає змогу регулювати швидкість за допомогою розподільних пристроїв на транспортному засобі.

Асинхронні двигуни змінного струму та синхронні двигуни прості і невибагливі в обслуговуванні, але їх незручно застосовувати для тягових двигунів через їх фіксовану швидкість. Асинхронний двигун змінного струму генерує корисну кількість потужності лише у вузькому діапазоні швидкостей, що визначається його конструкцією та частотою джерела живлення змінного струму. Поява силових напівпровідників дала змогу встановити привід зі змінною частотою на локомотив; це дозволяє широкий діапазон швидкостей, передачу потужності змінного струму та міцні асинхронні двигуни без зношуваних деталей, таких як щітки та комутатори.

## Електричний транспорт

### Залізничний електротранспорт

Система електрифікації залізниці забезпечує електроенергією залізничні поїзди та трамваї без бортового двигуна або місцевого постачання палива. Електричні залізничні використовують або електровози (перевезення пасажирів або вантажів в окремих вагонах), електричні багатоконпонентні агрегати (пасажирські вагони з власними двигунами) або обидва варіанти. Електрика, як правило, виробляється на великих і відносно ефективних генеруючих станціях, передається до залізничної мережі та розподіляється до поїздів. Деякі електричні залізниці мають власні виділені генеруючі станції та лінії електропередачі, але більшість купує електроенергію у електричних компаній. Залізниця зазвичай забезпечує власні розподільні лінії, стрілки та трансформатори.



Живлення подається до рухомих потягів із (майже) безперервним провідником, що проходить уздовж колії, який зазвичай має одну з двох форм: повітряна лінія, підвішена на стовпах або опорах вздовж колії, або на перекритті конструкції чи тунелю, або третя рейка, встановлена на рівень доріжки та зв'язаний ковзним «підхоплювальним башмаком». В системах з повітряним проводом і третьою рейкою зазвичай використовуються рейки як зворотний провідник, але деякі системи використовують для цієї мети окрему четверту рейку.

У порівнянні з основною альтернативою, дизельним двигуном, електричні залізниці пропонують значно кращу енергоефективність, менші викиди та нижчі експлуатаційні витрати. Електровози також зазвичай тихіші, потужніші, чуйніші та надійніші, ніж дизелі. Вони не мають місцевих викидів, що є важливою перевагою

в тунелях і міських районах. Деякі системи електричної тяги забезпечують рекуперативне гальмування, яке перетворює кінетичну енергію поїзда назад в електрику і повертає її в систему живлення для використання іншими поїздами або загальною комунальною мережею. У той час як тепловози спалюють нафтопродукти, електроенергію можна виробляти з різних джерел, включаючи відновлювані джерела енергії. Історично побоювання щодо ресурсної незалежності відігравали певну роль у прийнятті рішення про електрифікацію залізничних ліній. Не має виходу до моря Швейцарська конфедерація, яка майже повністю не має родовищ нафти або вугілля, але має багато гідроенергетики, частково електрифікувала свою мережу у відповідь на проблеми постачання під час обох світових воєн.

Недоліки електричної тяги включають: високі капітальні витрати, які можуть бути неекономічними на маршрутах із слабким рухом транспорту, відносно недостатню гнучкість (оскільки електропоїздам потрібні треті рейки або повітряні дроти) та вразливість до перебоїв у подачі електроенергії. Електро-дизельні локомотиви та електродизельні багаторазові агрегати дещо пом'якшують ці проблеми, оскільки вони здатні працювати на дизельному двигуні під час відключення або на неелектрифікованих маршрутах.

Протягом останніх десятиліть електрифікація залізниць постійно збільшується, і станом на 2012 рік електрифіковані колії становлять майже одну третину загальної кількості колій у всьому світі.

**Історія залізничного електротранспорту.** Перший відомий електровоз був побудований в 1837 році хіміком Робертом Девідсоном з Абердіна в Шотландії, і він живився від гальванічних елементів (батарей). Таким чином, це був також найперший акумуляторний електровоз. Пізніше Девідсон побудував більший локомотив на ім'я Galvani, виставлений на виставці Королівського шотландського товариства мистецтв у 1841 році. Семитонний транспортний засіб мав два реактивні двигуни з прямим приводом, з нерухомими електромагнітами, що діють на залізні прутки, прикріплені до дерев'яного циліндра на кожній осі. і прості комутатори. Він тягнув вантаж у шість тонн зі швидкістю чотири милі на годину (6 кілометрів на годину) на відстань у півтори милі (2,4 кілометра). Він був випробуваний на залізниці Единбурга та Глазго у вересні наступного року, але обмежена потужність від батарей не дозволяла його широко використовувати. Його знищили залізничники, які бачили в ньому загрозу безпеці своєї роботи.

Вернер фон Сіменс продемонстрував електричну залізницю в 1879 році в Берліні. Перша в світі електрична трамвайна лінія Gross-Lichterfelde Tramway була відкрита в Ліхтерфельде поблизу Берліна, Німеччина, у 1881 році. Її побудувала компанія Siemens. Трамвай працював від 180 вольт постійного струму, який живився від ходових рейок. У 1891 році колію обладнали повітряним проводом, і лінію продовжили до станції Берлін-Ліхтерфельде Західна. Електрична залізниця Фолька була відкрита в 1883 році в Брайтоні, Англія. Залізниця все ще діє, що робить її найстарішою діючою електричною залізницею у світі. Також у 1883 році біля Відня в Австрії відкрився трамвай Mödling і Hinterbrühl. Це була перша трамвайна лінія в світі, яка працює від повітряної лінії. П'ять років потому в США електричні візки були вперше запроваджені в 1888 році на пасажирській залізниці Річмонд Юніон, використовуючи обладнання, розроблене Френком Дж. Спрагом.



Перше використання електрифікації на головній лінії було на чотиримильній ділянці Балтіморської залізниці Балтімор і Огайо (В&О) у 1895 році, яка з'єднала основну частину В&О з новою лінією до Нью-Йорка через серію тунелів по краях центру Балтімора. Електрика швидко стала джерелом живлення для метрополітену, що сприяло винаходу Sprague системи керування поїздом із кількома одиницями в 1897 році. На початку 1900-х років більшість вуличних залізниць було електрифіковано.

Лондонське метро, найстаріша підземна залізниця в світі, була відкрита в 1863 році, і в 1890 році вона почала працювати за допомогою четвертої залізничної системи на залізниці Сіті та Південного Лондона, яка нині є частиною північної лінії Лондонського метро. Це була перша велика залізниця, яка використовувала електричну тягу. Перша в світі електрична залізниця глибокого рівня, вона проходить від лондонського Сіті, під річкою Темзою, до Стоквелла на півдні Лондона.

Перший практичний електровоз змінного струму був розроблений Чарльзом Брауном, який тоді працював на Ерлікон, Цюріх. У 1891 році Браун продемонстрував передачу електроенергії на великі відстані за допомогою трифазного змінного струму між гідроелектростанцією в Лауффен-ам-Неккарі і Франкфуртом-на-Майні-Захід на відстані 280 км. Використовуючи досвід, який він набув під час роботи з Жаном Хайльманом над проектуванням пароелектричних локомотивів, Браун помітив, що трифазні двигуни мають вищу відношення потужності до ваги, ніж двигуни постійного струму, і через відсутність комутатора їх простіше виготовляти, і підтримувати. Однак вони були набагато більшими, ніж двигуни постійного струму того часу, і їх не можна було встановлювати в підлогових візках: їх можна було перевозити лише в кузовах локомотивів.

У 1894 році угорський інженер Кальман Кандо розробив новий тип 3-фазних асинхронних електродвигунів і генераторів для електровозів. Проекти Кандо початку 1894 року були вперше застосовані в короткому трифазному трамваї змінного струму в Евіан-ле-Бен (Франція), який був побудований між 1896 і 1898 роками.

У 1896 році Ерлікон встановив перший комерційний зразок системи на трамваї Лугано. Кожен локомотив вагою 30 тонн мав два двигуни потужністю 110 кВт (150 к. с.), які працювали від трифазних 750 В 40 Гц, що живляться від подвійних повітряних ліній. Трифазні двигуни працюють з постійною швидкістю та забезпечують рекуперативне гальмування та добре підходять для маршрутів із крутими укладами, а перші магістральні трифазні локомотиви були поставлені Брауном (на той час у партнерстві з Уолтером Бовері) у 1899 році на 40 км Лінія Бургдорф-Тун, Швейцарія.

Італійські залізниці першими в світі запровадили електричну тягу для всієї довжина основної лінії, а не короткої ділянки. 106-кілометрова лінія Вальтелліна була відкрита 4 вересня 1902 року за проектом Кандо та команди з заводу Ганца. Електрична система була трифазною на 3 кВ 15 Гц. У 1918 році Кандо винайшов і розробив обертовий фазовий перетворювач, який дозволив електровозам використовувати трифазні двигуни, які живляться по одному повітряному дроту, що передає просту промислову частоту (50 Гц) однофазний змінний струм високовольтних національних мереж.

Важливий внесок у ширше поширення тяги змінного струму зробив SNCF Франції після Другої світової війни. Компанія провела випробування на змінному струмі 50 Гц і встановила його як стандарт. Після успішних випробувань SNCF частота 50 Гц, яку тепер також називають промисловою частотою, була прийнята як стандарт для магістральних ліній по всьому світу.

### Тролейбус

*Тролейбус (trolleybus)* – це електричний автобус, який живиться від подвійних повітряних проводів (зазвичай підвішені на придорожніх стовпах) за допомогою підпружинених троллейбусних штанг. Для замикання електричного кола потрібні два дроти і дві штанги. Це відрізняється від трамваїв, які зазвичай використовують колію як зворотний шлях, для чого потрібен лише один провід і один стовп (або пантограф). Вони також відрізняються від інших видів електробусів, які зазвичай працюють на акумуляторах. Живлення найчастіше подається як постійний струм напругою 600 вольт, але бувають винятки.



Наразі в містах 43 країн функціонує близько 300 троллейбусних систем.

*Переваги у порівнянні з трамваями*

- Дешева інфраструктура – початкова вартість запуску трамваїв значно вища через залізницю, сигнали та іншу інфраструктуру. Тролейбуси можуть з'їжджати на узбіччя, як і інші автобуси, що не потребує спеціальних посадкових станцій або посадкових островців посеред вулиці, тому станції можна переміщати за потреби.
- Краще підйом на гору – гумові шини троллейбусів мають кращу адгезію, ніж сталеві колеса трамваїв на сталевих рейках, що забезпечує кращу здатність підніматися на гору та гальмувати.

- Простіший уникнення руху – на відміну від трамваїв (де бічні колії часто недоступні), транспортний засіб, що не працює, можна перемістити на узбіччя дороги, а його тролейбусні стовпи опустити. Здатність їхати на значну відстань від проводів електроживлення дозволяє безколісним транспортним засобам уникати перешкод, хоча це також означає можливість того, що транспортний засіб може керувати або заноситися настільки далеко, що стовп візка більше не зможе досягти дроту, застрягаючи транспортний засіб. Безколісні візки також можуть уникати зіткнень, маневруючи навколо перешкод, подібно до автобусів та інших дорожніх транспортних засобів, а трамваї можуть лише змінювати швидкість.

- Тиша – тролейбуси, як правило, тихіші, ніж трамваї.

- Простіша підготовка – керування тролейбусами відносно подібне до автобусів; потенційний пул операторів для всіх автобусів набагато більший, ніж для трамваїв.

### *Переваги у порівнянні з автобусами*

- Краще підйом на гору – тролейбуси краще, ніж автобуси на горбистих маршрутах, оскільки електродвигуни забезпечують набагато більший статичний крутний момент при запуску, що є перевагою для підйому на круті пагорби. На відміну від двигунів внутрішнього згоряння, електродвигуни отримують енергію від центральної установки і можуть бути перевантажені протягом коротких періодів без пошкоджень. Сан-Франциско та Сіетл, обидва горбисті американські міста, частково використовують тролейбуси з цієї причини. Враховуючи свої характеристики прискорення та гальмування, тролейбуси можуть перевершувати дизельні автобуси і на рівнинних ділянках, що робить їх кращими для маршрутів із частими зупинками.

- Екологічно чисті – тролейбуси, як правило, більш екологічні в місті, ніж транспортні засоби, що працюють на викопному паливі або вуглеводні (бензин/бензин, дизельне паливо, алкоголь тощо). Потужність від централізованої установки, навіть з урахуванням втрат в трансмісії, часто виробляється ефективніше, не прив'язана до певного джерела палива і більш піддається контролю забруднення як точкове джерело, на відміну від окремих транспортних засобів з вихлопними газами та частками на вулиці. рівень. Тролейбуси особливо користуються перевагою там, де електроенергія в достатку, дешева та поновлювана, наприклад, гідроелектростанція. Системи в Сіетлі та Ванкувері, Британська Колумбія, отримують гідроенергію з річки Колумбія та інших тихоокеанських річкових систем. Сан-Франциско керує своєю системою, використовуючи гідроенергію міської електростанції Hetch Hetchy.

- Тролейбуси можуть виробляти електроенергію з кінетичної енергії під час гальмування, процес, відомий як рекуперативне гальмування. Щоб рекуперативне гальмування функціонувало, на тій самій ланцюзі має бути інша шина, яка потребує живлення, електрична система накопичення на транспортному засобі або система дротів, або спосіб передачі надлишкової потужності назад до комерційної електричної системи. В іншому випадку енергія гальмування повинна бути розсіяна в сітках опору на шині; це називається «динамічне гальмування». Використання тролейбусів також усуває забруднення під час холостого ходу, покращуючи таким чином якість повітря.

▪ Мінімальне шумове забруднення – на відміну від трамваїв чи автобусів на бензині та дизелі, тролейбуси майже безшумні, не мають шуму двигуна внутрішнього згоряння чи коліс на рейках. Більшість шуму надходить від допоміжних систем, таких як насоси гідропідсилювача керма та кондиціонер. Ранні тролейбуси без цих систем були ще тихішими, і у Сполученому Королівстві їх іноді називали «Silent Service». Однак це також можна розглядати як недолік, оскільки деякі пішоходи стають жертвами того, що було відомо як «Тиха смерть» (у Британії) або «Смерть шепоту» (в Австралії).

▪ Можливість використання в закритих приміщеннях – відсутність вихлопу дозволяє тролейбусам працювати під землею. У Кембриджі, штат Массачусетс, безколіїні тролейбуси збереглися, тому що Гарвардський вокзал, де закінчуються кілька автобусних ліній, знаходиться в тунелі, яким колись їздили трамваї. Хоча дизельні автобуси користуються тунелем, існують обмеження через вихлопні гази. Крім того, безрейкові візки продовжують користуватися популярною підтримкою. Єдині тролейбусні системи в Японії, лінії тролейбусного тунелю Татеяма та тролейбусного тунелю Канден, обидві проходять у тунелях, що обслуговують дамбу Куробе та альпійський маршрут Татеяма Куробе, і були переобладнані зі звичайних дизельних автобусів спеціально через відсутність вихлопних газів.

▪ Довговічність і технічне обслуговування – електродвигуни зазвичай служать довше, ніж двигуни внутрішнього згоряння, і викликають менше вторинних пошкоджень від вібрації, тому електробуси, як правило, дуже довговічні порівняно з моторними автобусами. Оскільки базова конструкція автобусів не сильно змінилася за останні 50 з лишком років, їх можна модернізувати, наприклад, коли на багатьох тролейбусах було модернізовано кондиціонер. Такі оновлення часто коштують непропорційно дорого. Підйомники для інвалідних візків відносно просто додати; передня підвіска на колінах є загальною ознакою пневматичної підвіски на передній осі замість пружин. У порівнянні з автобусами з акумуляторним живленням відсутність спеціально розробленої батареї або паливного елемента (як правило, з дорогими патентами) знижує ціну і вагу, а в місцях з достатньою мережею електропостачання тролейбус дешевший і легший в обслуговуванні в порівнянні з до зарядних станцій.

### *Недоліки у порівнянні з трамваями*

- Як і будь-який автобус, значно меншої місткості, ніж трамвай.
- Потрібний більший контроль – тролейбуси повинні керуватися як автобуси, що вимагає від водія керування напрямком.
- Вищий опір коченню. Транспортні засоби з гумовими шинами зазвичай мають більший опір коченню, ніж сталеві колеса, що знижує енергоефективність.
- Менш ефективне використання смуги відведення – смуги для некерованих автобусів мають бути ширшими, ніж для трамваїв, оскільки некеровані автобуси можуть рухатися з боку в бік. Використання направляючої рейки дозволяє трамваям, що рухаються паралельними смугами, проїжджати ближче один до одного, ніж водії могли б безпечно керувати.

- Труднощі із завантаженням платформи – Реалізація рівномірного завантаження платформи з мінімальним зазором, як на етапі проектування, так і після, легше та дешевше реалізувати за допомогою залізничних транспортних засобів.

### *Недоліки у порівнянні з автобусами*

- Важко змінити маршрут – порівняно з мотобусами, тролейбуси мають більші труднощі з тимчасовими або постійними змінами маршрутів, провідка для яких зазвичай не доступна за межами центру міста, де автобуси можуть бути переспрямовані через сусідні вулиці ділового району, де інші працюють тролейбусні маршрути. Ця проблема була висвітлена у Ванкувері в липні 2008 року, коли вибух закриття кільця доріг у центрі міста. Через закриття тролейбуси були змушені обійти кілька миль від свого маршруту, щоб залишатися на провадах, залишаючи основні частини своїх маршрутів не в обслуговуванні та поза графіком.

- Естетика – мішання повітряних проводів можна вважати непривабливим. Перехрестя часто мають вигляд «перетинчастої стелі» через безліч перетинаються та сходяться наборів тролейбусних проводів.

- Розводка – стовпи візка іноді відриваються від дроту. Розводки відносно рідкісні в сучасних системах з доглянутими повітряними провадами, підвісами, фітінгами та контактними черевиками. Тролейбуси оснащені спеціальними ізольованими опорними тросами, за допомогою яких водії з'єднують опори тролейбуса з повітряними провадами. Наближаючись до стрілок, тролейбуси зазвичай повинні сповільнюватись, щоб уникнути розводки, і це уповільнення потенційно може трохи збільшити затори. У 1998 році відключення проводів у Шеньяне на погано обслуговуваній інфраструктурі загинуло 5 людей і в кінцевому підсумку призвело до руйнування тролейбусної мережі.

- Неможливість обігнати інші тролейбуси – тролейбуси не можуть обганяти один одного в звичайному режимі, якщо не передбачено два окремих комплекти проводів з перемикачем або транспортні засоби не оснащені можливістю відключення, причому останнє стає все більш поширеною особливістю нових тролейбусів.

- Вища капітальна вартість обладнання – тролейбуси часто є довговічним обладнанням з обмеженим ринковим попитом. Це, як правило, призводить до вищих цін у порівнянні з автобусами внутрішнього згоряння. Тривалий термін служби обладнання також може ускладнити оновлення.

- Потрібна додаткова підготовка – водії повинні навчитися запобігати розведенню проводів, уповільненню швидкості на поворотах та через перемикачі в системі повітряних проводів, наприклад.

- Надземні дроти створюють перешкоди – тролейбусні системи використовують повітряні дроти над дорогами, які часто спільні з іншими транспортними засобами. Дроти можуть перешкодити високим автотранспортним засобам, таким як вантажівки ("вантажівки") і двоповерхові автобуси, використовувати або перетинати дороги, обладнані повітряними провадами, оскільки такі транспортні засоби можуть врізатися в дроти або проїжджати небезпечно близько до них, ризикуючи пошкодженням та небезпечними електричними несправностями. Провід також може перешкоджати розміщенню накладних знаків і створювати

небезпеку для таких видів діяльності, як ремонт доріг з використанням високих екскаваторів або паливових установок, використання будівельних ріштувань тощо.

### Метрополітен

Метрополітен (скорочено: метрo) — вид міського (зазвичай) громадського транспорту, фактично варіант залізниці. Лінії метро, на відміну від трамвая, завжди прокладають окремо від вуличного транспорту: найчастіше в тунелях, іноді на естакадах чи просто наземно.



*Потяг кийвського метрополітену*

Назва «метрополітен» (метро) прийнята в багатьох країнах. Походить від назви компанії «metropolitan Railway» («столична залізниця»), що побудувала першу подібну дорогу в Лондоні. В той же час в самій Великій Британії використовується термін underground («підземка»), а в США та Канаді — як subway («сабвей»), так і «метро». Лондонці метро називають tube (прямий переклад — «труба»).

Сучасні послуги в системах метро надаються на призначених лініях між станціями, як правило, з використанням електричних вагонів на залізничних коліях, хоча в деяких системах використовуються гумові шини, магнітна левітація (маглев) або монорейка. Зазвичай станції мають високі платформи, без сходів всередині поїздів, що вимагає виготовлення поїздів на замовлення, щоб мінімізувати розриви між поїздом і платформою. Зазвичай вони інтегровані з іншим громадським транспортом і часто керуються тими ж органами громадського транспорту. Однак деякі системи швидкого транспорту мають перехрестя між лінією метро та дорогою або між двома лініями метро.

## Електричний транспорт

Першою у світі системою швидкого транспорту була частково підземна метрополітен, яка була відкрита як звичайна залізниця в 1863 році, а тепер є частиною лондонського метро.

Станом на 2021 рік у Китаї є найбільша кількість систем метрополітену в світі — 40, які працюють на понад 4500 км колії — і відповідає за більшу частину світового розширення метро за останнє десятиліття. Найдовшою у світі системою швидкого транспорту з одним оператором за довжиною маршруту є метро Шанхай. Найбільшим у світі постачальником послуг швидкого транспорту за кількістю станцій (всього 472 станції) є метро Нью-Йорка. Трьома найбільш завантаженими системами швидкого транспорту в світі за кількістю пасажирів є Шанхайське метро, система Токійського метро і Московське метро.

Потяги метро складаються з кількох вагонів. Ширина колії метрополітену неоднакова в різних країнах: зазвичай відповідає прийнятій ширині колії залізниці. Живлення потягів метро електричним струмом виконується від третьої рейки за радянськими нормативами, в інших країнах буває від повітряної контактної мережі (наприклад, у Відні).

Будівництво метрополітену вимагає великих капіталовкладень — тому економічно виправдане лише в містах із великими пасажиропотоками.

### Електричний автомобіль

*Електричний автомобіль* або *акумуляторний електромобіль* — це автомобіль, який приводиться в рух одним або кількома електродвигунами, використовуючи енергію, що зберігається в батареях.

Повністю електричні автомобілі — це тип електромобіля, який має на борту акумуляторну батарею, яку можна заряджати від електричної мережі, а електроенергія, що зберігається в транспортному засобі, є єдиним джерелом, що приводить в рух колеса. Термін «електроавтомобіль» зазвичай відноситься до автомобілів, які рухаються по шосе, але існують також низькошвидкісні електромобілі з обмеженнями щодо ваги, потужності та максимальної швидкості, яким дозволено пересуватися по дорогах загального користування.

У порівнянні з транспортними засобами з *двигуном внутрішнього згорання* (*internal combustion engine* — ICE), електромобілі є тихішими, не мають викидів вихлопних газів і загалом виділяють менші викиди. У Сполучених Штатах та Європейському Союзі станом на 2020 рік загальна вартість володіння останніми електромобілями дешевша, ніж еквівалентних автомобілів ICE, через менші витрати на заправку та технічне обслуговування. Зарядити електромобіль можна на різних зарядних станціях; ці зарядні станції можна встановити як у будинках, так і в громадських місцях.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, із усіх проданих у 2020 році автомобілів 4,6% були електричними, а до кінця того ж року на дорогах світу було понад 10 мільйонів електромобілів із підключенням до мережі. Незважаючи на швидке зростання, до кінця 2020 року лише близько 1% автомобілів на дорогах світу були повністю електричними та підключаються гібридними автомобілями. Багато країн встановили державні стимули для електромобілів, що підключаються до електромобілів, податкові пільги, субсидії та інші немонетарні стимули, в той

час як декілька країн законодавчо припиняють продаж автомобілів, що працюють на викопному паливі, для зменшення забруднення повітря та обмежити зміну клімату.



*Електромобіль Tesla Model 3*

*Історія електромобіля.* Наприкінці 19-го та на початку 20-го століть електрика була одним із переважних методів для автомобільного руху, забезпечуючи рівень комфорту та простоти експлуатації, якого не могли досягти бензинові автомобілі того часу. На рубежі 20-го століття парк електромобілів досяг максимуму в 30 000 автомобілів.

У 1897 році електромобілі вперше знайшли комерційне використання як таксі у Великобританії та США. У Лондоні електричні кабіни Уолтера Берсі були першими самохідними транспортними засобами, які були взяті напрокат у той час, коли таксі були запряжені конями.

Електромобілі залишалися популярними до тих пір, поки розвиток автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння і масове виробництво дешевших автомобілів з бензиновими і дизельними двигунами не привели до зниження. Набагато швидший час заправки та дешевші витрати виробництва зробили їх більш популярними. Однак вирішальний момент настав із впровадженням у 1912 році електростартера, який замінив інші, часто трудомісткі, методи запуску ДВС, такі як ручний запуск.

*Сучасні електромобілі.* Поява технології метал-оксид-напівпровідник (MOS) привела до розвитку сучасних електричних дорожніх транспортних засобів. МОП-транзистор, винайдений у 1959 році, призвів до розробки силового MOSFET компанією Hitachi у 1969 році та однокристального мікропроцесора в 1971 році. Перетворювачі живлення MOSFET дали змогу працювати на набагато вищих



частотах перемикання, полегшували керування, зменшували втрати потужності та значно знижували ціни, тоді як однокристалічні мікроконтролери могли керувати всіма аспектами керування приводом і мали ємність для керування акумулятором. Іншою важливою технологією, яка дозволила створити сучасні електромобілі з підтримкою шосе, є літій-іонний акумулятор, винайдений Джоном Гуденафом, Рачідом Язамі та Акірою Йошіно у 1980-х роках, який дозволив розробити електромобілі, здатні пересуватися на великі відстані.

Починаючи з 2008 року, ренесанс у виробництві електромобілів відбувся завдяки прогресу в батареях, а також прагненні зменшити викиди парникових газів і покращити якість міського повітря. Протягом 2010-х років промисловість електромобілів у Китаї значно розширилася за підтримки уряду. На початку 2020-х жорсткі європейські стандарти викидів притиснули європейських виробників автомобілів на вичерпаному паливі.

**Переваги та недоліки в порівнянні з автомобілями на вичерпаному паливі.** Акумуляторні електромобілі мають ряд екологічних переваг перед звичайними транспортними засобами з двигуном внутрішнього згоряння, наприклад:

- Усуення шкідливих забруднювачів вихлопної труби, таких як різні оксиди азоту, які вбивають тисячі людей щороку.
- Електромобілі споживають 38 мегаджоулів на 100 км у порівнянні зі 142 мегаджоулями на 100 км для автомобілів ІСЕ.
- Менше CO<sub>2</sub> викиди в усьому світі, ніж автомобілі, що працюють на вичерпаному паливі, що обмежує зміну клімату.
- Підключаються гібриди отримують більшість цих переваг, коли вони працюють у повністю електричному режимі.

У електромобілів є деякі недоліки, такі як:

- Залежність від рідкоземельних елементів, таких як неодим, лантан, тербій і диспрозій, та інших критичних металів, таких як літій і кобальт, хоча кількість рідкісних металів, що використовуються для кожного автомобіля, різна. Хоча рідкоземельних металів у великій кількості в земній корі, лише деякі шахтарі мають ексклюзивний доступ до цих елементів.
- Можливе збільшення викидів твердих частинок з шин. Іноді це викликано тим, що більшість електромобілів мають потужний акумулятор, а це означає, що шини автомобіля піддаються більшому зносу. Однак гальмівні колодки можна використовувати рідше, ніж в неелектричних автомобілях, якщо доступне рекуперативне гальмування, і, таким чином, іноді можуть виробляти менше забруднення, ніж гальма в неелектричних автомобілях. Крім того, деякі електромобілі можуть мати комбінацію барабанних і дискових гальм, а барабанні гальма, як відомо, викликають менше викидів твердих частинок, ніж дискові гальма.
- Забруднення, що виділяється на виробництві, особливо збільшені від виробництва батарей.
- Пасивне забруднення в окремих випадках; Електроенергія, що споживається для підзарядки, одержується від електростанцій, які виділяють забруднювачі, тому, навіть якщо під час руху забруднювачі не виділяються, використана електроенергія вже забруднена. У випадку АЕС немає видимих забруднюючих

речовин, а лише ядерні відходи, які потребують дорогого зберігання, поводження тощо.

### Електричний велосипед

*Електричний велосипед (e-bike)* — це моторизований велосипед з вбудованим електродвигуном, який використовується для забезпечення руху. Багато видів електронних велосипедів доступні в усьому світі, але вони, як правило, діляться на дві великі категорії: велосипеди, які допомагають водієві крутити педаль (тобто педелки), і велосипеди, які додають дросель, інтегруючи функціональність у стилі мопеда. Обидва зберігають здатність водія крутити педалі, тому вони не є електричними мотоциклами.



*Merida e one-forty 5000 — електричний двопідвісний електровелосипед*

**Загальна характеристика електричних велосипедів.** Автономність електровелосипедів залежить від ємності акумуляторів і, як правило, становить від 40 до 100 км. Якщо двигун велосипеда розвиває швидкість, що вища за 25 км/год і потужність, що більша за 250 Вт — такі електровелосипеди в низці країн вважають за мопеди.

Використання електричних велосипедів дуже просте. Двигун вмикають, при потребі, або під час руху в гору. Вимкнення/ увімкнення, зазвичай, виконується дроселем на кермі. Двигун працює з потужністю в діапазоні між 180 і 250 Вт. Педалі можна використовувати для продовження руху після вимкнення двигуна. В системі приводу використовують безколекторний двигун.

Як джерело енергії широко застосовують літій-іонні (Li-ion) акумулятори ємністю 12-24 А/год та напругою 24, 36В. Для потужніших моторів використовують

більшу напругу — 72 або 96 В. Електронний контролер керує обертами двигуна та різними режимами роботи. Споживання енергії може відобразитись на індикаторі, що міститься на кермі або на корпусі батареї.

Щоб зарядити акумулятор, використовують спеціальний зарядний пристрій з живленням від стандартної розетки. Час заряджання становить близько 3-5 годин, а пробіг від одного заряду сягає до 100 км. Кількість циклів заряджання літєвої батареї становить приблизно 1000, а термін придатності в кілька років. Продуктивність акумулятора дещо знижується з часом. На більшості моделей батарею встановлено як з'ємний компактний картридж для зручності обслуговування.

Вартість ужитку електричних велосипедів набагато менша, ніж у випадку транспортних засобів обладнаних двигуном внутрішнього згорання. На відміну від двигуна внутрішнього згорання, електродвигун працює майже безшумно.

**Двигун та система приводу.** В електровелосипедах використовують безколекторні електродвигуни постійного струму напругою від 12 до 48 V.

Традиційно вони вмонтовані в маточину одного з двох коліс (так зване «мотор-колесо»). «Мотор-колесо» — до певного часу було найбільш розповсюдженою моделлю приводу. Останнім часом деякі виробники пропонують привідні блоки які легко монтують в кареточну втулку, їх можна самостійно встановлювати на будь-який велосипед без переробки конструкції.

Окремим видом приводу електровелосипедів є система Pedelec (pedelec, словозлиття від pedal electric cycle). Велосипеди Pedelec є найближчими до самого принципу велосипедної їзди: щоб рухатись, потрібно крутити педалі.

Такі велосипеди оснащені спеціальним активним приводом в якому електродвигун вмонтовано в кареточний вузол педалей, так званий «середній двигун». Двигун діє лише при натисканні на педаль, таким чином зменшує зусилля та значно полегшує педалювання. Датчики системи вираховують силу докладеного зусилля, частоту обертів педалей та посилають сигнал на електродвигун який імпульсно «підштовхує» велосипед.

Заднє колесо таких велосипедів має звичайну конструкцію з багатошвидкісною планетарною втулкою, або з багатозірковою перекидною системою яка дає можливість підбору швидкості руху. Якщо відімкнути електричну систему, привід працює від педалей як на звичайному велосипеді.

### Електричні мотоцикли та скутери

Електричні мотоцикли та скутери – це електромобілі з двома або трьома колесами. Електрика накопичується на борту в акумуляторній батареї, яка приводить в рух один або кілька електродвигунів. Електричні скутери (на відміну від мотоциклів) мають прохідну раму.

*Джерела живлення.* Більшість електричних мотоциклів і скутерів станом на травень 2019 року живляться від літій-іонних акумуляторів, які перезаряджаються, хоча деякі ранні моделі використовували нікель-металгідридні акумулятори.

*Зарядка.* Усі електричні скутери та мотоцикли забезпечують підзарядку, підключаючись до звичайних настінних розеток. На зарядку зазвичай потрібно близько восьми годин (тобто протягом ночі).

## Розділ 0

*Заміна батареї.* Виробники електричних мотоциклів і скутерів розробили машини, які дають змогу швидко міняти акумулятор, для мешканців квартир, які не мають розетки в гаражі, або для миттєвої підзарядки на ходу.



*Електричний скутер E-max*

Акумуляторний картридж Sunray був на роликах і вислизав з передньої частини автомобіля, тому його можна було замінити на щойно заряджену батарею на станції заміни акумуляторів,

*Гібридний скутер.* Honda розробила експериментальний гібридний скутер внутрішнього згоряння/електричний скутер. Yamaha також розробила гібридний концептуальний мотоцикл під назвою Gen-Ryu. Він використовує 600сс двигун і додатковий електродвигун. Piaggio MP3 Hybrid використовує 125-кубовий двигун і додатковий двигун потужністю 2,4 кВт.

### Порівняння електричних та бензинових машин

*Продуктивність.* Електричні та бензинові мотоцикли та скутери однакового розміру та ваги приблизно порівняні за продуктивністю. Електричні машини мають краще прискорення від 0 до 60, оскільки вони відразу розвивають повний крутний момент, а без зчеплення крутний момент доступний миттєво.

*Діапазон.* Електричні мотоцикли та скутери мають значні недоліки в радіусі дії, оскільки батареї не можуть накопичувати стільки енергії, скільки бак з бензином. Все, що перевищує 130 миль (210 км) на одному заряді вважається надзвичайно великою дальністю. В результаті, хоча електричні машини відмінно підходять для щоденних пасажирів, які подорожують на фіксовану відстань в обидва боки, на відкритій дорозі їзди відчувають пригнічення тривожності далекого руху. Крім того, електрична потужність замінює діапазон на швидкість.

*Технічне обслуговування.* Електричні скутери та мотоцикли потребують дуже мало обслуговування. Електричні мотоцикли легко обслуговувати в порівнянні зі звичайним мотоциклом, що з усіма мастилами, регулюванням і налаштуваннями, які потрібно зробити. В основному потрібні лише витратні матеріали: гальмівні колодки, шини, можливо, промивання гальмівної рідини. Електричні скутери та мотоцикли, обладнані рекуперативним гальмуванням, зазвичай мають довший термін служби гальмівних колодок, оскільки значну частину гальмування можна виконувати за допомогою електродвигуна замість механічних фрикційних гальм.

*Вартість палива.* Електричні машини мають величезну перевагу у вартості палива, оскільки вартість поїздки становить Від одного до двох центів за милю (залежно від тарифів на електроенергію).

*Час заправки.* Навіть зі спеціальним обладнанням зарядка акумулятора займає значно більше часу, ніж заправка бензинового бака, що може зробити електромобілі менш гнучкими, ніж їхні бензинові аналоги. З максимальною кількістю додаткових зарядних пристроїв заряд батареї Zero S ZF6.5 ємністю 6,5 кВт·год займає більше години до 95% ємності. Цей час заправки також збільшується з ємністю акумулятора. Хоча це може не створювати проблеми для поїздок на електромобілі з нічною зарядкою, це, ймовірно, вплине на тривалі подорожі, які потребують заправки під час подорожі.

*Шум.* Електромобілі набагато тихіше, ніж бензинові, настільки безшумні, що можуть підкрадатися до необережних пішоходів. Деякі обладнані для випромінювання штучного шуму. Експерти називають порівняльну безшумність електричних мотоциклів найбільшою відмінністю між ними та їхніми бензиновими аналогами, а також бонусом безпеки, оскільки водій може почути, що наближається небезпека.

### Персональний малогабаритний електротранспорт

**Персональний електротранспорт** — це клас компактних, переважно нещодавніх (21 століття), моторизованих мікромобільних транспортних засобів для перевезення людини на швидкостях, які зазвичай не перевищують 25 км/год (16 миль/год). Сюди входять електричні скейтборди, самокати, моноцикли та сігвеї, що самобалансуються, а також моторизовані скутери або скейтборди на бензиновому паливі, які зазвичай використовують двотактні двигуни об'ємом менше 49 куб.см (3,0 куб. дюймів). У багатьох новіших версіях використовуються останні досягнення в технологіях керування автомобільними акумуляторами та двигунами. Вони стають популярнішими, і законодавці вирішують, як ці пристрої слід класифікувати, регулювати та використовувати в період стрімких інновацій.

**Електричний самокат.** *Електричний самокат (електросамокат)* — засіб пересування на двох колесах з електромотором. Водій зазвичай стоїть. Мінімальний вік користування цим транспортним засобом має бути від 14 до 16 років відповідно до законодавства кожної країни.



*Електросамокат M365 Pro 2*

## Електричний транспорт

Електричні самокати іноді називають електричними скутерами, однак їх не слід плутати з сидячими електричними скутерами, оскільки їх можна класифікувати як транспортний засіб.

Електричні самокати стають все більш популярними з кінця 2010-х років, зокрема з 2017-2018 рр. Тенденція до електричної мобільності, яка спостерігається на даний момент, показує, що, особливо в містах, багато людей прагнуть пересуватися транспортними засобами, альтернативними автомобілям з двигуном внутрішнього згоряння. Електричні самокати дають змогу швидко долати невеликі відстані, наприклад, від місця проживання до вокзалу, магазину або в деяких випадках на робочому місці. Деякі моделі з більшою автономністю батареї долають середні відстані без будь-яких проблем.

Багато міст, наприклад, Париж, Тель-Авів чи Відень, сподіваються, що використання електросамокатів полегшить дорожню ситуацію та відсутність паркування. Найпоширенішими аргументами на користь самоката або електричного самоката є універсальність, яку вони користуються з точки зору транспортування та зберігання, економія часу в міських поїздках, економія ресурсів, або екологічний фактор, оскільки електросамокат, будучи повністю електричним, не створює ефекту теплиці і не має шкідливих викидів.

*Опис.* Електричний скутер — це транспортний засіб з двома колесами (іноді трьома), між якими є платформа, яка служить для підтримки водія. Над переднім колесом знаходиться кермо, виконане у вигляді палички, яка відривається від осі обертання колеса і закінчується у формі «Т» у верхньому кінці.

*Шини.* Електричні скутери зазвичай оснащені двома шинами діаметром від 5 до 12 дюймів (від 12,5 до 30 см). Існує три категорії шин:

*Суцільні гумові колеса.* Більшість електричних скутерів, доступних на ринку, мають тверді гумові шини. Перевага твердих гумових шин полягає в тому, що вони не можуть проколюватися і мають тривалий термін служби. З іншого боку, вони також відносно тверді і не можуть поглинати вібрації, коли ґрунт недостатньо рівний.

*Пневматичні шини.* Шини наповнені повітрям. Вони забезпечують більший комфорт водіння, оскільки поглинають вібрації та удари краще, ніж тверді гумові шини. Однак накачані шини також більш схильні до пошкоджень, наприклад, гофрих каменів або предметів з гострими краями.

*Колеса з камерою.* Це суміш твердих гумових шин і камерних шин, а також переваги цих двох варіантів коліс. Шина виготовлена з пластику. В середині є окремі камери, які забезпечують кращу підвіску шин. На відміну від чистих шин, повітря не може виходити з окремих камер.

*Матеріал і вага.* Електричні скутери виготовляються з пластику, сталі, алюмінію або вуглецю. Найлегші моделі важать близько 7 кг, найважчі можуть важити більше 20 кг.

*Електричний двигун.* Електричні скутери працюють від електродвигуна. Електрична потужність електродвигуна забезпечується акумулятором, який встановлюється під платформою, на кермі або в районі передньої шини. Більшість моделей використовують літій-іонні акумулятори. Деякі моделі також пропонують

## Розділ 0

можливість встановлення додаткового акумулятора або можливість заміни заводського акумулятора.

*Швидкість.* Швидкість, якої може досягти електричний скутер, залежить, зокрема, від сили електродвигуна, ваги водія, сили та дорожніх умов. Взагалі, швидкість на рівній землі скутера, як правило, заздалегідь встановлюється на заводі, щоб вона досягала 25 км / год. Деякі моделі можуть розвивати швидкість до 50 км/год. Вік використання та швидкість регулюється законодавством кожної країни.

*Гальма.* Електричні скутери зазвичай мають два незалежних гальма: з одного боку, електричне гальмо на передньому колесі, а з іншого, механічне гальмо. Як гальмівні системи використовуються дискові або барабанні гальма. Високоякісні моделі мають гальмо, яке називається рекуперативним або рекуперативним гальмом: перевага цього гальма полягає в тому, що він відновлює енергію під час кожного процесу гальмування і, отже, заряджає акумулятор знову і знову. Завдяки цій системі заряд батареї триває довше і гарантує більш тривалу автономність. У цьому контексті говорять про систему KERS (Kinetic Energy Recovery System), тип рекуперативного гальмування, розробленого для Формули-1.

*Сегвей.* *Cérvей* (англ. Segway) — електричний транспортний засіб, що самобалансиється, компанії Segway Inc. з двома колесами, розташованими по обидва боки від водія, що зовні нагадує колісницю. Винайдено Діном Кейменом.



*Segway x2 and i2*

Назва фірми виробника, перенесена і на сам транспортний засіб - "Segway" - походить від музичного терміну "segue" (італ. segue ['segwe], що в перекладі



## Електричний транспорт

означає "слідуй, йди за". В якості назв використовуються також слова "самокат" та «скутер».

**Конструкція.** Два колеса транспортного засобу Segway розташовані співвісно. Транспортний засіб Segway автоматично балансується при зміні положення корпусу; для цієї мети використовується система індикаторної стабілізації: сигнали з гіроскопічних та рідинних датчиків нахилу надходять на мікропроцесори, які виробляють електричні сигнали, що впливають на двигуни та керують рухами. Кожне колесо транспортного засобу Segway обертається своїм електродвигуном, що реагує на зміни рівноваги машини.

При нахилі тіла водія вперед сегвей починає котитися вперед, при збільшенні ж кута нахилу тіла водія швидкість сегвея збільшується. При відхиленні корпусу назад самокат уповільнює рух, зупиняється або котиться заднім ходом. Керування в першій моделі відбувається за допомогою поворотної рукоятки, в нових моделях - хитання колонки вліво-вправо.

Транспортний засіб Segway розвиває швидкість близько 50 км/год та має власну масу близько 40 кг (без батареї), його ширина 60 см, а допустиме навантаження – 140 кг. Акумулятор забезпечує пробіг до 39 км. Залежно від моделі ці показники можуть змінюватись. Спеціально для оснащення ними пристрою транспортного засобу Segway розроблено компактні, але потужні (2 л. с.) електродвигуни. Кожен із них через редуктор пов'язаний зі своїм колесом. Самокат може рухатися не тільки по асфальту, а й по ґрунту.

На розробку транспортного засобу компанії Segway Inc., представленого публіці в 2001 році, винахідник витратив близько десяти років.

**Моноколесо.** *Моноколесо* - електричний уніцикл (моноцикл), що самобалансується, з одним колесом і розташованими по обидва боки від колеса підніжками. Моноколесо є глибокою модернізацією Segway (рус. «Сігвей») — електричний транспортний засіб, що самобалансується, компанії Segway Inc. (рус. «Сегвей Інк.») з двома колесами, розташованими по обидва боки від водія, що зовні нагадує колісницю. Винайдено Шейном Ченом. Моноколесо використовує гіроскопи та акселерометри для відстеження положення разом із електродвигуном для автоматичного балансування площини педалей уперед та назад. Ліворуч і праворуч балансування здійснюється людиною (моноколісником або райдером) і керується нахилом тіла і поворотом всього пристрою вправо-ліворуч ногами. Отже підтримується динамічне рівновагу, як у велосипедах чи скутерах.

### **Конструкція моноколеса**

**Зовнішній вигляд.** Найчастіше моноколесо має пластиковий корпус із ручкою для перенесення пристрою. Не всі, але багато моделей крім ручки для перевезення мають телескопічну для зручності котити колесо поруч із собою під час ходьби. На корпусі пристрою розташовані кнопка ввімкнення/вимкнення, індикатор заряду батареї та роз'єм для заряджання. Багато моноколес також оснащені вбудованими динаміками, фарею і стоп сигналом, підсвічуванням. Справа і зліва з боків корпусу симетрично знаходяться дві педалі, на яких стоїть водій. Педалі у моноколес, як правило, складаються для зручності перенесення пристрою. Основними складовими моноколеса є: (250-3500Вт) електродвигун, плати управління (звані

«контролер», на якому розташований у тому числі і гіроскоп, що утримує рівновагу колеса), і акумуляторні батареї.



### *Моноколесо Ninebot A1*

*Принцип роботи.* При включеному живленні електронні гіроскопи та акселерометри починають змінювати момент сили мотора таким чином, щоб корпус колеса, що нахилиється користувачем через педалі, відновлював горизонтальне положення. Поздовжня рівновага досягається шляхом «під'їждання» пристрою під центр ваги (користувача разом з моноколесом), а динамічна поперечна рівновага - за рахунок відцентрової сили повороту, що виникає при нахилі колеса в сторони. Таким чином, управління моноколесом здійснюється через переміщення центру тяжкості (нахил тіла) вперед, назад та в сторони. При повній зупинці користувачеві пристрою доводиться утримувати рівновагу як на мотоциклі або велосипеді, опустивши одну ногу на асфальт.

### **Електричний літальний апарат**

Електричний літальний апарат — це літальний апарат, що працює від електрики, майже завжди за допомогою одного або кількох електродвигунів, які приводять у рух гвинти. Електроенергія може забезпечуватися різними методами, найпоширенішими є батареї або сонячні батареї.

Літаки з електричним приводом літали принаймні з 1970-х років і були попередниками малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) або дронів, які в двадцять першому столітті стали широко використовуватися для багатьох цілей.



*Повністю електричний літак*

Хоча польоти з екіпажем на прив'язному вертольоті з електричним приводом сягають 1917 року, а на дирижаблях – у минуле століття, перший вільний політ з екіпажем на електричному літаку, MB-E1, був здійснений лише у жовтні 1973 року, а більшість електричних літаків з екіпажем сьогодні, поки є лише експериментальними прототипами. У період з 2015 по 2016 рік Solar Impulse 2 завершив навколосвітню подорож Землі за допомогою сонячної енергії. Останнім часом зріс інтерес до електричних пасажирських літаків, як для комерційних авіалайнерів, так і для особистого повітряного транспорту.

**Зберігання енергії та живлення.** Майже всі електричні літаки на сьогоднішній день оснащені електродвигунами, що приводять в рух гвинти, що створюють тягу, або ротори, що створюють підйомну силу. Деякі з пропелерних типів були дирижаблями.

Викиди CO<sub>2</sub>, через їх вплив на зміну клімату, нещодавно стали основною рушійною силою для розробки електричних літаків, а електрична трансмісія з нульовими викидами була метою деяких команд розробників. На авіацію припадає 2,4% усіх викидів CO<sub>2</sub>, отриманих з викопного палива, і її частка в загальній сумі зросла на 32% у період з 2013 по 2018 рік. Ще однією перевагою є потенціал зниження шуму в промисловості з серйозною проблемою шумового забруднення та зменшення викидів. Електродвигуни також не втрачають потужності з висотою, на відміну від двигунів внутрішнього згорання, уникаючи потреби у складних і дорогих заходах, що використовуються для запобігання цьому, наприклад, використання турбокомпресорів.

Механізми зберігання та постачання необхідної електроенергії значно відрізняються, і кожен має чіткі переваги та недоліки. Використовувані механізми включають:

- Сонячні батареї перетворюють сонячне світло безпосередньо в електрику за допомогою фотоелектричних матеріалів.
- Акумулятори, які використовують хімічну реакцію для вироблення електрики, яка змінюється при перезарядці.
- Паливні елементи споживають паливо та окислювач у хімічній реакції для виробництва електроенергії, їх потрібно заправляти, як правило, воднем.
  - Ультраконденсатори — це гібрид акумулятора/конденсатора, який вивільняє накопичену енергію в електрохімічній реакції і може швидко заряджатися.
  - Мікрохвильова енергія, яка випромінюється від дистанційного передавача.
  - Силові кабелі, підключені до заземленої електричної мережі.

**Сонячні батареї.** Сонячна батарея перетворює сонячне світло безпосередньо в електрику, або для прямого живлення, або для тимчасового зберігання. Вихідна потужність сонячних елементів низька і вимагає, щоб багато з них були з'єднані разом, що обмежує їх використання. Звичайні сонячні панелі, що працюють з ефективністю перетворення 15-20% (енергію сонячного світла в електричну енергію), виробляють близько 150–200 Вт/м<sup>2</sup> (0,019–0,025 к.с./кв. фут) під прямим сонячним світлом. Корисні площі додатково обмежені, оскільки вихід панелі з поганою роботою впливає на вихід усіх панелей на її ланцюзі, що означає, що всі вони вимагають подібних умов, включаючи знаходження під схожим кутом до сонця та не маскування тінню.

У період з 2010 по 2020 рік вартість сонячних модулів знизилася на 90% і продовжує падати на 13-15% на рік.[8] Ефективність сонячних батарей також істотно зросла з 2% у 1955 році до 20% у 1985 році, а деякі експериментальні системи зараз перевищують 44%.

Вільна доступність сонячного світла робить сонячну енергію привабливою для використання на великій висоті і тривалій експлуатації, де холод і знижені атмосферні перешкоди роблять їх значно ефективнішими, ніж на землі.

Нічні польоти, наприклад, для довготривалих польотів та з літаками, що забезпечують 24-годинне покриття території, як правило, вимагають резервної системи зберігання, яка заряджається протягом дня від надлишкової енергії та забезпечує живлення в темряві.

### Електричний човен

Хоча значна більшість водних суден оснащені дизельними двигунами, популярні також вітрильні та бензинові двигуни, човни, що працюють на електриці, використовуються вже понад 120 років. Електричні човни були дуже популярні з 1880-х до 1920-х років, коли двигун внутрішнього згорання став домінуючим. Починаючи з енергетичної кризи 1970-х років, інтерес до цього тихого та потенційно поновлюваного морського джерела енергії постійно зростає, особливо після того, як стали доступні більш ефективні сонячні батареї, що вперше зробило можливими моторні човни з нескінченною дальністю дії, як вітрильники. Перший практичний сонячний човен, ймовірно, був побудований в 1975 році в Англії. Першим електричним вітрильником, який здійснив кругосвітню подорож, включаючи транзит

## Електричний транспорт

Панамського каналу, використовуючи виключно екологічні технології, є EcoSailingProject.



*У 2012 році PlanetSolar став першим сонячним електромобілем, який здійснив кругосвітню подорож.*

### **Компоненти електричного човна**

Основні компоненти системи приводу будь-якого човна з електричним приводом у всіх випадках схожі та подібні до опцій, доступних для будь-якого електромобіля.

**Зарядний пристрій.** Електрична енергія повинна бути отримана для акумуляторної батареї з якогось джерела, наприклад сонця.

Зарядний пристрій від мережі дозволяє заряджати човен від берегової електромережі, якщо це можливо. Берегові електростанції підлягають набагато суворішому екологічному контролю, ніж звичайні морські дизельні чи підвісні двигуни. Купуючи «зелену» електроенергію, можна керувати електричними човнами, використовуючи стійку або відновлювану енергію.

Сонячні батареї можна вмонтувати в човен у розумних місцях на палубі, даху каюти або як навіси. Деякі сонячні панелі або фотоелектричні батареї можуть бути достатньо гнучкими, щоб пристосуватися до злегка вигнутих поверхонь, і їх можна замовити в незвичайних формах і розмірах. Тим не менш, більш важкі, жорсткі монокристалічні типи є більш ефективними з точки зору виходу енергії на квадратний метр. Ефективність сонячних панелей швидко знижується, якщо вони не спрямовані прямо на сонце, тому деякий спосіб нахилу батарей під час руху є дуже вигідним.

Вітряні турбіни поширені на круїзних яхтах і дуже добре підходять для електричних човнів. Важливо, щоб човен був достатньо великим, щоб за будь-яких

обставин, в тому числі поруч із доком, берегом або пірсом, можна було встановити турбіну, недоступну для всіх пасажирів та екіпажу. Також важливо, щоб човен був достатньо великим і стабільним, щоб верхня перешкода, створена турбіною на його стовпі або щоглі, не погіршувала його стійкість під час сильного вітру або шторму.

У гібридних електричних човнах, якщо човен все одно має двигун внутрішнього згоряння, то його генератор буде забезпечувати значний заряд під час його роботи.

*Батарея акумуляторів.* За останні роки в технології акумуляторів відбувся значний технічний прогрес, і в майбутньому слід очікувати ще більше.

*Свинцево-кислотні акумулятори* залишалися найбільш життєздатним варіантом до появи великих літій-іонних акумуляторів, які масово вироблялися для електромобілів приблизно з 2012 року.

*Нікель-металгідридні, літій-іонні* та інші типи акумуляторів стають доступними, але все ще коштують дорого.

*Літій-іонні* в цьому випадку зазвичай мають на увазі літій-залізо-фосфатні батареї, які, хоча і важчі за інші літій-іонні, безпечніші для морського використання.

*Паливні елементи* або проточні батареї можуть забезпечити значні переваги в найближчі роки. Однак вони все ще дорогі та вимагають спеціального обладнання та знань.

Розмір акумуляторної батареї визначає запас ходу човна під електричним струмом. Швидкість, з якою рухається човен, також впливає на дальність – менша швидкість може значно змінити енергію, необхідну для переміщення корпусу. Інші фактори, які впливають на дальність, включають стан моря, течії, парусність і будь-який заряд, який можна відновити під час руху, наприклад, сонячними панелями на повному сонці. Вітрогенератор при хорошому вітрі допоможе, а моторне плавання за будь-якого вітру може зробити це ще більше.

*Контролер швидкості.* Щоб зробити човен зручним і маневреним, потрібен простий в управлінні регулятор швидкості руху вперед/зупинки/назад. Це має бути ефективним, тобто він не повинен нагріватися і витратити енергію на будь-якій швидкості — і він повинен витримувати повний струм, який міг би протікати за будь-яких умов повного навантаження.

*Електричний двигун.* Використовується широкий спектр технологій електродвигунів. Використовувалися і використовуються традиційні двигуни постійного струму. Сьогодні багато човнів використовують легкі двигуни постійного струму з постійними магнітами. Перевага обох типів полягає в тому, що, хоча швидкість можна керувати електронним способом, це не є обов'язковою умовою. Деякі човни використовують двигуни змінного струму або безщіткові двигуни з постійними магнітами. Перевагами їх є відсутність комутаторів, які можуть зношуватися або виходити з ладу, а також часто менші струми, що дозволяють використовувати тонкі кабелі; недоліками є повна залежність від необхідних електронних контролерів і зазвичай висока напруга, що вимагає високого стандарту ізоляції.

*Привід човна.* У традиційних човнах використовується вбудований двигун, який приводить в рух гвинт через гвинтовий вал з підшипниками та ущільнювачами. Часто вбудована редукторна передача, щоб мати можливість

використовувати більш ефективний пропелер. Електродвигун може бути інкапсульований в капсулу з пропелером і закріплений за межами корпусу (парусний привод) або на підвісному кріпленні (підвісний двигун).

**Типи електричних суден.** Існує стільки ж типів електричних човнів, скільки і човнів з будь-яким іншим способом руху, але деякі типи важливі з різних причин.

Електричні човни, з їх обмеженою дальністю дії та продуктивністю, як правило, використовувалися переважно на внутрішніх водних шляхах, де їх повна відсутність локального забруднення є значною перевагою. Електроприводи також доступні як допоміжні двигуни для вітрильних яхт на внутрішніх водах.

Електричні підвісні та тролінгові двигуни доступні протягом кількох років за ціною від 100 доларів США до кількох тисяч. Для них потрібні зовнішні батареї на дні човна, але в іншому випадку вони є практичними цілісними предметами. Вони тихі і не забруднюють воду і повітря, тому не відлякують і не шкодять риbam, птахам та іншим тваринам. У поєднанні з сучасними водонепроникними акумуляторними батареями електричні підвісні мотори також ідеально підходять для тендерів на яхтах та інших прибережних прогулянкових човнах.

Крейсерські яхти зазвичай мають допоміжний двигун, і є два основних варіанти його використання: одне з них — для руху попереду або моторного вітрила в морі, коли вітер слабкий або з неправильного напрямку. Інший — забезпечити рух протягом останніх 10 хвилин, коли човен перебуває в порту, і його потрібно маневрувати на тісний причал у переповненій і обмеженій пристані чи гавані.

*Комерційні поромі:* Перший у Норвегії електричний пором MV Amrege місткістю 120 автомобілів і 12 вантажівок. Станом на листопад 2016 року пробіг 106 000 км. Його акумулятор утримує 1 МВт-год енергії, але 9-хвилинного часу зарядки іноді недостатньо, і потрібно встановити більшу ємність акумулятора.

Деякі поромі можуть заряджати свої бортові акумулятори під час стикування за допомогою пантографа.

*Дизель-електричний гібрид.* Дизельний двигун встановлюється з основною метою зарядки акумуляторних батарей, а електродвигун — для приведення в дію. Є деяке зниження ефективності, якщо їздити на великі відстані, оскільки потужність дизеля спочатку перетворюється в електрику, а потім у рух, але є збалансованість заощадження кожного разу, коли батареї, що заряджаються вітром, вітрилами та сонячними променями, використовуються для маневрування та для короткі подорожі без запуску дизеля. Існує гнучкість можливості запуску дизельного палива як чистого генератора, коли це потрібно. Основні втрати полягають у вазі та вартості установки, але на більших круїзних човнах, які можуть стояти на якорі, що працюють на великих дизелях щодня годинами, це не надто велика проблема, порівняно з економією, яку можна зробити в інший час.

*На сонячних батареях:* човен, який приводиться в рух прямою сонячною енергією, є морським сонячним транспортним засобом. Доступне сонячне світло майже завжди перетворюється в електрику сонячними елементами, тимчасово зберігається в акумуляторних батареях і використовується для приводу пропелера через електродвигун. Рівень потужності зазвичай становить від кількох сотень ват до

## Розділ 0

---

кількох кіловат. Човни на сонячних батареях стали відомі приблизно в 1985 році, а в 1995 році з'явилися перші комерційні сонячні пасажирські човни.



## ЕЛЕКТРОНІКА

**Електроніка** (від грец. Ηλεκτρόνιο «електрон») — галузь науки і техніки, що займається створенням та практичним використанням різних електронних пристроїв та приладів, робота яких заснована на зміні концентрації та переміщенні заряджених частинок (електронів) у вакуумі, газі або твердих кристалічних тілах, та інших фізичних явищ.

Електроніка — це розділ фізики та електротехніки, який займається випромінюванням, поведінкою та ефектами електронів за допомогою електронних пристроїв. Електроніка використовує активні пристрої для керування потоком електронів шляхом підсилення та випрямлення, що відрізняє її від класичної електротехніки, яка використовує лише пасивні ефекти, такі як опір, ємність та індуктивність для керування потоком електричного струму.

### Історія електронної техніки

Електроніка дуже вплинула на розвиток сучасного суспільства. Електронні вакуумні лампи були одними з найперших електронних компонентів. Вони були майже повністю відповідальними за революцію в електроніці першої половини двадцятого століття. Вони дозволили створити набагато складніші системи і дали нам радіо, телебачення, фонографи, радары, міжміську телефонію та багато іншого. Вони відігравали провідну роль у сфері передачі мікрохвиль і високої потужності, а також телевізійних приймачів до середини 1980-х років. З того часу твердотільні пристрої майже повністю заволоділи. Вакуумні лампи все ще використовуються в деяких спеціалізованих програмах, таких як високопотужні РЧ-підсилювачі, електронно-променеві трубки, спеціалізоване аудіообладнання, гітарні підсилювачі та деякі мікрохвильові пристрої.

Практичне застосування розпочалося з винаходом *вакуумного діода* Амброузом Флемінгом (*Ambrose Fleming*) і *триода* Лі Де Форестом (*Lee De Forest*) на початку 1900-х років, що зробило можливим виявлення невеликих електричних напруг, таких як радіосигнали від радіоантени, за допомогою немеханічного пристрою. Зростання електроніки було швидким, і до початку 1920-х років комерційне радіомовлення та зв'язок набули широкого поширення, а електронні підсилювачі використовувалися в таких різноманітних застосуваннях, як міжміська телефонія та індустрія звукозапису.

Наступний великий технологічний крок зайняв кілька десятиліть, коли з'явилася *твердотільна електроніка* з першим працюючим напівпровідниковим *біполярним транзистором*, який був винайдений Вільямом Шоклі, Волтером Хаузером Браттеном та Джоном Бардіном у 1947 році. Вакуумна лампа більше не була єдиним засобом керування потоком електронів.

Польовий, або МОП-транзистор (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor — MOSFET*) був згодом винайдений Мохамедом Аталлою і Довоном Кангом у Bell Labs в 1959 році і став першим компактним транзистором, який можна було мініатюризувати і випускати в масове виробництво. Його переваги включають високу масштабованість, доступність, низьке енергоспоживання та високу щільність. Він зробив революцію в електронній промисловості, ставши найбільш

широко використовуваним електронним пристроєм у світі. МОП-транзистор є основним елементом більшості сучасного електронного обладнання, і він був центральним у революції електроніки, революції мікроелектроніки та цифрової революції. Таким чином, MOSFET вважається народженням сучасної електроніки і, можливо, найважливішим винаходом в електроніці.

Це зіграло ключову роль у появі мікроелектроніки та цифрової революції. Сьогодні електронні пристрої повсюдно використовуються в комп'ютерах, телекомунікаціях та обробці сигналів із використанням інтегральних схем з мільйонами транзисторів на одному чіпі.

### Галузі електроніки

Електроніка має такі галузі:

- Цифрова електроніка
- Аналогова електроніка
- Силова електроніка
- Оптоелектроніка
- Нанoeлектроніка
- Біoeлектроніка

Розглянемо детальніше кожен галузь

### Аналогова електроніка

*Аналогова електроніка* (*analog electronics*) — це електронні системи з безперервним змінним сигналом, на відміну від цифрової електроніки, де сигнали зазвичай мають лише два рівні. Термін «аналог» описує пропорційне співвідношення між сигналом і напругою або струмом, які представляють сигнал. Слово аналог походить від грецького слова *ἀνάλογος* (*analogos*), що означає «пропорційний».

*Аналоговий сигнал* використовує деякі атрибути середовища для передачі інформації сигналу. Наприклад, anerоїдний барометр використовує кутове положення стрілки як сигнал для передачі інформації про зміни атмосферного тиску. Електричні сигнали можуть представляти інформацію, змінюючи їх напругу, струм, частоту або загальний заряд. Інформація перетворюється з іншої фізичної форми (наприклад, звук, світло, температура, тиск, положення) в електричний сигнал за допомогою перетворювача, який перетворює один тип енергії в інший (наприклад, мікрофон).

Сигнали приймають будь-яке значення з заданого діапазону, і кожне унікальне значення сигналу представляє різну інформацію. Будь-яка зміна сигналу має сенс, і кожен рівень сигналу представляє інший рівень явища, яке він представляє. Наприклад, припустимо, що сигнал використовується для представлення температури, причому один вольт представляє один градус Цельсія. У такій системі 10 вольт означало б 10 градусів, а 10,1 вольт означало б 10,1 градуса.

Іншим методом передачі аналогового сигналу є використання модуляції. При цьому деякі властивості сигналу базової несучої змінюються: амплітудна модуляція (АМ) включає зміну амплітуди синусоїдальної форми хвилі напруги інформацією про джерело, частотна модуляція (ЧМ) змінює частоту. Також використовуються інші методи, такі як фазова модуляція або зміна фази несучого сигналу.

В аналоговому звукозаписі зміна тиску звуку, що падає на мікрофон, створює відповідну зміну струму, що проходить через нього, або напруги на ньому. Збільшення гучності звуку призводить до того, що коливання струму або напруги пропорційно збільшуються, зберігаючи ту саму форму або форму хвилі.

Механічні, пневматичні, гідравлічні та інші системи також можуть використовувати аналогові сигнали

### Методи обробки аналогових сигналів

У аналоговій електроніці широко використовуються такі методи обробки аналогових сигналів:

- підсилення;
- фільтрація;
- модуляція;
- нелінійні перетворення.

Проаналізуємо детальніше кожен з цих методів.

**Підсилення аналогового сигналу.** Підсилення аналогового сигналу — це збільшення його потужності, напруги, струму. *Електронний підсилювач* (*amplifier*), або просто *підсилювач* — це електронний пристрій, який збільшує потужність сигналу, або його напругу чи струм. Це електронний пристрій з входом і виходом, який використовує електричну енергію від джерела живлення для збільшення амплітуди сигналу, що подається на його вхідні клеми, створюючи пропорційно більшу амплітуду сигналу на своєму виході. Значення підсилення, яку забезпечує підсилювач, вимірюється відношенням вихідної напруги, струму або потужності до вхідної. Підсилювач — це пристрій, який має посилення потужності більше одиниці.

Підсилювач може бути як окремим обладнанням, так і електричним ланцюгом, що міститься в іншому пристрої. Підсилювач є основоположним для сучасної електроніки, а підсилювачі широко використовуються майже у всьому електронному обладнанні. Підсилювачі можна розділити на різні категорії. Один з них — частота посилення електронного сигналу. Наприклад, аудіопідсилювачі підсилюють сигнали в звуковому (звуковому) діапазоні менше 20 кГц, РЧ підсилювачі підсилюють частоти в діапазоні радіочастот від 20 кГц до 300 ГГц, а сервопідсилювачі та приладові підсилювачі можуть працювати з дуже низькими частотами до постійний струм. Підсилювачі також можна класифікувати за їх фізичним розміщенням у сигнальному ланцюжку; наприклад, попередній підсилювач може передувати іншим етапам обробки сигналу. Першим практичним електричним пристроєм, який міг підсилити, була тріодна вакуумна лампа, винайдена в 1906 році Лі Де Форестом, яка привела до появи перших підсилювачів приблизно в 1912 році. Сьогодні більшість підсилювачів використовують транзистори.

*Види підсилювачів.* Усі підсилювачі мають певну форму активного пристрою: це пристрій, який здійснює фактичне підсилення. Активним пристроєм може бути вакуумна лампа, дискретний твердотільний компонент, такий як один транзистор, або частина інтегральної схеми, як в операційному підсилювачі.

На початкових етапах розвитку електроніки широко використовувалися підсилювачі на електронних лампах. Лампові підсилювачі використовують в якості

активного пристрою вакуумну лампу. Вакуумні лампи продовжують використовуватися в деяких високоякісних аудіопристроях, а також у підсилювачах музичних інструментів, через перевагу «лампового звуку».

Транзисторні підсилювачі (або твердотільні підсилювачі) є найпоширенішим типом підсилювачів, які використовуються сьогодні. В якості активного елемента використовується транзистор. Коефіцієнт посилення підсилювача визначається властивостями самого транзистора, а також кола, в якому він міститься.

Поширені активні пристрої в транзисторних підсилювачах включають транзистори з біполярним переходом (BJT) і металооксидні напівпровідникові польові транзистори (MOSFET).

Підсилення на основі транзистора може бути реалізовано з використанням різних конфігурацій: наприклад, транзистор з біполярним переходом може реалізувати підсилення із загальною базою, загальним колектором або загальним емітером; MOSFET може реалізувати підсилення загального затвора, загального джерела або загального стоку. Кожна конфігурація має різні характеристики.

Багато мікрохвильових підсилювачів є спеціально підсилювачами на основі клістрона, гіротрона, лампи біжучої хвилі та підсилювач із перехресним полем, і ці мікрохвильові підсилювачі забезпечують набагато більшу вихідну потужність на мікрохвильових частотах окремого пристрою, ніж твердотільні пристрої

Магнітні підсилювачі — це пристрої, дещо схожі на трансформатор, де одна обмотка використовується для контролю насичення магнітного сердечника і, отже, зміни опору іншої обмотки.

Вони значною мірою вийшли з ужитку через розробку напівпровідникових підсилювачів, але все ще корисні для керування HVDC та в схемах керування ядерною енергетикою, оскільки на них не впливає радіоактивність.

Негативні опори можна використовувати як підсилювачі, наприклад, тунельний діодний підсилювач.

*Властивості підсилювача.* Властивості підсилювача визначаються параметрами, які включають:

- Підсилення, відношення між величиною вихідного та вхідного сигналів;
- Пропускна здатність, ширина корисного діапазону частот;
- ККД, відношення між потужністю на виході та загальною споживаною потужністю;
- Лінійність, ступінь, до якої пропорція між вхідною та вихідною амплітудою однакова для високої амплітуди та низької амплітуди;
- Шум, міра небажаного шуму, змішаного з виходом;
- Вихідний динамічний діапазон, відношення найбільшого та найменшого корисних вихідних рівнів;
- Максимальна швидкість зміни виходу (Slew rate);
- Час наростання, час встановлення, коливання і перевищення, які характеризують реакцію на одиничний імпульс;
- Стійкість, здатність уникати автоколивань.

Підсилювачі описуються відповідно до властивостей їхніх входів, виходів і того, як вони пов'язані. Усі підсилювачі мають коефіцієнт підсилення, який зв'язує величину деякої властивості вихідного сигналу з властивістю вхідного сигналу.

Підсилення може бути визначено як відношення вихідної напруги до вхідної напруги (підсилення напруги), вихідної потужності до вхідної потужності (підсилення потужності) або певної комбінації струму, напруги та потужності. У багатьох випадках змінна властивість виходу залежить від тієї самої властивості входу, що робить коефіцієнт підсилення безрозмірним (часто виражається в децибелах (дБ)).

Більшість підсилювачів розроблені як лінійні. Тобто вони забезпечують постійне посилення для будь-якого нормального рівня вхідного та вихідного сигналу. Якщо посилення підсилювача не є лінійним, вихідний сигнал може спотворитися.

Підсилювачі зазвичай розроблені так, щоб добре функціонувати в конкретному застосуванні, наприклад: радіо- та телевізійні передавачі та приймачі, високоякісне ("hi-fi") стереообладнання, мікрокомп'ютери та інше цифрове обладнання, а також гітарні та інші інструментальні підсилювачі.

*Негативний зворотний зв'язок.* Негативний зворотний зв'язок – це техніка, яка використовується в більшості сучасних підсилювачів для покращення смуги пропускання, спотворення та регулювання посилення. У підсилювачі з негативним зворотним зв'язком частина виходу повертається і додається до входу в протилежній фазі, віднімаючи від входу. Основний ефект полягає в зменшенні загального підсилення системи. Однак будь-які небажані сигнали, що вносяться підсилювачем, наприклад спотворення, також повертаються. Оскільки вони не є частиною вихідного входу, вони додаються до вхідних даних у протилежній фазі, віднімаючи їх від вхідних даних. Таким чином, негативний зворотний зв'язок також зменшує нелінійність, спотворення та інші помилки, що вносяться підсилювачем. Велика кількість негативного зворотного зв'язку може зменшити помилки до такої міри, що реакція самого підсилювача стає майже нерелевантною, якщо він має велике посилення, а вихідна продуктивність системи ("продуктивність замкнутого циклу") повністю визначається компоненти в петлі зворотного зв'язку. Цей метод особливо використовується з операційними підсилювачами (ОП).

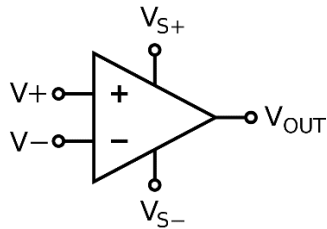
Підсилювачі без зворотного зв'язку можуть досягати лише близько 1% спотворення для аудіо-частотних сигналів. При негативному зворотному зв'язку спотворення зазвичай можна зменшити до 0,001%. Шум, навіть перехресне спотворення, можна практично усунути. Негативний зворотний зв'язок також компенсує зміну температури та погіршення чи нелінійність компонентів на етапі підсилення, але будь-яка зміна чи нелінійність компонентів у контурі зворотного зв'язку вплине на вихід. Дійсно, здатність контуру зворотного зв'язку визначати вихід використовується для створення ланцюгів активних фільтрів.

Ще одна перевага негативного зворотного зв'язку полягає в тому, що він розширює смугу пропускання підсилювача. Концепція зворотного зв'язку використовується в операційних підсилювачах для точного визначення коефіцієнта посилення, пропускну здатності та інших параметрів, повністю заснованих на компонентах контуру зворотного зв'язку.

Негативний зворотний зв'язок може застосовуватися на кожному етапі підсилювача для стабілізації робочої точки активних пристроїв від незначних змін напруги джерела живлення або характеристик пристрою.

Деякі зворотні зв'язки, позитивні чи негативні, неминучі і часто небажані — вносяться, наприклад, паразитними елементами, такими як притаманна ємність між входом і виходом таких пристроїв, як транзистори, і ємнісний зв'язок зовнішньої проводки. Надмірний частотно-залежний позитивний зворотний зв'язок може викликати паразитні коливання і перетворити підсилювач на осцилятор.

**Операційний підсилювач.** *Операційний підсилювач* (operational amplifier, *op atr*, *opamp*) — це електронний підсилювач напруги з високим коефіцієнтом посилення з диференціальним входом і, як правило, одностороннім виходом. Сучасні операційні підсилювачі виготовляються за інтегральними технологіями, тобто є *інтегральними мікросхемами*.



*Операційний підсилювач  $\mu A741$  і його умовне графічне позначення*

Операційний підсилювач виробляє вихідний потенціал (відносно заземлення), який зазвичай у 100 000 разів перевищує різницю потенціалів між його вхідними клемми. Операційні підсилювачі виникли в аналогових комп'ютерах, де їх використовували для виконання математичних операцій у лінійних, нелінійних і частотно-залежних схемах.

Смуга частот підсилення операційного підсилювача лежить в межах від нульової частоти (постійного струму) до десятків і сотень мегагерц.

Популярність операційного підсилювача як будівельного блоку в аналогових схемах пояснюється його універсальністю. Використовуючи негативний зворотний зв'язок, характеристики схеми операційного підсилювача, його підсилення, вхідний і вихідний опір, пропускну здатність тощо визначаються зовнішніми компонентами і мало залежать від температурних коефіцієнтів або інженерних допусків самого операційного підсилювача.

Операційні підсилювачі сьогодні широко використовуються в електронних пристроях, включаючи широкий спектр побутових, промислових і наукових пристроїв. Багато стандартних операційних підсилювачів ІС коштують лише кілька центів; однак деякі інтегровані або гібридні операційні підсилювачі зі спеціальними характеристиками можуть коштувати понад 100 доларів США в невеликій кількості. Операційні підсилювачі можуть бути упаковані як компоненти або використовуватися як елементи більш складних інтегральних схем.

**Фільтрація аналогового сигналу.** Фільтрація сигналів є одним із найважливіших видів обробки сигналів (як аналогових, так і цифрових), що полягає у перетворенні спектра сигналів за допомогою спеціальних пристроїв, які називаються *електричними фільтрами*, або просто *фільтрами*.

У каналах електронних пристроїв крім корисних сигналів, що несуть інформацію, діють завади і шуми, які корисної інформації не несуть і спотворюють корисний сигнал. Одним з ефективних засобів зменшення негативного впливу завад є застосування фільтрації сигналів. За допомогою фільтрації зменшують також негативний вплив перехресних завад, обумовлених дією сигналів сусідніх каналів. Крім зменшення впливу завад фільтрація застосовується для коригування амплітудно-частотних характеристик багатьох пристроїв, зокрема, датчиків фізичних величин.

Електричні фільтри, за допомогою яких здійснюється фільтрація сигналів, побудовані на основі різноманітних фізичних принципів. За видом сигналу, що обробляється, фільтри поділяються на *аналогові* і *цифрові*. Фільтри, для побудови яких використовувалися пасивні елементи: резистори, конденсатори, котушки індуктивності, називаються *пасивними*. Якщо ж крім пасивних елементів у аналогових фільтрах застосовано транзистори й операційні підсилювачі, то такі фільтри називаються *активними*.

*Характеристики й параметри фільтрів.* Фільтр як електронний пристрій характеризується такими характеристиками: імпульсною і перехідною характеристиками у часовій області й комплексною, амплітудно-частотною й фазочастотною характеристиками у частотній області. *Амплітудно-частотна характеристика фільтра* — це залежність відношення амплітуд  $U_{my}$  вихідного й вхідного  $U_{mx}$  сигналів ( $U_{my}/U_{mx}$ ) від частоти  $f$ , або кутової частоти  $\omega$ .

$$K(\omega) = \frac{U_{my}}{U_{mx}}(\omega) = \frac{U_{my}(\omega)}{U_{mx}(\omega)}. \quad (5.1)$$

Характерною прикметою амплітудно-частотної характеристики фільтрів є наявність двох інтервалів частот, або, як їх здебільшого називають, *смуг частот*, значення  $K(\omega)$  у яких різко відрізняються. Значення амплітудно-частотної характеристики у *смузі пропускання* набагато більші значень цієї характеристики у *смузі затримання*.

Отже, у смузі пропускання вхідний сигнал передається на вихід, пропускається з незначними спотвореннями, а у багатьох випадках навіть підсилюється, а у смузі затримання зменшується у сотні, тисячі і навіть більше разів. Між смугою пропускання й смугою затримання розміщується *перехідна смуга*. Смуга пропускання фільтра обмежена граничними значеннями мінімальної  $\omega_{p1}$  і максимальної  $\omega_{p2}$  частот. Аналогічні значення мінімальної  $\omega_{s1}$  і максимальної  $\omega_{s2}$  граничних частот має й смуга затримання. Кожна з частот  $\omega_{p1}$ ,  $\omega_{p2}$ ,  $\omega_{s1}$ ,  $\omega_{s2}$  зокрема можуть мати нульові значення і нескінченно великі значення. Частота  $\omega_0$ , що розміщена посередині смуги пропускання, називається *центральною частотою* фільтра. Частота  $\omega_c$ , на якій значення  $K(\omega_c)$  у

## Розділ 11

$\sqrt{2}$  разів, або на 3 дБ менше за значення  $K(\omega_0)$  на центральній частоті, називається *частотою зрізу*.

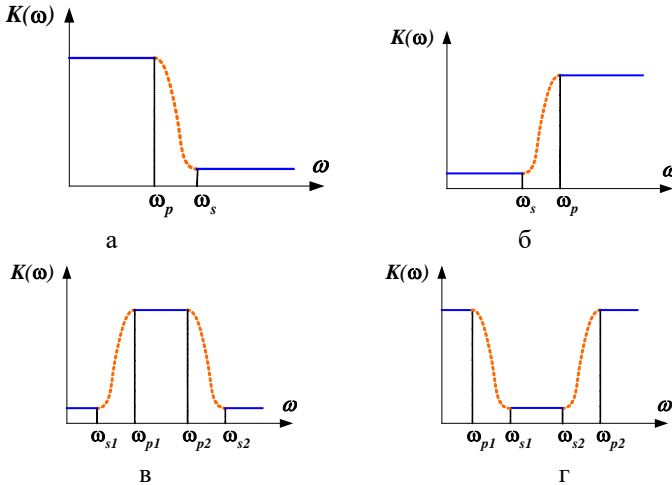
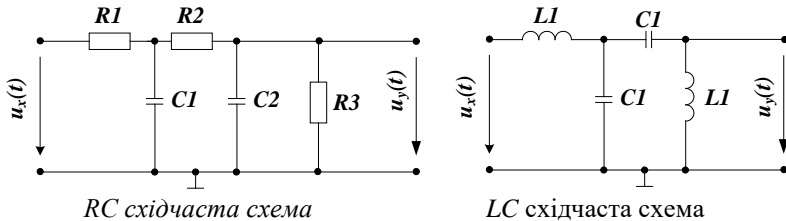


Рис. 5.1

За взаємним розміщенням смуг пропускання й затримування фільтри поділяються на такі види:

- фільтри нижніх частот (ФНЧ) (рис. 5.1 а);
- фільтри верхніх частот (ФВЧ) (рис. 5.1 б);
- смугові фільтри (рис. 5.1 в);
- загороджувальні (режекторні) фільтри (рис. 5.1 г).

*Пасивні аналогові фільтри.* Пасивні аналогові фільтри складаються з пасивних елементів: резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності (індукторів). Пасивні аналогові фільтри були першим і єдиним типом фільтрів, які застосовувалися на початкових етапах розвитку електронної техніки.



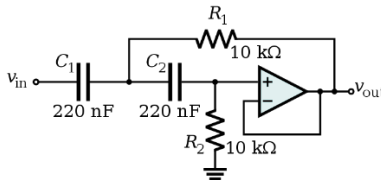
Продовжують застосовуватися пасивні фільтри і зараз, особливо у пристроях, що працюють у діапазоні високих частот, хоча сфера їх застосування значно звужилася. Причинами такого звуження є значне зменшення рівня вихідного сигналу фільтра, порівняно з вхідним, застосування у пасивних фільтрах котушок індуктивності, маса і габарити яких набагато перевищують аналогічні



показники інших елементів. Крім того, котушки індуктивності неможливо виготовляти за новітніми інтегральними технологіями і сумішати їх з елементами і пристроями, виготовленими за такими технологіями.

Як і для будь-якого фільтра взагалі, для аналогового пасивного фільтра спочатку, за вимогами до фільтра, вибирається тип апроксимації амплітудно-частотної характеристики фільтра (апроксимація Батерворта, Чебишева тощо) і порядок фільтра. Далі, на наступному етапі вибирається спосіб реалізації вибраного типу фільтра.

*Активні аналогові фільтри.* **Активними** аналоговими фільтрами називаються фільтри, до складу яких, крім пасивних елементів (резисторів, конденсаторів, індукторів), входять активні елементи: біполярні і польові транзистори, операційні підсилювачі.



*Активний фільтр на операційному підсилювачі*

Як вже зазначалося, реалізація фільтрів виключно на пасивних елементах, особливо в діапазоні низьких частот, пов'язана з низкою труднощів: габарити і маса пасивних елементів мають недопустимо великі значення, неможливість застосувати для виготовлення котушок індуктивності сучасні інтегральні технології, низька точність тощо.

Щоб поліпшити якісні показники аналогових фільтрів, до їх складу почали включати активні елементи. На початкових етапах історичного розвитку електронної техніки це були вакуумні лампи, а потім транзистори.

Особливо бурхливого розвитку набули активні фільтри з освоєнням і масовим випуском дешевих операційних підсилювачів, виготовлених за сучасними інтегральними технологіями. Активні фільтри, у яких у якості активних елементів використовуються операційні підсилювачі, мають якісні показники, які набагато перевищують аналогічні показники інших типів фільтрів, тому у подальшому аналізуватимуться саме такі фільтри. Слід зазначити, що переважна більшість активних фільтрів реалізується без застосування котушок індуктивності.

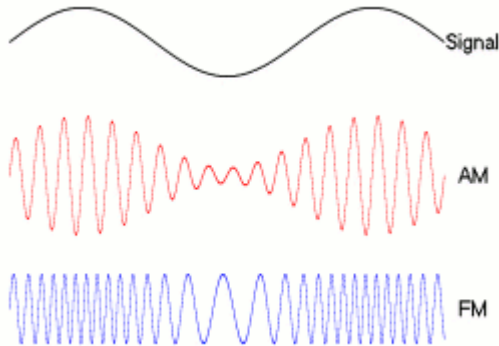
Як і у проектуванні пасивних фільтрів, розробка активного фільтра починається з апроксимації амплітудно-частотної характеристики плавною раціональною функцією частоти. Для активних фільтрів використовуються ті ж самі апроксимації (Батерворта, Чебишева тощо), що й для пасивних.

Активні фільтри на операційних підсилювачах можуть реалізовуватися **прямими** методами, коли задана комплексна частотна характеристика реалізується у цілому, і **каскадними** методами, коли задана комплексна частотна

характеристика формується каскадним з'єднанням окремих ланок, як правило другого порядку (так званих **біквдратних ланок**, або скорочено **біквдрів**).

**Модуляція і демодуляція аналогового сигналу.** В електроніці та телекомунікаціях **модуляція** — це процес зміни однієї або кількох властивостей періодичної форми сигналу, який називається **несучим сигналом**, з окремим сигналом, який називається **сигналом модуляції**, який зазвичай містить інформацію для передачі. Наприклад, сигналом модуляції може бути аудіосигнал, що представляє звук від мікрофона, відеосигнал, що представляє рухомі зображення з відеокамери. Несуча має вищу частоту, ніж сигнал модуляції. Мета модуляції — нанести інформацію на несучу хвилю, яка використовується для перенесення інформації в інше місце. У радіозв'язку модульована несуча передається через простір у вигляді радіохвилі до радіоприймача. Іншою метою є передача кількох каналів інформації через єдине середовище зв'язку, використовуючи частотне мультиплексування.

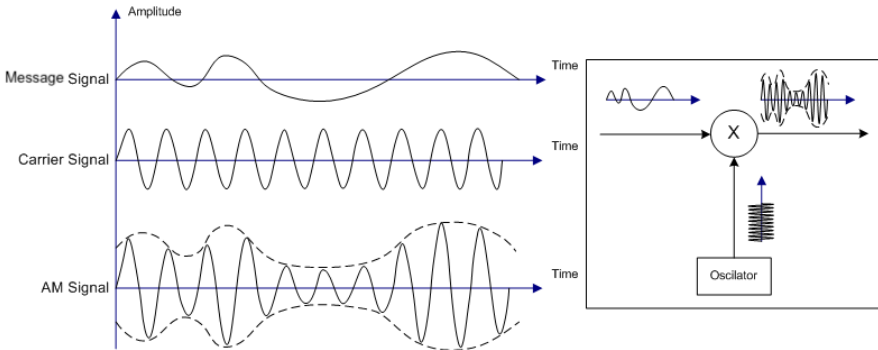
**Модулятор** — це пристрій або схема, яка виконує модуляцію. **Демодулятор** (іноді детектор) — це схема, яка виконує демодуляцію, зворотну модуляції. Модем (від модулятор–демодулятор), що використовується в двонаправленому зв'язку, може виконувати обидві операції. Смуга частот, яку займає модуляційний сигнал, називається **основною смугою**, тоді як смуга вищих частот, яку займає модульована несуча, називається **смугою пропускання**.



Найбільшого поширення знайшли такі види модуляції аналогового сигналу:

- амплітудна модуляція;
- частотна модуляція;
- фазова модуляція.

**Амплітудна модуляція.** **Амплітудна модуляція** (*Amplitude modulation — AM*) — це метод модуляції, який використовується в електронному зв'язку, найчастіше для передачі повідомлень за допомогою радіохвилі. При амплітудній модуляції амплітуда (рівень сигналу) несучої хвилі змінюється пропорційно амплітуді сигналу повідомлення, такого як звуковий сигнал.



*Схема амплітудної модуляції*

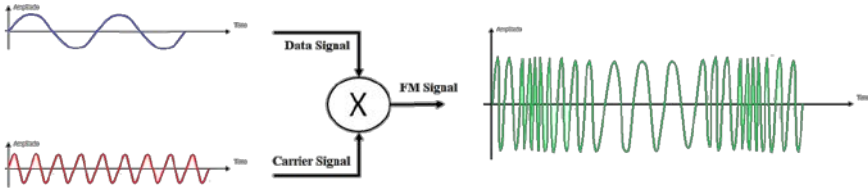
Амплітудна модуляція була найпершим методом модуляції, який використовувався для передачі звуку в радіомовленні. Він був розроблений у першій чверті 20 століття, починаючи з радіотелефонних експериментів Роберто Ланделла де Моури та Реджинальда Фессендена в 1900 році. Цю оригінальну форму амплітудної модуляції іноді називають **двосторонньою амплітудною модуляцією** (*double-sideband amplitude modulation — DSBAM*), оскільки стандартний метод створює бічні смуги на будь-якому стороні несучої частоти. **Односмугова модуляція** використовує смугові фільтри для усунення однієї з бічних смуг і, можливо, несучого сигналу, що покращує відношення потужності повідомлення до загальної потужності передачі, зменшує вимоги до потужності лінійних ретрансляторів і дає змогу краще використовувати смугу пропускання середовища передачі.

Амплітудна модуляція залишається у використанні в багатьох формах зв'язку на додаток до радіомовлення АМ: короткохвильове радіо, аматорське радіо, двостороннє радіо, УКХ-радіостанція, радіостанція для громадян, а також комп'ютерні модеми.

**Частотна модуляція.** **Частотна модуляція** (*Frequency modulation — FM*) — це кодування інформації в несучій хвилі шляхом зміни миттєвої частоти хвилі. Технологія використовується в телекомунікаціях, радіомовленні, обробці сигналів і обчислювальної техніки.

При аналоговій частотній модуляції, наприклад при радіомовленні, аудіосигналу, що представляє голос або музику, миттєве відхилення частоти, тобто різниця між частотою несучої та її центральною частотою визначається амплітудою модулюючого сигналу, що несе інформацію.

Частотна модуляція широко використовується для FM-радіомовлення. Вона також використовується в телеметрії, радіолокації, сейсмозв'язці та моніторингу за допомогою ЕЕГ, двосторонніх радіосистем, синтезу звуку, систем запису на магнітну стрічку та деяких систем передачі відео. У радіопередачі перевага частотної модуляції полягає в тому, що вона має більший відношення сигнал/шум і, отже, усуває радіочастотні перешкоди краще, ніж сигнал амплітудної модуляції рівної потужності. З цієї причини більшість музики транслюється по FM-радіо.



*Схема частотної модуляції*

Фазова модуляція — один з видів модуляції, при якій фаза носія коливання керується інформаційним сигналом. Фазомодульований сигнал  $s(t)$  має такий вигляд:

$$s(t) = g(t)\sin(2\pi f_c t + \varphi(t))$$

де  $g(t)$  — обвідна сигналу,  $\varphi(t)$  є сигналом модуляції,  $f_c$  — частота сигналу носія,  $t$  — час.

Фазова модуляція, не пов'язана з початковою фазою носійного сигналу, називається відносною фазовою модуляцією (ВФМ).

У випадку, коли інформаційний сигнал є дискретним, то говорять про **фазову маніпуляцію**.

За характеристиками фазова модуляція близька до частотної модуляції. У випадку синусоїдального модульованого (інформаційного) сигналу, результати частотної та фазової модуляції збігаються.

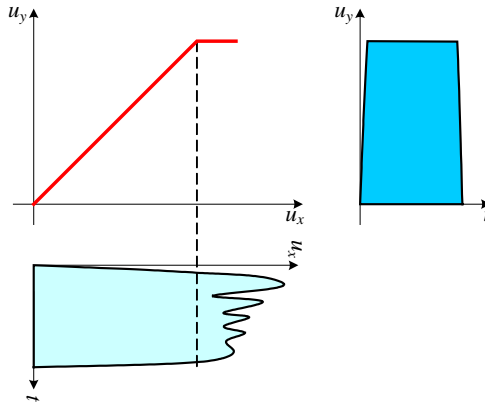
**Демодуляція. Демодуляція** — це виділення вихідного інформаційного сигналу з хвилі несучої. Демодулятор - це електронна схема (або комп'ютерна програма в програмно-визначеному радіоприймачі), яка використовується для відновлення інформаційного вмісту з модульованої несучої хвилі. Існує багато типів модуляції, тому існує багато типів демодуляторів. Сигнал, що виводиться з демодулятора, може представляти звук (аналоговий звуковий сигнал), зображення (аналоговий відеосигнал) або двійкові дані (цифровий сигнал).

Ці терміни традиційно використовуються у зв'язку з радіоприймачами, але багато інших систем використовують багато видів демодуляторів. Наприклад, у моделі, який є скороченням термінів модулятор / демодулятор, демодулятор використовується для вилучення послідовного цифрового потоку даних із сигналу несучої, який використовується для його передачі через телефонну лінію, коаксіальний кабель або оптичне волокно. .

**Нелінійні перетворення аналогового сигналу.** Важливою частиною обробки аналогових сигналів є нелінійне перетворення цих сигналів. Розглянемо найпоширеніші види нелінійних перетворень і пристроїв, які виконують ці перетворення.

**Обмежувачі імпульсів.** **Обмежувачем** називається пристрій, вихідний сигнал якого залишається практично незмінним, якщо вхідний сигнал перевищує певне значення. Обмеження імпульсів може бути зверху, якщо обмежується амплітуда імпульсів додатної полярності, знизу, якщо обмежуються імпульси

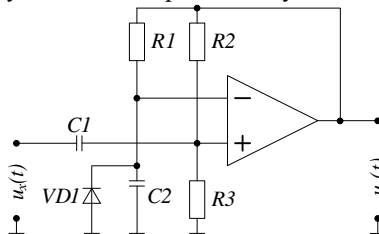
від'ємної полярності і двобічне обмеження, якщо обмежується амплітуда імпульсів як додатної, так і від'ємної полярності.



*Статична характеристика обмежувача*

Статична характеристика обмежувача, тобто залежність вихідного сигналу від вхідного є істотно нелінійна і має дві ділянки: **лінійну**, у межах якої вхідний сигнал має передаватися на вихід якомога точніше, з найменшими спотвореннями і **ділянку обмеження**, у межах якої вихідний сигнал підтримується із заданою точністю на сталому рівні. Відповідно до цього розрізняють два режими роботи обмежувача: **лінійний режим** передачі сигналу і **режим обмеження**.

**Одновібратор.** Одновібратори призначені для формування імпульсів заданої тривалості і амплітуди під дією вхідних імпульсів синхронізації. Крім того, одновібратор застосовується для затримки імпульсів на заданий відрізок часу.



*Одновібратор на операційному підсилювачі*

Одновібратор має один стійкий стан, у якому він може знаходитися як завгодно довго. Під дією відносно короткотривалого імпульсу синхронізації, що діє на вході, одновібратор переходить у тимчасово стійкий (квасістійкий) стан. Тривалість перебування одновібратора у тимчасово стійкому стані визначається сталою часу, яка залежить від ємності конденсатора і опору резистора, через який цей конденсатор розряджається.

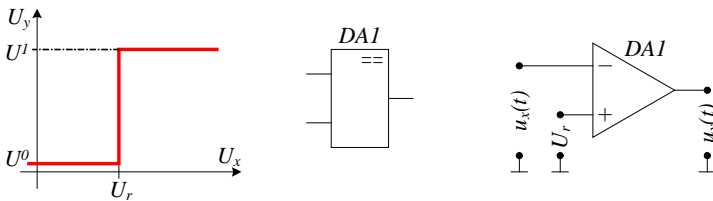
Перехід одновібратора зі стійкого стану у тимчасово стійкий, а також зворотний перехід відбувається за дуже короткий інтервал часу, практично миттєво, тому сформований одновібратором імпульс має круті фронти.

Для побудови одновібраторів використовуються дискретні елементи (транзистори, діоди, конденсатори, резистори), логічні елементи, операційні підсилювачі.

*Компаратор.* Компаратором називається пристрій, призначений для порівняння сигналів. На входи компаратора подаються два сигнали, які потрібно порівняти. Як правило один з сигналів приймається за опорний. У частковому випадку, опорний сигнал може дорівнювати нулю  $U_r=0$ . На виході компаратора формується логічний сигнал, який приймає значення логічної 1, якщо вхідний сигнал  $u_x$  більший за опорний  $U_r$ , і сигнал логічного нуля, якщо вхідний сигнал менше опорного

$$u_y = \begin{cases} \text{лог. 1, якщо } u_x \geq U_r \\ \text{лог. 0, якщо } u_x < U_r \end{cases}$$

Отже, компаратор є аналого-цифровим пристроєм: вхідні сигнали компаратора — аналогові, а вихідний сигнал — цифровий. Компаратор є невід'єм-



*Характеристика і умовні графічні позначення компаратора*

ною частиною багатьох пристроїв обробки інформації, зокрема він входить до складу майже всіх аналого-цифрових перетворювачів.

Операція порівняння сигналів, яку виконує компаратор, складна і складається з таких елементарних операцій:

- віднімання;
- підсилення;
- перетворення підсиленої різниці в логічний сигнал.

Операції віднімання і підсилення у сучасних компараторах виконують, як правило, за допомогою операційних підсилювачів. Перетворення підсиленої різниці у логічний сигнал виконується за допомогою порогових пристроїв: одновібраторів, тригерів Шміта, тригерів.

Найважливішими параметрами компаратора є чутливість, або роздільна здатність і тривалість перемикання. **Чутливістю**, або як її ще називають **роздільною здатністю** компаратора називається мінімальна різниця  $\Delta x_{min}$  між

вхідним  $u_x$  і опорним  $U_r$  сигналами, тобто  $\Delta x_{\min} = u_x - U_r$ , яка після підсилення призводить до спрацювання порогового пристрою і переключення вихідного сигналу з одного логічного рівня на інший. Чутливість компаратора є характеристикою його точності, оскільки  $\Delta x_{\min}$  — це абсолютна похибка порівняння сигналів. Чутливість компаратора визначається, в основному, коефіцієнтом підсилення операційного підсилювача: чим більший коефіцієнт підсилення, тим при меншій різниці між вхідним і опорним сигналом спрацює пороговий елемент. Слід зазначити, що з розвитком імпульсної техніки вимоги до точності весь час зростають.

**Тривалість перемикання** (цей параметр називають також затримкою поширення сигналу, швидкість реакції) називається інтервал часу від моменту, коли вхідний сигнал  $u_x$  зрівнявся з опорним  $U_r$ , до моменту появи на виході компаратора відповідного логічного сигналу. Тривалість перемикання є динамічною характеристикою компаратора, яка обумовлена його інертністю і характеризує його швидкодію. Тривалість перемикання залежить як від інертності вхідного операційного підсилювача, так і від інертності вихідного порогового пристрою. Щоб збільшити швидкодію компаратора, тобто зменшити тривалість перемикання потрібно збільшувати швидкодію вхідного операційного підсилювача, яка характеризується частотою одиничного підсилення.

Між вимогами збільшення точності, тобто збільшенням коефіцієнта підсилення і збільшення швидкодії, тобто збільшення частоти одиничного підсилення є протиріччя, оскільки добуток коефіцієнта підсилення і частоти одиничного підсилення для операційного підсилювача величина стала і зі збільшенням коефіцієнта підсилення зменшується частота одиничного підсилення і навпаки.

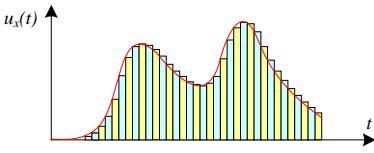
Крім цих двох найважливіших параметрів, компаратор характеризується низкою інших параметрів. Оскільки вхідним пристроєм компаратора є операційний підсилювач, то компаратор має такі ж характеристики, як і операційний підсилювач, а саме: напруга зміщення, вхідний струм, різниця вхідних струмів, температурний і часовий дрейфи тощо. Важливою характеристикою компаратора є його **завадостійкість**, тобто збереження роботоздатності в умовах дії завад.

**Пристрої вибірки-зберігання.** У багатьох електронних пристроях для подальшої обробки сигналів необхідно з аналогового сигналу вибрати окремі значення сигналу (дискретні сигнали) і зберігати ці значення впродовж певного інтервалу часу. Пристрої, призначені для виконання цих функцій називаються **пристроями вибірки-зберігання**. На рисунку, як приклад, наведена структура пристрою вибірки-зберігання.

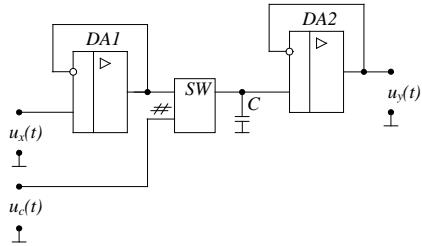
Цей пристрій почергово працює у двох режимах: **режим слідування** і **режим зберігання**. Режим роботи задається за допомогою сигналу керування: якщо сигнал керування дорівнює логічній 1, то пристрій працює у режимі

## Розділ 11

слідкування, а якщо сигнал керування дорівнює логічному 0, то пристрій працює у режимі зберігання.



Графік аналогового сигналу і перетвореного дискретного сигналу



Структура пристрою вибірки-зберігання

У режимі слідкування аналоговий ключ  $SW$  замкнений і вхідний сигнал  $u_x(t)$  через вхідний повторювач напруги на операційному підсилювачі  $DA1$  заряджає конденсатор  $C$ . Вхідний повторювач напруги призначений для забезпечення великого вхідного опору пристрою у цілому. Напруга на конденсаторі повторює зміни вхідної напруги. Вихідний опір операційного підсилювача  $r_y$  і конденсатор  $C$  утворюють інтегратор вхідного сигналу, стала часу якого дорівнює  $\tau = r_y C$ . Інтегрування вхідного сигналу призводить до динамічної похибки слідкування, яка полягає у тому що напруга на конденсаторі не встигає відслідковувати всі зміни вхідного сигналу внаслідок інертності конденсатора як реактивного елемента. Динамічна похибка залежить від співвідношення між сталою часу  $\tau = r_y C$  і тривалістю  $T_t$  режиму слідкування і для її зменшення потрібно щоб стала часу була набагато меншою за тривалість режиму слідкування.

У режимі зберігання ключ  $SW$  розмикається і заряд, накопичений у режимі слідкування на конденсаторі, а значить і напруга зберігають своє значення. Похибка у режимі зберігання спричинена розрядом конденсатора через опір розімкненого ключа і вхідний опір вихідного повторювача напруги на операційному підсилювачі  $DA2$ . Для зменшення похибки зберігання необхідно збільшувати сталу часу розрядання порівняно з тривалістю режиму зберігання.

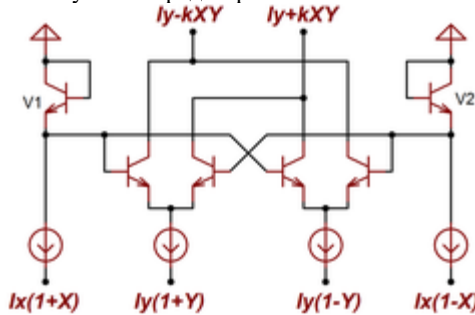
**Перемножування сигналів.** *Перемножування сигналів* є однією з найважливіших операцій, яка виконується під час обробки аналогових сигналів. Для здійснення операції перемножування застосовуються електронні пристрої, які називаються **перемножувачами** сигналів.

**Перемножувач Гільберта.** Один із найпоширеніших аналогових перемножувачів є перемножувач Гільберта, або комірка Гільберта.

**Комірка Гільберта (Gilbert cell)** в електроніці — схема чотириквadrантного аналогового помножувача, запропонована Баррі Гільбертом в 1968 році. Вона є



ядром помножувача на трьох диференціальних каскадах, доповнене діодними перетворювачами вхідних напруг - в струми ( $V1, V2$  на схемах). Комірка Гілберта, у модифікованій бета-залежній формі, виконує функцію змішувача або балансного модулятора в більшості сучасних радіоприймачів та стільникових телефонів.



Спрощена схема бета-залежного перемножувача Гілберта.

На відміну від попередніх схем перемножувачів, що оперували напругою, елементарна комірка Гілберта оперує виключно струмами — множники на вході задаються не напругами, а струмами, їх добуток зчитується також у формі струму. У схемі Гілберта було вперше скомпенсовано температурний дрейф та нелінійність традиційних помножувачів; У 1968 перші промислові зразки демонстрували повну похибку множення менше 1 % при робочих частотах до 500 МГц. Перші прецизійні помножувачі на комірці Гілберта з управлінням напругою (AD534) мали точність 0,1% ціною зменшення смуги до 1 МГц.

## Цифрова електроніка

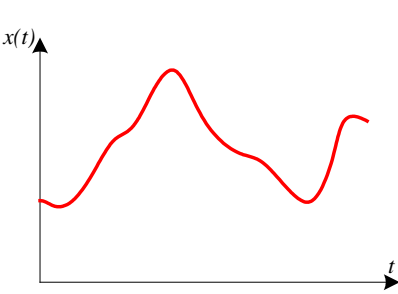
**Цифрова електроніка** (*Digital electronics*) — це галузь електроніки, що включає вивчення та розробку **цифрових пристроїв**, призначених для обробки **цифрових сигналів**.

**Цифрові сигнали** — це сигнали, які мають скінченну кількість значень і змінюються лише через певні проміжки часу. Сигнали, що мають скінченну кількість значень називаються **квантованими**, а сигнали, що змінюються лише через певні проміжки часу, називаються дискретизованими. Отже, цифровий сигнал є і квантованим, і дискретизованим. На відміну від цифрового, **аналоговий сигнал** має нескінченну кількість значень і змінюється неперервно у часі.

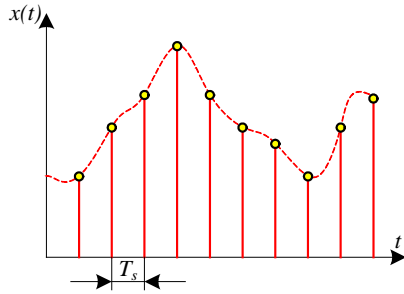
Цифровий сигнал є комбінацією **логічних сигналів**. Логічний сигнал несе інформацію про **логічні величини**.

**Логічною**, або **булевою** величиною називається величина, яка може мати тільки два значення. Такі величини, названі булевими на честь англійського вченого Д. Буля, який уперше запропонував і дослідив ці величини. Два альтернативні значення логічної величини можна позначати різними способами: двійковими цифрами 0,1; словами "істинно", "хибно", словами "так", "ні" тощо. У подальшому викладі використовуватимемо для логічних змінних

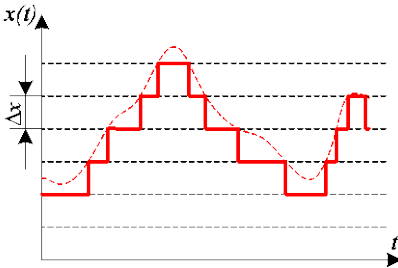
## Розділ 11



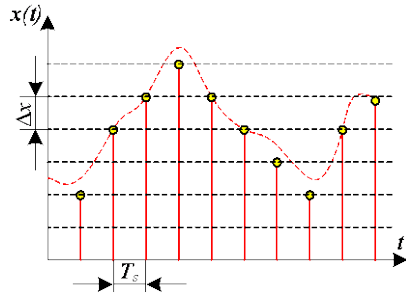
Аналоговий сигнал



Дискретизований сигнал



Квантований сигнал



Цифровий сигнал

двійкові цифри **0** і **1**. Сукупність символів, які використовуються для відображення значень змінних величин, називається *алфавітом*, а самі символи — *буквами* цього алфавіту. Отже алфавіт логічних змінних складається з двох букв **0** і **1**. Логічні змінні позначаються буквами латиниці  $x, y, z, \dots$ .

Логічні змінні і їх широке застосування у цифровій електроніці пояснюються простотою і зручністю їх реалізації за допомогою технічних пристроїв, що знаходяться у двох станах, наприклад, перемикач у станах "замкнено" і "розімкнено", транзистор у станах "відкритий" і "закритий", магнітопровід у станах "намагнічено" і "розмагнічено" тощо.

Термін „*логіка*” має багато значень і походить від давньогрецького λογική, що означає *наука про міркування, судження, або мистецтво міркування* і, у свою чергу походить від λόγος — слово, смисл, вчення, тобто логіка — це наука про форми, методи і закони мислення. Оскільки мислення оформляється у мові у виді *міркувань*, частковим випадком яких є *доведення* і *спростування*, логіка часто визначається як наука про способи міркування чи наука про способи доведення тверджень і спростування тверджень. Логіка як наука вивчає способи досягнення істини не з чуттєвого досвіду, а зі знань, отриманих раніше, тобто наука про способи отримання знань способом *виведення* — процесу, що продукує нові твердження із вже встановлених.

Важливою галуззю логіки є *математична логіка*, яка вивчає як застосування логіки для обґрунтування математичних теорій, так і застосування математичного апарату для дослідження проблем логіки. Математична логіка має багато областей застосування, зокрема вона широко застосовується у комп'ютерних науках.

Важливим застосуванням математичної логіки у комп'ютерних науках є *алгебра логіки*, математичний апарат якої є інструментом для синтезу цифрових пристроїв комп'ютера. Крім того, методи математичної логіки застосовуються для побудови інтелектуальних інформаційних систем.

*Алгебра логіки* — це наука, яка вивчає логічні величини, дії (операції) над логічними величинами і властивості цих операцій. Алгебра логіки є розділом математики, точніше розділом такої важливої математичної науки як алгебра. Важливість алгебри логіки полягає у тому, що вона є теоретичний інструмент для дослідження, аналізу і синтезу цифрових пристроїв, зокрема мікропроцесорів і комп'ютерів.

Над логічними величинами можна здійснювати математичні дії, або *операції*. У алгебрі логіки визначено три операції:

операцію *диз'юнкції*, або операцію *логічного додавання*, яка позначається символом « $\vee$ », або «+»;

операцію *кон'юнкції*, або операцію *логічного множення*, яка позначається символом « $\&$ », або « $\cdot$ », причому останній символ можна опускати;

операцію *заперечення*, або *інверсії*, яка позначається рискою над змінною, наприклад  $\bar{x}$ , або  $x'$ .

Операцію диз'юнкції називають також операцією **АБО** (англ. *OR*), операцію кон'юнкції — операцією **І** (англ. *AND*), операцію заперечення — операцією **НЕ** (англ. *NOT*).

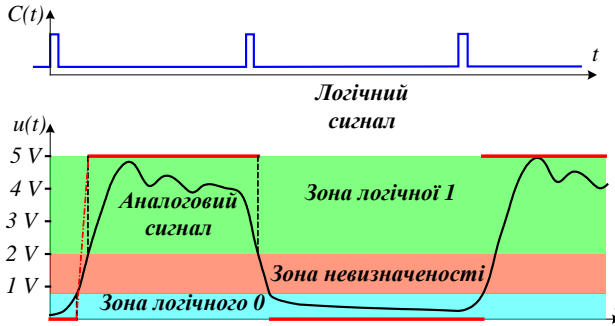
Крім операцій, в алгебрі логіки визначено *відношення еквівалентності*, яке позначається символом « $\Rightarrow$ ».

### Логічні сигнали

Логічний змінні величини в алгебрі логіки — це лише математична абстракція. Для фізичної реалізації логічних змінних використовують логічні сигнали. Сигналом, як відомо, називається фізичний процес, що несе інформацію. Відповідно, логічний сигнал несе інформацію у логічній формі, тобто у формі логічних величин.

За фізичною природою логічні сигнали можуть бути *електричні, пневматичні, гідравлічні*. У електричних логічних сигналах інформативним параметром, тобто фізичною величиною, що несе інформацію, є здебільшого електрична напруга, хоча іноді застосовується електричний струм. Інформативним параметром пневматичного логічного сигналу є тиск газу, здебільшого повітря, а у гідравлічних — тиск рідини.

## Розділ 11



Оскільки логічні величини можуть мати лише два значення (0, 1), то логічний сигнал має два стани, або два рівня — **високий** і **низький**. Сигнали, які можуть мати лише скінченну кількість значень, належать до класу **квантованих сигналів**. Отже, логічний сигнал є частковим випадком квантованого сигналу.

Логічні сигнали відносяться також до класу **дискретних** сигналів, тобто вони можуть змінюватися тільки через певний інтервал часу, який називається **періодом дискретизації**. Впродовж цього періоду дискретні сигнали, зокрема логічні сигнали мають незмінне значення. Період дискретизації задається у цифрових пристроях спеціальним сигналом, який називається сигналом **синхронізації** (англ. *clock*).

Отже, логічний сигнал є одночасно і квантованим, і дискретним.

На сучасному етапі розвитку цифрової техніки застосовуються переважно електричні логічні сигнали, у яких двом значенням логічних величин (0, 1) відповідають два рівні електричної напруги — **високий** і **низький**.

Переважає більшість сигналів у природі, у тому числі електричні сигнали, є **аналоговими**, тобто мають нескінченну кількість значень і можуть змінювати своє значення у будь-який момент часу. Щоб мати логічний сигнал, тобто дискретний квантований сигнал, потрібно здійснити перетворення фізичного аналогового сигналу у логічний (тобто дискретний квантований) сигнал. Таке перетворення виконується за допомогою спеціальних пристроїв, які називаються аналого-цифровими перетворювачами (АЦП).

Щоб перетворити електричний аналоговий сигнал, а саме електричну напругу, у логічний сигнал, весь діапазон зміни значень напруги поділяють на три зони: зона (діапазон) логічного нуля; зона (діапазон) логічної одиниці; зона невизначеності. У цифрових пристроях електрична напруга, як інформативний параметр аналогового сигналу, змінюється у межах від нуля до напруги живлення, яка у багатьох випадках вибирається рівною 5 В. Зона (діапазон) логічного нуля у такому разі встановлюється від нуля до 0.8 В, зона логічної одиниці — від 2 В до напруги живлення, тобто до 5 В, а зона невизначеності — від 0.8 В до 2 В.



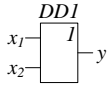
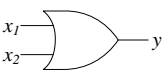
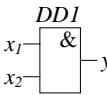
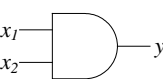
**Логічні елементи**

**Логічними елементами** (англ. *Logic Gate*) називаються елементарні цифрові пристрої, які виконують логічні операції над вхідними логічними сигналами. За фізичною природою логічні елементи, як і логічні сигнали, можуть бути електричні, пневматичні, гідравлічні.

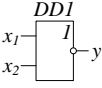
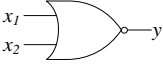
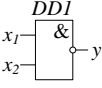
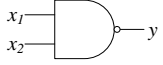
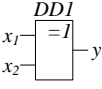

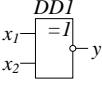

Сучасні цифрові пристрої побудовані, як правило, на електричних логічних елементах. Це обумовлено великою швидкістю, малим споживанням енергії, малими розмірами тощо. Виготовляються електричні логічні елементи з напівпровідникового матеріалу за сучасними інтегральними технологіями на поверхні кристалів кремнію.

Для позначення логічних елементів на схемах пристроїв застосовується згідно державних стандартів умовні графічні зображення логічних елементів у вигляді прямокутника із символом логічної операції у верхньому правому куті (табл. 8.). У англійській технічній літературі (стандарт IEEE/ANSI) застосовується дещо інші умовні графічні зображення логічних елементів (рис. 8.). Назви найпоширеніших логічних елементів, їх умовні графічні позначення і таблиці істинності для операцій, що реалізують ці елементи, зведені у таблицю

Таблиця

Назва логічного елемента	Умовне позначення		Таблиця істинності															
	ДСТУ	IEEE/ANSI																
НЕ (NOT)			<table border="1"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>y = \bar{x}</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	$x_1$	$y = \bar{x}$	0	1	1	0									
$x_1$	$y = \bar{x}$																	
0	1																	
1	0																	
АБО (OR)	$DD1$ 		<table border="1"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y = x_1 \vee x_2</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y = x_1 \vee x_2$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
$x_1$	$x_2$	$y = x_1 \vee x_2$																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	1																
І (AND)	$DD1$ 		<table border="1"> <tr><td><math>x_1</math></td><td><math>x_2</math></td><td><math>y = x_1 \cdot x_2</math></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	$x_1$	$x_2$	$y = x_1 \cdot x_2$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
$x_1$	$x_2$	$y = x_1 \cdot x_2$																
0	0	0																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

## Розділ 11

АБО-НЕ (NOR)			<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y = \overline{x_1 \vee x_2}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y = \overline{x_1 \vee x_2}$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y = \overline{x_1 \vee x_2}$																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	0																
І-НЕ (NAND)			<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y = \overline{x_1 \cdot x_2}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$																
0	0	1																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
Виключне АБО (XOR)			<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y = x_1 \oplus x_2</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y = x_1 \oplus x_2$	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
$x_1$	$x_2$	$y = x_1 \oplus x_2$																
0	0	0																
0	1	1																
1	0	1																
1	1	0																
Виключне АБО-НЕ (XNOR)			<table border="1" style="border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th><math>x_1</math></th> <th><math>x_2</math></th> <th><math>y = \overline{x_1 \oplus x_2}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	$x_1$	$x_2$	$y = \overline{x_1 \oplus x_2}$	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1
$x_1$	$x_2$	$y = \overline{x_1 \oplus x_2}$																
0	0	1																
0	1	0																
1	0	0																
1	1	1																

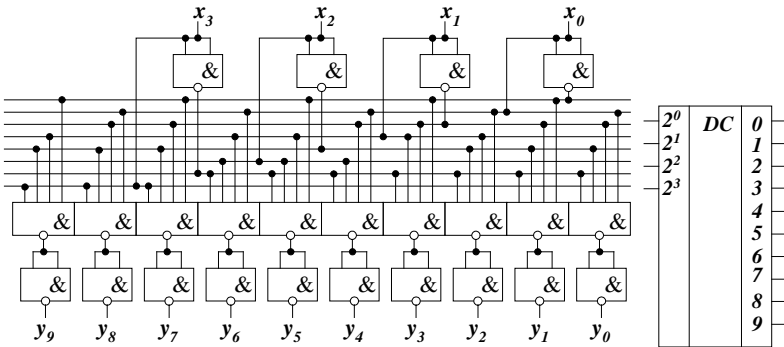
### Цифрові комбінаційні пристрої

*Цифровими комбінаційними пристроями* називаються електронні пристрої, які реалізують логічні функції і вихідний сигнал яких залежить тільки від сигналів на входах цього пристрою у даний момент часу. Будуються цифрові комбінаційні пристрої на основі логічних елементів OR, AND, NAND, XOR. Цифрові комбінаційні пристрої не використовують елементів пам'яті і зворотних зв'язків.

Цифрові комбінаційні пристрої використовуються як складові частини комп'ютерів, контролерів та інших цифрових пристроїв. Розглянемо комбінаційні цифрові пристрої, що найбільш широко використовуються для обробки інформації.

**Шифратори.** Шифратори (*encoder*) призначені для перетворення числа з одиничної позиційної системи числення у двійкове число.

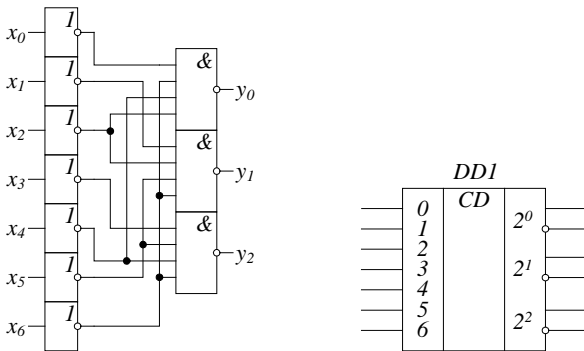
Шифратори застосовуються у системах переривання комп'ютерів, цифрових пристроях автоматичного керування, цифрових вимірювальних пристроях. В одиничній позиційній системі числення натуральне число  $N$  зображується одиницею у  $N$ -ому розряді, у той час як у решті розрядів стоять нулі, наприклад число 5 зображується так 00010000, число 7 — 01000000.



Реалізація дешифратора на логічних елементах і умовне графічне позначення згідно державних стандартів

**Дешифратори.** Дешифратори призначені для перетворення чисел із двійкової системи числення в одиничну позиційну систему числення.

Дешифратори застосовуються у пристроях керування центрального процесора, у системах електронної пам'яті для операцій з адресами, у цифрових контролерах тощо.



Реалізація шифратора на елементах НЕ (NOT) і І-НЕ (NAND)

Умовне графічне зображення шифратора на принципових схемах згідно державних стандартів

## Розділ 11

**Перетворювачі кодів.** Шифратори й дешифратори є частковими випадками більш загального класу комбінаційних цифрових пристроїв — *перетворювачів кодів*. Ці цифрові пристрої призначені для перетворення коду з однієї системи в іншу. У табл. 9.11, як приклад, наведено перші десять значень найбільш поширених кодів. Десяткова і двійкова системи числення як окремі часткові випадки систем кодування.

**Обернений двійковий код,** який застосовується у цифрових системах обробки інформації, можна отримати, якщо у прямому двійковому коді одиниці замінити нулями, а нулі одиницями.

**Код Грея,** у якого два сусідні значення відрізняються тільки одним розрядом, широко застосовуються в аналого-цифрових перетворювачах. Застосування коду Грея дає змогу скоротити тривалість перетворення, спростити кодувальні пристрої, а також істотно збільшити ступінь захисту від небажаних збоїв при переходах вихідного коду від одного значення до іншого.

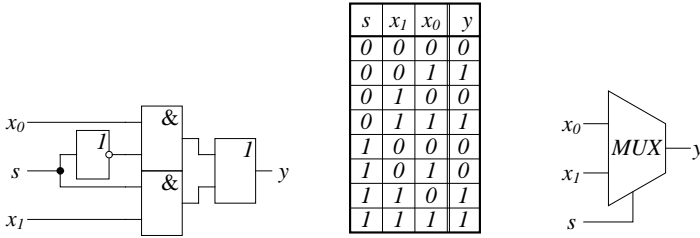
**Код Джонсона** характерний тим, що у кожному наступному значення кількість 1 у розрядах спочатку збільшується на одиницю, а потім, після заповнення 1 всіх розрядів числа, зменшується на одиницю. Код Джонсона відноситься до так званих *циклічних кодів* і широко застосовується для побудови спеціальних лічильників імпульсів.

Десяткові чи-	Двійкові числа	Обернений двійковий код	Код Грея	Код Джонсона	Температурний код
0	0000	1111	0000	00000	000000000
1	0001	1110	0001	00001	000000001
2	0010	1101	0011	00011	000000011
3	0011	1100	0010	00111	000000111
4	0100	1011	0110	01111	000001111
5	0101	1010	0111	11111	000011111
6	0110	1001	0101	11110	000011111
7	0111	1000	0100	11100	000111111
8	1000	0111	1100	11000	001111111
9	1001	0110	1101	10000	011111111

У аналого-цифрових перетворювачах паралельної дії широко застосовується *температурний код*, у якому значення кодується кількістю 1, починаючи справа.

**Мультиплексори.** Мультиплексор призначений для підключення на вхід каналу передачі інформації одного з вхідних сигналів. Кожному джерелу сигналу присвоюється порядковий номер — адреса джерела сигналу. До складу

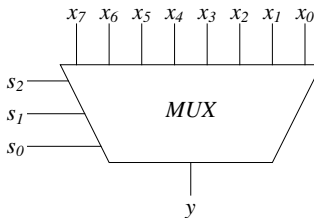
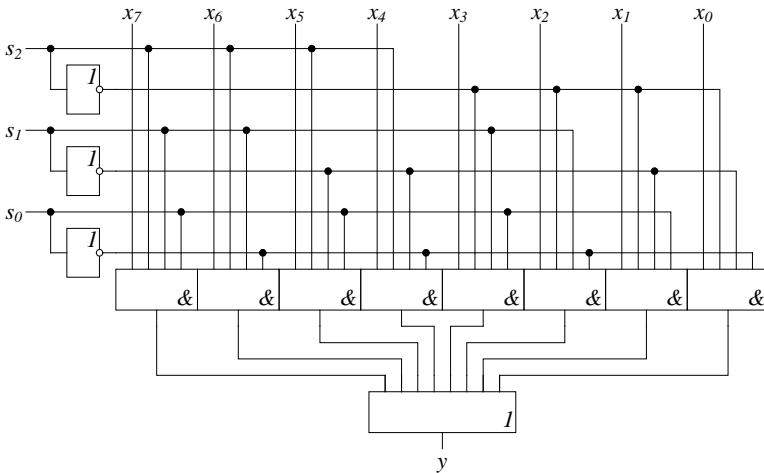




Найпростіший мультиплексор

мультиплексорів входить дешифратор адреси, який за вхідним двійковим кодом формує сигнал, що підключає на вхід каналу передачі вибраний сигнал.

Найпростіший мультиплексор передає на вихід  $y$  сигнал одного з двох входів  $x_0, x_1$ , які вибираються за сигналом вибору адреси  $s$ .

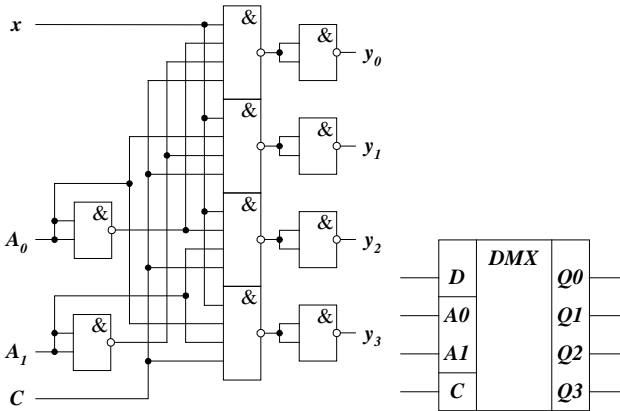


Мультиплексор на 8 входів і його умовне графічне позначення

## Розділ 11

Мультиплексор на вісім входів, керований сигналами вибору, зображений на рисунку.

**Демультимплексори.** У деяких цифрових пристроях необхідно здійснювати операцію, обернену мультиплексуванню, тобто демультимплексування сигналів. Ця операція полягає у підключенні одного сигналу на вхід одного з каналів передачі інформації. На рисунку наведено демультимплексор, який підключає сигнал  $x$  на вхід одного з чотирьох каналів передачі інформації. Номер



*Демультимплексор на чотири канали, синхронізований імпульсами  $C$*

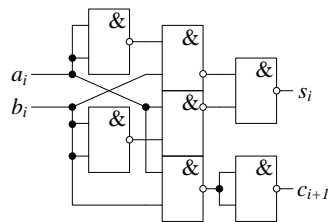
каналу, який є його адресою, формується за допомогою дешифратора адреси. Для застосування у демультимплексорів у синхронних пристроях вони мають синхронізуватися послідовністю імпульсів.

**Комбінаційні суматори.** Суматори — це комбінаційні цифрові пристрої, призначені для додавання двійкових чисел. Сума багаторозрядних двійкових чисел формується на основі однорозрядного додавання.

*Однорозрядні суматори.* Розглянемо додавання двох однорозрядних чисел, представлених у вигляді таблиці

Таблиця

$a_i$	$b_i$	$s_i$	$c_{i+1}$
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1



*Напісуматор*

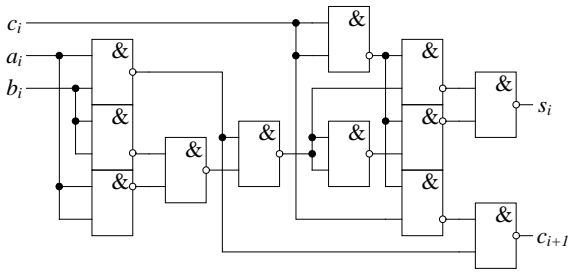
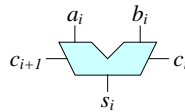
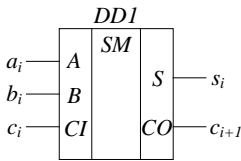


Схема повного однорозрядного суматора на логічних елементах І-НЕ



Умовне графічне позначення повного однорозрядного суматора на принципових та функціональних схемах

У таблиці представлено два однорозрядних доданки  $a_i, b_i$  сума  $s_i$  і перенос у старший розряд  $c_{i+1}$ . Логічний пристрій який реалізує обидві логічні функції  $s_i$  і  $c_{i+1}$  називається **напівсуматором**.

Під час додавання двох багаторозрядних двійкових чисел у кожному розряді крім двох однорозрядних доданків необхідно додавати також перенос із попереднього розряду. Суматор, що здійснює операцію додавання двох однорозрядних двійкових чисел  $a_i$  і  $b_i$ , а також переносу з попереднього молодшого розряду  $c_i$  називається **повним однорозрядним суматором**.

**Багаторозрядні суматори.** Розряди суми двійкового числа формуються як сума розрядів доданків і переносу з попереднього розряду у відповідності з правилом додавання двійкових чисел.

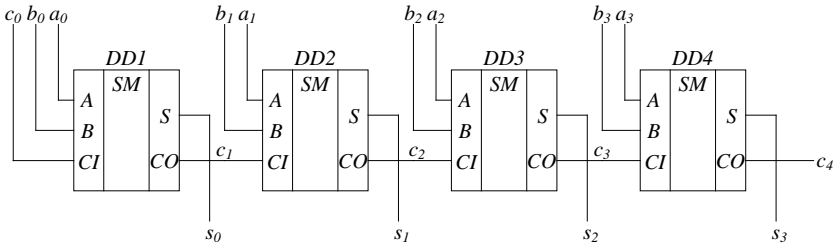
$$\begin{array}{r}
 + \quad a_3 \quad a_2 \quad a_1 \quad a_0 \\
 \quad b_3 \quad b_2 \quad b_1 \quad b_0 \\
 \hline
 c_4 \leftarrow s_3 \quad c_3 \leftarrow s_2 \quad c_2 \leftarrow s_1 \quad c_1 \leftarrow s_0
 \end{array}$$

Схема додавання багаторозрядних чисел

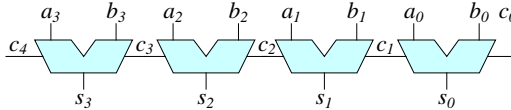
Багаторозрядні суматори двійкових чисел будуються на основі повних однорозрядних суматорів розрядів доданків, які зв'язані лініями переносу і виглядають у вигляді однієї мікросхеми.

Тривалість операції додавання визначається тривалістю поширення переносу з наймолодшого розряду до найстаршого і залежить від кількості розрядів. Такі паралельні суматори називаються **суматорами з послідовним переносом** (англ. *Ripple Carry*).

## Розділ 11



*Принципова схема суматора багаторозрядних чисел*



*Функціональна схема суматора багаторозрядних чисел*

Тривалість операції додавання можна істотно зменшити, якщо перенос поступатиме не послідовно, від одного розряду до іншого, а одночасно на всі розряди. Комбінаційні пристрої, які формують перенос на всі розряди паралельно, називаються **пристроями прискореного переносу**.

### Цифрові послідовнісні пристрої

**Цифрові послідовнісні (англ. sequential) пристрої** — це пристрої, вихідні сигнали яких залежать від вхідних сигналів не тільки у поточний момент часу, а й від вхідних сигналів у попередні моменти часу. Залежність вихідних сиг-

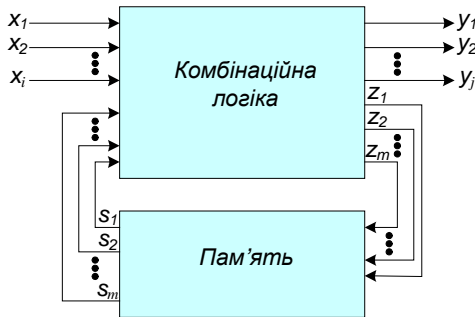


Рис. 10.1

налів послідовнісних пристроїв від вхідних у попередні моменти часу свідчить про те, що ці пристрої мають **пам'ять**, тому їх називають ще **цифрові пристрої з пам'яттю**. У технічній літературі для таких пристроїв широко застосовується ще одна назва — **цифровий автомат**.

Залежність вихідних сигналів послідовнісних пристроїв від вхідних у попередні моменти часу, тобто здатність *пам'ятати* передісторію, характеризується **станом** (англ. *state*) пристрою. Таким чином роботу послідовнісного пристрою можна трактувати як перехід цього пристрою від одного стану до іншого під дією вхідних сигналів. Інформація про стан послідовнісного пристрою зберігається в **елементах пам'яті**. Отже, до складу цифрового послідовнісного пристрою (цифрового автомата) входять **комбінаційні цифрові пристрої (комбінаційна логіка) і пристрої пам'яті**, або просто **пам'ять**.

Кожен елемент пам'яті зберігає одну одиницю інформації (біт). Під дією сигналу збудження  $z$  елемент пам'яті переходить з одного стану в інший. Інформацію про стан елемента пам'яті несе вихідний сигнал  $s$ . Сукупність станів елементів пам'яті  $s_1, s_2, \dots, s_n$  характеризує стан послідовнісного пристрою у цілому.

Цифрові послідовнісні пристрої описуються **характеристичними рівняннями**

$$y_1, y_2, \dots, y_j = f_1(x_1, x_2, \dots, x_i; s_1, s_2, \dots, s_n) .$$

Щоб перевести послідовнісний пристрій з одного стану в інший формуються **сигнали збудження**  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , які поступають на входи елементів пам'яті. Сигнали збудження залежать від вхідних сигналів  $x_1, x_2, \dots, x_j$  і стану пристрою  $s_1, s_2, \dots, s_n$  у поточний момент часу:

$$z_1, z_2, \dots, z_m = f_2(x_1, x_2, \dots, x_i; s_1, s_2, \dots, s_n) .$$

Крім характеристичних рівнянь, цифрові послідовнісні пристрої описуються також **таблицями переходів (характеристичними таблицями), таблицями збудження, графами**. Перебіг процесів в послідовнісних пристроях доцільно унаочнювати за допомогою **часових діаграм**.

### Тригери

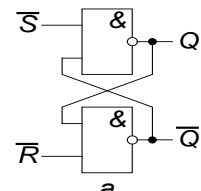
Тригером називається елементарний цифровий послідовнісний пристрій, який має лише один елемент пам'яті, тобто здатен запам'ятати одну одиницю інформації — біт. Здатність запам'ятовувати інформацію зумовлена наявністю у тригера двох стійких станів, які забезпечуються **зворотними зв'язками**. Перехід тригера з одного стійкого стану в інший здійснюється під дією вхідних сигналів. Два стійких стани тригера забезпечуються введенням зворотних зв'язків.

Оскільки тригер має два стійких стани і здатен зберігати лише один біт інформації, то для відображення цієї інформації достатньо одного вихідного логічного сигналу. Інакше кажучи, вихідний сигнал і стан тригера тотожні. Вихідний сигнал тригера зазвичай позначається літерою  $Q$ . Для зручності подальшої обробки інформації у тригера крім вихідного сигналу  $Q$  виводиться також інверсний вихідний сигнал  $\overline{Q}$ .

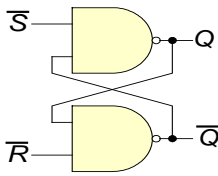
## Розділ 11

Тригери як послідовнісні пристрої поділяються на *синхронні* і *асинхронні*. За способом керування тригери поділяються на: *керovanі рівнем сигналу* і *керovanі перепадом сигналу*.

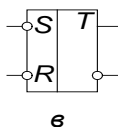
*Асинхронний RS-тригер*. Асинхронний RS-тригер має два стійких стани і переходить з одного стану в інший під дією двох вхідних логічних сигналів:  $S$  (від англ. *Set* — встановлювати) і  $R$  (від англ. *Reset* — скидати). Вихідний сигнал RS-тригера  $Q$  і його інверсія  $\bar{Q}$  в несе повну інформацію про стан тригера.



а



б



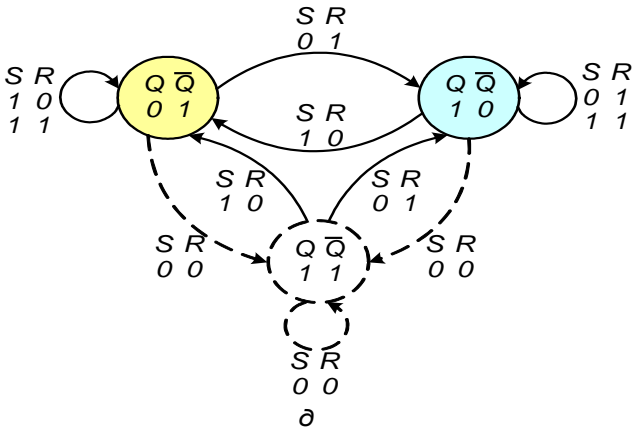
в

$\bar{S}$	$\bar{R}$	$Q$	$Q^+$	$\bar{Q}^+$	Режим
0	0	0	1	1	Заборонений
0	0	1	1	1	
0	1	0	1	0	Встановлення
0	1	1	1	0	
1	0	0	0	1	Скидання
1	0	1	0	1	
1	1	0	0	1	Збереження
1	1	1	1	0	

г

$Q$	$Q^+$	$\bar{S}$	$\bar{R}$
0	0	1	x
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	x	1

е



д

*RS-тригер на логічних елементах I-HE*

RS-тригер є основою, на якій будуються складніші види тригерів.

*Універсальний двоступінчастий JK-тригер*. JK-тригер має два інформаційних входи  $J$  (англ. *Jerk* — поштовх) і  $K$  (англ. *Kill* — анулювати, відмінити, вимкнути) і вхід синхронізації  $C$ . Дія сигналів  $J$  і  $K$  на входах JK-тригера аналогічна дії сигналів  $S$  і  $R$  на входах SR-тригера: якщо  $J=K=0$ , то тригер перебуває у стані збереження інформації; якщо ж  $J=1, K=0$ , то тригер

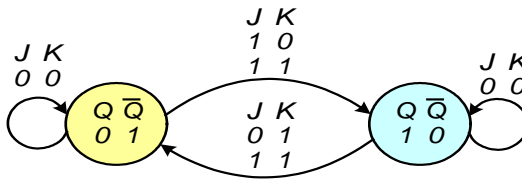
встановлюється у стан логічної одиниці ( $Q = 1; \bar{Q} = 0$ ); і у разі якщо  $J=0, K=1$ , то тригер скидається у стан логічного нуля ( $Q = 0; \bar{Q} = 1$ ).

J	K	Q	Q <sup>+</sup>	$\bar{Q}^+$	Режим
0	0	0	0	1	Збереження
0	0	1	1	0	
0	1	0	0	1	Скидання
0	1	1	0	1	
1	0	0	1	0	Встановлення
1	0	1	1	0	
1	1	0	1	0	Перехід у протилежний стан
1	1	1	0	1	

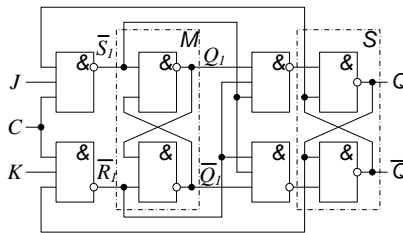
Q	Q <sup>+</sup>	J	K
0	0	0	0
0	1	1	X
1	0	X	1
1	1	0	0

б

а



в



*Універсальний двоступінчастий JK-тригер*

Перевагою JK-тригера у порівнянні з SR-тригером є відсутність у JK-тригера заборонених комбінацій: якщо входні сигнали  $J$  і  $K$  мають значення  $J=1, K=0$ , то JK-тригер переходить у протилежний стан.

**Регістри**

Розглянуті у попередньому підрозділі цифрові послідовнісні пристрої — тригери є елементами пам'яті і здатні зберігати одну одиницю інформації — біт, тобто зберігати однорозрядне двійкове число. Сучасні цифрові пристрої обробляють інформацію у формі багаторозрядних двійкових чисел, наприклад сучасні мікропроцесори виготовляються як 64-розрядні.

## Розділ 11

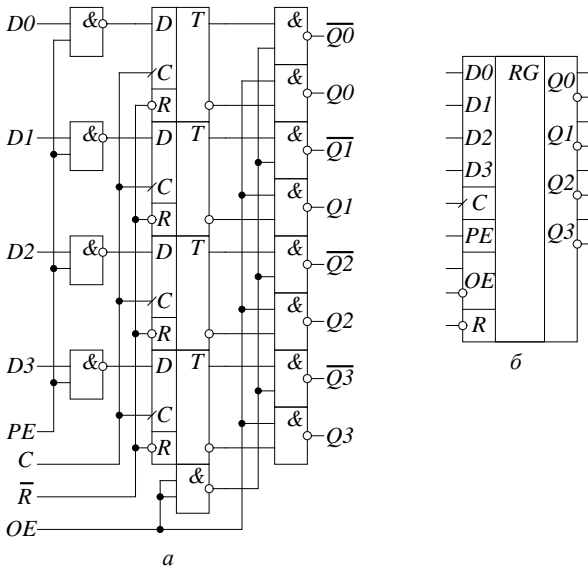
Цифрові послідовнісні пристрої, призначені для зберігання багаторозрядних двійкових чисел, будуються на основі тригерів і називаються *регістрами*.

Двійкова інформація може бути представлена у двох видах: у *послідовному коді*, коли розряди двійкових чисел поступають по одному провіднику послідовно, розряд за розрядом і у *паралельному коді*, коли всі розряди  $n$ -розрядного двійкового числа поступають по  $n$  провідникам одночасно.

За допомогою регістрів можна виконувати деякі види обробки інформації:

- очистка регістра, тобто запис у всі тригери регістра нулів;
- запис вхідної інформації — багаторозрядного двійкового числа паралельним кодом, тобто всіх розрядів одночасно;
- запис вхідної інформації послідовним кодом, тобто всіх розрядів послідовно, один за одним;
- зберігання записаної інформації;
- зсув записаного двійкового числа праворуч і ліворуч;
- видача записаної інформації у паралельному коді;
- видача записаної інформації у послідовному коді.

До найважливіших параметрів регістрів належать ємність і швидкодія регістрів.



Паралельний регістр

**Ємність (розрядність)** регістра визначається кількістю тригерів, що входять до його складу, а, отже, і кількістю розрядів двійкового числа, яке може

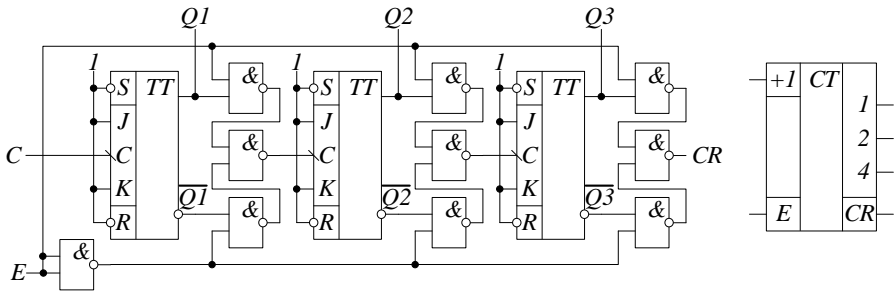


зберігати реєстр. **Швидкодія** реєстра визначається швидкодією тригерів, що входять до складу реєстрів.

Залежно від способу прийому й передачі інформації у двійковій формі реєстри поділяються на паралельні, послідовні, або реєстри зсуву та універсальні.

**Лічильники імпульсів**

Лічильниками імпульсів називаються цифрові послідовнісні пристрої, побудовані на основі тригерів і призначені для підрахунку кількості входних імпульсів і збереження цієї інформації. За способом підрахунку лічильники поділяються на лічильники додавання (англ. *Up Counter*), віднімання (англ. *Down Counter*), реверсивні (англ. *Up-Down Counter*). За способом переходу лічильника з одного стану в інший лічильники поділяються на **синхронні**, тригери яких переходять з одного стану в інший у визначений момент часу і **асинхронні**, перехід яких з одного стану до іншого відбувається послідовно, етап за етапом. У лічильників може бути організований послідовний, паралельний і комбінований перенос.



Лічильник імпульсів

Основними параметрами лічильників імпульсів є місткість лічильника й швидкодія. **Місткість** лічильника визначається максимальною кількістю імпульсів, яку може порахувати лічильник і залежить від кількості тригерів, що входять до складу лічильника.

**Швидкодія** лічильника імпульсів залежить від швидкодії тригерів, що входять до його складу і визначається **середньою тривалістю** переходу лічильника з одного стану в інший, або оберненою величиною — **максимальною частотою** імпульсів, які лічильник підраховує без збоїв.

**Історія цифрової електроніки.** Теоретичною основою цифрової електроніки є двійкова система числення, яка була вдосконалена Готфрідом Вільгельмом Лейбніцем у роботі, опублікованій в 1705 р. Він також встановив, що за допомогою двійкової системи можна об'єднати принципи арифметики та логіки.

Розділ математики, яка вивчає операції над двійковими числами як логічними змінними, був розроблений Джорджем Булем в середині 19 століття і дістав назву **булева алгебра**.

Перші цифрові електронні пристрої були побудовані на електромеханічних реле. Z3 був електромеханічним комп'ютером, розробленим Конрадом Цузе. Завершений у 1941 році, це був перший у світі працюючий програмований, повністю автоматичний цифровий комп'ютер.

Згодом вакуумні лампи замінили реле для логічних операцій.

Джон Бардін і Уолтер Браттейн винайшли точковий транзистор в Bell Labs в 1947 році, а потім Вільям Шоклі винайшов біполярний транзистор в Bell Labs в 1948 році.

В Університеті Манчестера команда під керівництвом Тома Кілберна розробила та побудувала машину з використанням нещодавно розроблених транзисторів замість вакуумних ламп. Їх "транзисторний комп'ютер", і перший у світі, запрацював до 1953 року, а друга версія була завершена там у квітні 1955 року. З 1955 року і далі транзистори замінили вакуумні лампи в комп'ютерних конструкціях, що дало початок "другому поколінню" комп'ютерів. Порівняно з вакуумними лампами, транзистори були меншими, надійнішими, мали невизначений термін служби та вимагали менше енергії, ніж вакуумні лампи, тим самим виділяючи менше тепла та дозволяючи набагато більш щільну концентрацію ланцюгів, до десятків тисяч у відносно компактному просторі.

Працюючи в Texas Instruments у липні 1958 року, Джек Кілбі записав свої початкові ідеї щодо інтегральної схеми (ІС), а потім успішно продемонстрував першу працюючу інтегральну схему 12 вересня 1958 року. Мікросхема Кілбі була виготовлена з германію. Наступного року Роберт Нойс з Fairchild Semiconductor винайшов кремнієву інтегральну схему. Основою кремнієвої інтегральної схеми Нойса був планарний процес, розроблений на початку 1959 року Жаном Ерні, який, у свою чергу, будував на основі методу пасивації кремнієвої поверхні Мохамеда Аталли, розробленого в 1957 році. Ця нова техніка, інтегральна схема, дозволила швидко й дешево виготовлення складних схем шляхом розміщення набору електронних схем на одній невеликій пластині («чіпі») з напівпровідникового матеріалу, як правило, кремнію.

**Властивості цифрових пристроїв.** Перевага цифрових пристроїв у порівнянні з аналоговими полягає в тому, що сигнали, представлені в цифровому вигляді, можуть передаватися без погіршення, викликаного шумом.[40] Наприклад, безперервний аудіосигнал, що передається у вигляді послідовності 1s і 0s, може бути відновлений без помилок, за умови, що шум, який уловлюється під час передачі, недостатній для запобігання ідентифікації 1s і 0s.

У цифровій системі більш точно представлення сигналу можна отримати, використовуючи для його представлення більше двійкових цифр. Хоча це вимагає більше цифрових схем для обробки сигналів, кожна цифра обробляється одним і тим же апаратним забезпеченням, що призводить до легко масштабованої системи. В аналоговій системі додаткова роздільна здатність вимагає фундаментальних поліпшень лінійності та шумових характеристик кожного кроку сигнального ланцюга.

З цифровими системами, керованими комп'ютером, нові функції можуть бути додані шляхом перегляду програмного забезпечення, і не потрібно змінювати апаратне забезпечення. Часто це можна зробити за межами заводу, оновивши

програмне забезпечення продукту. Таким чином, помилки в дизайні продукту можуть бути виправлені навіть після того, як продукт перебуває в руках клієнта.

Зберігання інформації в цифрових системах може бути простіше, ніж в аналогових. Завадостійкість цифрових систем дозволяє зберігати та отримувати дані без погіршення їх якості. В аналоговій системі шум від старіння та зносу погіршує збережену інформацію. У цифровій системі, поки загальний шум нижче певного рівня, інформацію можна відновити ідеально. Навіть якщо є більш значний шум, використання резервування дозволяє відновити вихідні дані за умови, що не виникає занадто багато помилок.

У деяких випадках цифрові схеми використовують більше енергії, ніж аналогові, для виконання тих же завдань, таким чином виробляючи більше тепла, що збільшує складність схем, наприклад, включення радіаторів. У портативних або акумуляторних системах це може обмежити використання цифрових систем. Наприклад, стільникові телефони з батарейним живленням часто використовують малопотужний аналоговий інтерфейс для посилення та налаштування радіосигналів від базової станції. Однак базова станція має мережеве живлення і може використовувати енергоємні, але дуже гнучкі програмні радіостанції. Такі базові станції можна легко перепрограмувати для обробки сигналів, що використовуються в нових стандартах стільникового зв'язку.

Багато корисних цифрових систем повинні переводити з безперервних аналогових сигналів в дискретні цифрові сигнали. Це викликає помилки квантування. Похибка квантування може бути зменшена, якщо система зберігає достатньо цифрових даних для представлення сигналу з бажаним ступенем точності. Теорема вибірки Найквіста-Шеннона дає важливе керівництво щодо того, скільки цифрових даних необхідно для точного відображення даного аналогового сигналу.

У деяких системах, якщо один фрагмент цифрових даних буде втрачено або неправильно інтерпретовано, значення великих блоків пов'язаних даних може повністю змінитися. Наприклад, однобітова помилка в аудіоданих, що зберігаються безпосередньо як лінійна імпульсно-кодова модуляція, викликає, у гіршому випадку, один клік. Тим не менш, багато людей використовують стиснення аудіо, щоб заощадити місце в пам'яті та час завантаження, навіть якщо одна бітова помилка може спричинити серйозні порушення.

Через ефект обриву користувачам може бути важко визначити, чи конкретна система знаходиться на межі збою, чи може вона витримувати набагато більше шуму, перш ніж вийти з ладу. Крихкість цифрових технологій можна зменшити, спроектувавши цифрову систему для забезпечення надійності. Наприклад, біт парності або інший метод керування помилками можна вставити в шлях сигналу. Ці схеми допомагають системі виявляти помилки, а потім або виправляти помилки, або запитувати повторну передачу даних.

### Мікроелектроніка

*Мікроелектроніка* — це розділ електроніки. Як впливає з назви, мікроелектроніка відноситься до вивчення та виробництва (або мікроелектроніки) дуже маленьких електронних конструкцій і компонентів. Зазвичай, але не завжди, це означає мікрометровий масштаб або менше. Ці пристрої зазвичай виготовляються з

напівпровідникових матеріалів. Багато компонентів звичайної електронної конструкції доступні в мікроелектронному еквіваленті. До них належать транзистори, конденсатори, котушки індуктивності, резистори, діоди та (природно) ізолятори та провідники, які можна знайти в мікроелектронних пристроях. Унікальні методи з'єднання проводів, такі як з'єднання проводів, також часто використовуються в мікроелектроніці через надзвичайно малий розмір компонентів, проводів і контактних площадок. Ця техніка вимагає спеціального обладнання і коштує дорого.

Цифрові інтегральні схеми (ІС) складаються з мільярдів транзисторів, резисторів, діодів і конденсаторів. Аналогові схеми зазвичай містять резистори та конденсатори. Індуктори використовуються в деяких високочастотних аналогових схемах, але, як правило, займають більшу площу мікросхеми через їх менший реактивний опір на низьких частотах. Гіратори можуть замінити їх у багатьох програмах.

Оскільки методи вдосконалювалися, масштаб мікроелектронних компонентів продовжував зменшуватися. У менших масштабах відносний вплив властивостей власних ланцюгів, таких як взаємозв'язки, може стати більш значним. Вони називаються паразитними ефектами, і мета інженера-конструктора мікроелектроніки — знайти способи компенсувати або мінімізувати ці ефекти, забезпечуючи при цьому менші, швидші та дешевші пристрої.

Сьогодні розробці мікроелектроніки значною мірою допомагає програмне забезпечення Electronic Design Automation.

## ПОТУЖНА (СИЛОВА) ЕЛЕКТРОНІКА

*Силова електроніка* (*Power electronics* — *PE*) — це застосування твердотіЛЬНОЇ електроніки для управління та перетворення електричної енергії.

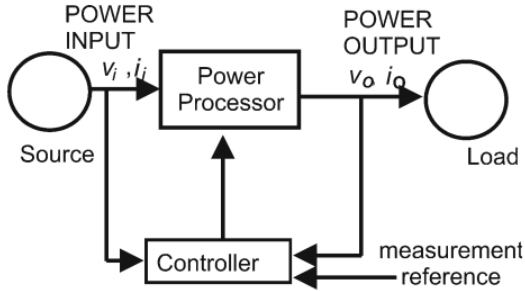
Перші електроенергетичні пристрої великої потужності були виготовлені за допомогою ртутно-дугових клапанів. У сучасних системах перетворення здійснюється за допомогою напівпровідникових комутаційних пристроїв, таких як діоди, тиристори та силові транзистори, такі як силовий MOSFET та IGBT. На відміну від електронних систем, що займаються передачею та обробкою сигналів та даних, у силовій електроніці обробляється значна кількість електричної енергії. Діапазон потужностей зазвичай становить від десятків ват до кількох сотень ват.

Силова електроніка зазнала величезного зростання після впровадження першого твердотіЛЬНОГО вимикача живлення, кремнієвого випрямляча (SCR) у 1957 році. Сьогодні майже всі технології, які вимагають контролю управління потужністю, використовують технологію PE. У цьому розділі читачеві буде представлено загальне уявлення про сферу PE, включаючи:

- Опис основ силових напівпровідникових комутаційних пристроїв.
- Конверторні схеми, які переробляють енергію з одного рівня постійного струму на інший рівень постійного струму.
- Перетворювачі, які виробляють змінну частоту від джерел постійного струму.
- Принципи випрямлення вхідної змінної напруги в некеровану вихідну напругу постійного струму та їх поширення на керовані випрямлячі.
- Перетворювачі, які перетворюють у змінний струм з постійного струму (інвертори) або з змінного струму з фіксованою або змінною вихідною частотою.
- Контролери змінного струму.
- перетворювачі DC–DC–AC.
- Матричні перетворювачі або циклоконвертери.
- Детальний опис методів керування широтно-імпульсною модуляцією.

Силові електронні схеми використовуються для управління перетворенням потужності від одного або більше джерел змінного або постійного струму до одного або кількох навантажень змінного або постійного струму, а іноді і з двонаправленими можливостями. У більшості систем силової електроніки це перетворення є виконується за допомогою двох функціональних модулів, які називаються ступенем керування та живленням етап.

## Розділ 12

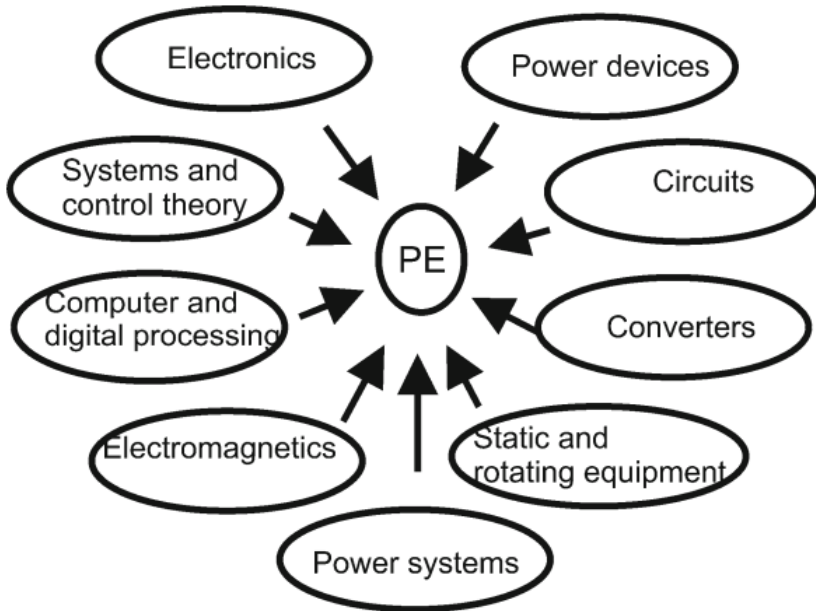


### *Загальна силова електронна система*

На малюнку 2.1 показана топологія для конвертора з одним джерелом і одним навантаженням додаток, що включає процесор живлення (блок живлення) і контролер (контрольний етап). Конвертор обробляє передачу потужності від входу до виходу, або навпаки, і складається з силових напівпровідникових приладів, які діють як перемикачі, плюс пасивні пристрої (індуктор і конденсатор). Контролер відповідає за роботу перемикачів відповідно до конкретних алгоритмів моніторингу фізичні величини (зазвичай напруги та струми), що вимірюються на вході системи і або вихід.

Сучасна ера РЕ почалася в 1957 році. Саме в цей рік з'явилася перша реклама тиристор, або кремнієвий керований випрямляч (SCR), був введений генералом Електрична компанія. Винайдено SCR, який почав замінювати ртутні дугові випрямлячі у 1902 р., а пізніше розроблені тиратрон (винайдений у 1923 р.) та ігнітрон (винайдено в 1931 р.), дозволив комерціалізувати декілька промислових схем задумано протягом 1920-1940-х років (наприклад, циклоконвертер, подрібнювач і паралельний інвертор), а також міст Греца, задуманий у 1897 році.

SCR був єдиним доступним пристроєм живлення протягом понад 25 років після його винаходу (і досі дуже корисний для надзвичайно високої потужності). Оскільки дуже важко встановити умови вимкнення для SCR, були розроблені швидші пристрої з більш високою напругою та струмом, з кращою керованістю, включаючи біполярний транзистор (BJT), винайдений у 1970 році. до середньої потужності та частоти і зараз вважається застарілою. Металооксидний напівпровідниковий польовий транзистор (MOSFET) був винайдений в 1978 році і використовується для силових електронних комутаційних застосувань низької потужності та високих частот. Тиристор відключення затвора (GTO) використовується в програмах від середньої до високої потужності та від низьких до середніх частот. Біполярний транзистор із ізолюваним затвором (IGBT), розроблений у 1983 році, використовується в програмах від низької до середньої потужності та частоти. Винайдений у 1997 році тиристор із інтегрованим затвором (IGCT) використовується в програмах від середньої до високої потужності та від низьких до середніх частот.



### *Силова електроніка та супутні теми*

Завдяки використанню цієї технології комутації системи силової електроніки можуть працювати в діапазоні від кількох Вт до ГВт з діапазоном частот від приблизно 100 Гц до приблизно 100 кГц, залежно від потужності, що передається. Поява мікроелектроніки та комп'ютерного керування дозволила застосувати сучасну теорію керування до PE і в той же час зробила можливими дуже складні схемні функції.

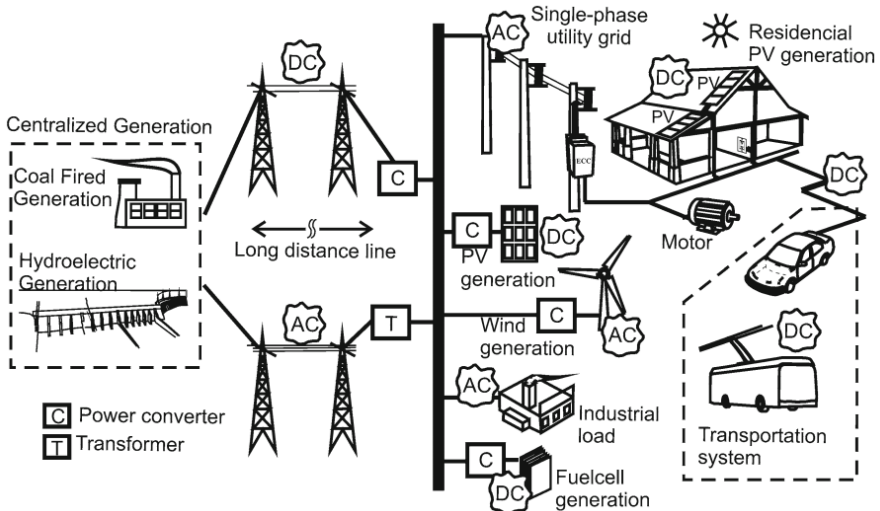
Тому область ПЕ, стала міждисциплінарною, як показано на рис. 2.2. На високому рівні потужності PE має справу зі статичним і обертовим обладнанням для виробництва, передачі та розподілу, що обробляє велику кількість енергії. Для споживчої електроніки перетворювачі та схеми є важливими для обробки інформації, використовуючи аналогові та цифрові схеми, або мікропроцесори, включаючи мікроконтролери, цифрові сигнальні процесори (DSP) і польові програмовані вентильні матриці (FPGA). У сфері управління PE займається характеристиками стабільності та реакції в системах із петлями зворотного зв'язку, заснованих на класичному або сучасному управлінні.

З розвитком дуже великої системної інтеграції (VLSI), надвеликої системної інтеграції (ULSI) та інших складних комп'ютерних проєктів; передові системи керування можуть бути використані для розробки нових топологій силової електроніки.

Розвиток пристроїв та обладнання, здатних окремо або в комбінації ефективно перетворювати електричну енергію з змінного струму в постійний,

## Розділ 12

постійного в постійний, постійного в змінний і змінного струму в змінний струм разом зі змінами, що відбулися в електроенергетиці, привели до широкого поширення ПЕ. у широкому спектрі застосувань.



*Силова електроніка та передача, зберігання та розподілення електроенергії*

Рисунок показує, як розподіляється виробництво електроенергії для кінцевого споживача, показуючи передачу, розподіл, зберігання, відновлювані джерела енергії та користувачів.

Насправді, сьогодні РЕ є ключовою технологією для всіх цих підсистем, і вона поширилася у багатьох програмах, наприклад:

- Житлові: обігрівачі, побутова техніка, електронне освітлення, джерела обладнання;
- Комерційні: обігрівачі, вентилятори, ліфти Джерело безперебійного живлення (ДБЖ), вимикачі змінного та постійного струму, зарядні пристрої;
- Промислові: насоси, повітрорудки, роботи, індуктивні нагрівачі, зварювання, машинний привід, переносні джерела;
- Транспорт: електричні та гібридні транспортні засоби, зарядні пристрої, залізнична електросистема;
- Інженерні системи: постійний струм високої напруги, генератори, реактивні компенсатори, інтерфейс для фотоелектричних, вітрових, паливних елементів, обладнання Гнучкої системи передачі змінного струму (FACTS);
- Аерокосмічні: джерела для космічних апаратів, супутників, літаків;
- Зв'язок: джерела, РЧ підсилювачі, аудіопідсилювачі

Силова електроніка і надалі залишатиметься технологією, що дозволяє задовольняти наші майбутні потреби в електроенергії. Очікується, що нові силові пристрої для більшої потужності, більш високої частоти та менших втрат

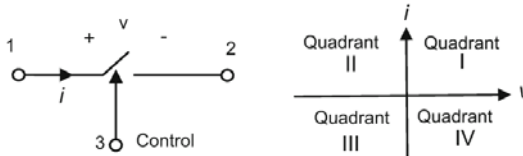


будуть продовжувати винаходити. Глобальні енергетичні проблеми викличуть великий інтерес до підвищення ефективності перетворення та більшого застосування ПЕ в якості електроенергії, розподіленій генерації, енергозбереженні та розумних мережах. Інтеграція схем живлення та керування у функціональні модулі призведе до системних рішень, які будуть інтегровані в упаковані продукти, які будуть більш надійними та доступними.

### Силові напівпровідникові прилади

Електронні перемикачі, здатні обробляти роботу високої напруги та струму на високій частоті (HF), є найважливішими пристроями, необхідними при проектуванні систем перетворення енергії, які використовують РЕ. Для цілей цього обговорення ми визначимо поняття ідеального комутатора.

**Ідеальний комутатор.** Ідеальний силовий електронний перемикач може бути представлений у вигляді пристрою з трьома терміналами, як показано на рисунку. Вхід 1, вихід 2 і керуючий термінал 3, який накладає умови увімкнення/вимкнення перемикача.



#### *Ідеальний перемикач і його 4-квадрантна вольт-амперна характеристика*

Перемикач вважається «ідеальним», коли має нульовий струм і може працювати з нескінченною напругою у розімкнутому стані. Коли перемикач замкнений, на ньому напруга нульова і може протікати нескінченний струм. Крім того, ідеальний перемикач миттєво змінює умови, а це означає, що для перемикачання з режиму ON-OFF або OFF-to-ON потрібно нульовий час. Додаткові характеристики ідеального перемикача включають те, що він демонструє нульову розсіювання потужності, пропускає двонаправлений струм і може підтримувати двонаправлену напругу. Якщо ми побудуємо графік струму перемикачання ( $i$ ) відносно його напруги ( $v$ ), ми визначимо чотири квадранти, які часто називають площиною  $v$ - $i$  і показані на рисунку. За визначенням, ідеальний перемикач може працювати у всіх чотирьох квадрантах.

Практичні або реальні перемикачі мають свої обмеження в усіх характеристиках, пояснених в ідеальному перемикачі. Наприклад, коли перемикач увімкнено, на ньому виникає деяка напруга, відома як напруга увімкнення, і він несе кінцевий струм. Під час вимкненого етапу він може мати невеликий струм, відомий як струм витоків, підтримуючи кінцеву напругу. Перемикачання з увімкнення на вимкнення і навпаки відбувається не миттєво. Звичайно, для всіх фактичних комутаційних пристроїв потрібен час для перемикачання, і ми визначаємо ці характеристики як час затримки, наростання, зберігання та падіння. Як наслідок наведених вище двох неідеальних випадків, на комутаторі

постійно є напруга та струм, що призведе до двох типів втрат. Перша втрата відбувається під час увімкненого та вимкненого стану і визначається як «втрата провідності». Друга втрата визначається як «втрата при перемиканні», яка виникає саме тоді, коли перемикач змінює стан при розмиканні або замиканні. Втрати перемикача призводять до підвищення загальної температури перемикача. Крім того, увімкнення/вимкнення перемикача живлення має контролюватися за допомогою зовнішнього сигналу.

### *Класифікація силових перемикачів*

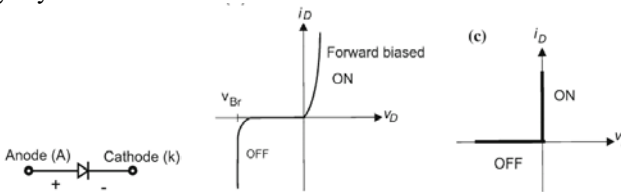
Концепція ідеального комутатора важлива при оцінці топологій схеми. Припущення про нульове падіння напруги, нульовий струм витоку та миттєві переходи полегшують моделювання та моделювання поведінки різних електричних конструкцій. Використовуючи характеристики ідеального вимикача, існує три класи перемикачів живлення:

1. Некерований перемикач: перемикач не має клеми керування. Стан вимикача визначається зовнішніми умовами напруги або струму кола, в який підключений вимикач. Прикладом такого перемикача є діод.

2. Напівкерований перемикач: у цьому випадку розробник схеми має обмежений контроль над перемикачем. Наприклад, перемикач можна ввімкнути з керуючого терміналу. Однак, після увімкнення його не можна вимкнути за допомогою керуючого сигналу. Перемикач можна вимкнути за допомогою роботи ланцюга або за допомогою допоміжного контуру, який додається, щоб змусити вимикач вимкнутися. Прикладом цього типу перемикача є тиристор або SCR.

3. Повністю керований перемикач: перемикач можна вмикати та вимикати за допомогою терміналу керування. Прикладами цього перемикача є ВJT, MOSFET, IGBT, тиристор GTO і тиристор, керований МОП (МСТ).

**Некеровані перемикачі.** Діод, також відомий як випрямляч, — це некерований перемикач. Це двотермінальний пристрій із символом, зображеним на рисунку.

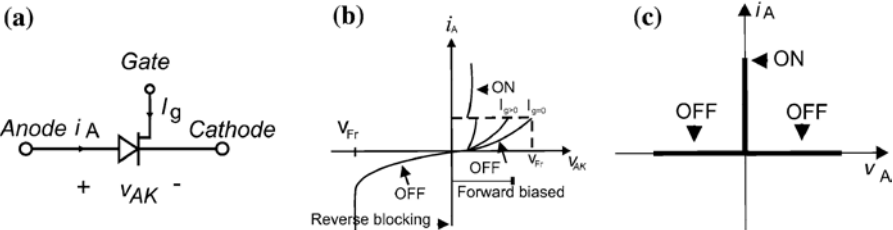


Виводи відомі як анод (A) і катод (K). В ідеальному випадку струм діода ( $i_D$ ) є односпрямованим, і струм може протікати тільки від анода до катода. Напруга діода ( $v_D$ ) вимірюється як позитивне від анода до катода. Характеристики  $v$ - $i$  реального (неідеального) діода наведені на рисунку. У квадранті I діод знаходиться у включеному стані і відомий як область прямого зміщення. Коли він увімкнений, діод несе позитивний струм, підтримуючи невелику

напругу. Струм діода змінюється експоненціально з напругою діода. Діод має зворотне зміщення в квадранті III, який є вимкненим. Коли він вимкнений, діод підтримує негативну напругу і несе незначний струм (струм витоку). Коли негативна напруга перевищує певну межу, відому як напруга пробою, струм витоку швидко зростає, в той час як напруга залишається на рівні розриву, що потенційно може пошкодити пристрій. Тому слід уникати роботи, яка перевищує напругу пробою.

Ідеальні характеристики діода наведені на рисунку. Під час увімкненого стану діод має нульову напругу на ньому і пропускає позитивний струм. Під час вимкненого стану діод пропускає нульовий струм і підтримує негативну напругу.

**Напівкеровані перемикачі.** Тиристор або SCR — це силовий напівпровідниковий перемикач, включення якого можна активувати з керуючого терміналу Gate, але як тільки він увімкнеться, термінал управління стає неефективним і тиристор поводить себе подібно до діода. Тому тиристор вважається напівкерованим вимикачем. Назва, керований випрямляч, вказує на те, що тиристор - це пристрій, який можна розглядати як діод, увімкнення якого може бути надано ззовні.



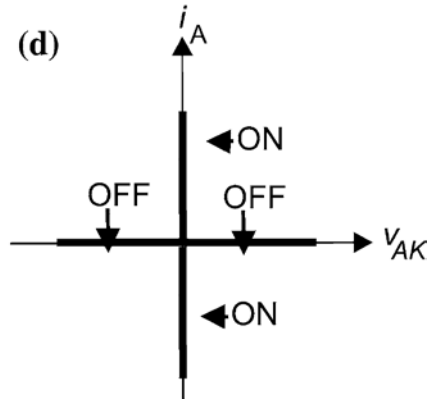
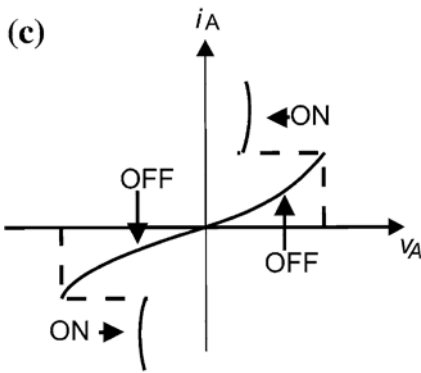
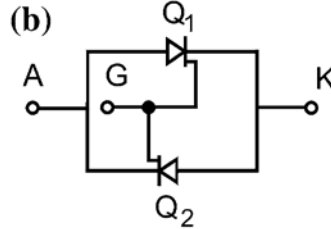
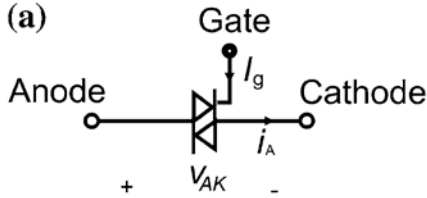
Тиристор: символ, b i-v характеристики і c ідеалізовані характеристики

На рисунку 2.7a показано символ схеми для тиристора. Хоча символи діода і тиристорної схеми мають схожість, їх робота дуже відрізняється. Струм тиристора,  $I_A$ , тече від анода (A) до катода (K), а напруга  $V_{AK}$  на тиристорі є додатною, коли напруга на аноді вище, ніж на катоді. На рисунку 2.7b показані v-i характеристики реального чи неідеального тиристора. У квадранті I, за відсутності струму затвора, пристрій вимкнено в області прямого блокування і підтримує позитивну напругу. Якщо подається струм затвора, пристрій перемикається в область увімкненого стану, і пристрій має характеристику v-i, подібну до діода. У квадранті III пристрій вимкнено, а область відома як область зворотного блокування.

Знову характеристики схожі на характеристики діода. Порівнюючи характеристики перемикачів діода і тиристора, виявляється, що коли тиристор вимкнено, він може блокувати велику позитивну або негативну напругу, що є фундаментальною властивістю, важливою в схемах застосування, таких як перетворювачі АС/АС. Це добре видно на ідеальних характеристиках тиристора, як показано на рис. 2.7в. У включеному стані тиристор має нульову напругу

## Розділ 12

на ньому і пропускає позитивний струм. У вимкненому стані тиристор може підтримувати позитивну напругу в області прямого блокування або негативну напругу, подібну до діода, у зворотній області блокування. Тому можна вважати, що тиристор пропускає односпрямований струм і підтримує двонаправлену напругу.

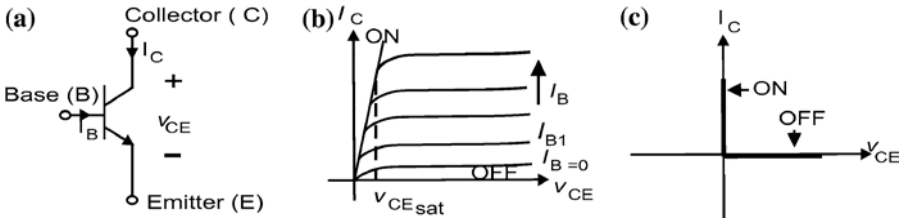


Сімистор: *a* — символ, *b* — двотиристорне представлення, *c* — *i-v* характеристики та *d* — ідеалізовані характеристики

Сімистор, показаний на рис. 2.8а, також є напівкерованим вимикачем. Сімистор можна змоделювати як два тиристори, з'єднані один до одного, як показано на рис. 2.8b. Сімистори розглядаються як пристрої з двонаправленою напругою та двонаправленим струмом, як показано *v-i* характеристиками на рис. 2.8c. Ідеальні характеристики наведені на рис. 2.8d. Як недорогий двонаправлений перемикач, симистор є основним перемикачем, який використовується для низькопотужних електронних комерційних схем, таких як диммери та схеми керування для однофазних двигунів, що використовуються в побутовій техніці.

**Повністю керовані перемикачі.** У повністю керованому перемикачі стани ON- та OFF можна активувати ззовні через термінал керування. Ряд силових вимикачів відноситься до категорії керованих вимикачів; деякі з них є пристроями на основі транзисторів, а інші - на основі тиристорів. Короткий опис кожного пристрою наведено в наступних розділах:

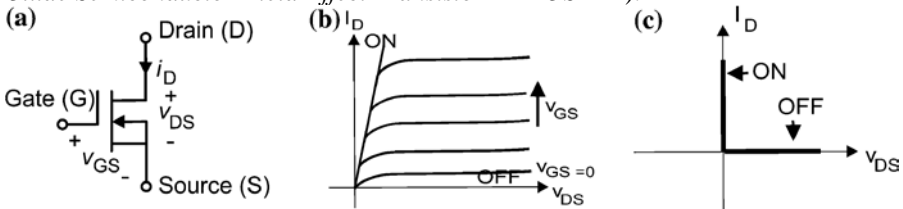
**A. Біполярний транзистор (Bipolar Junction Transistor — BJT)**



Біполярний транзистор (BJT): a — символ, b і-*v* характеристики та c ідеалізовані характеристики

На малюнку 2.9а показано символ схеми для ВJT типу pnp. База (B) є клемою керування, де клеми живлення є колектором (C) і випромінювачем (E). *V*-і характеристики пристрою наведені на рис. 2.9б. Пристрій працює в квадранті I і характеризується графіком залежності струму колектора δ P I<sub>C</sub> від напруги колектора до емітера δ P *v*CE: Пристрій має три області, два з яких пристрій працює як перемикач, а третій – де Пристрій працює як лінійний підсилювач. Пристрій вимкнено в області нижче *i*B ¼ 0 і увімкнено в регіоні, де *v*CE менше *v*CE(Sat). Нехтуючи середньою областю, ідеалізовані характеристики пристрою як перемикача показані на рис. 2.9в. Під час увімкненого стану пристрій несе струм колектора I<sub>C</sub> [ 0 з *v*CE = 0. У вимкненому стані пристрій підтримує позитивний *v*CE [ 0 з I<sub>C</sub> = 0. Отже, ВJT є односпрямованим пристроєм струму та напруги. ВJT має історичне значення, але сьогодні більшість його функцій покривають такі пристрої, як IGBT.

**B. Металооксидний напівпровідниковий польовий транзистор (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor — MOSFET).**

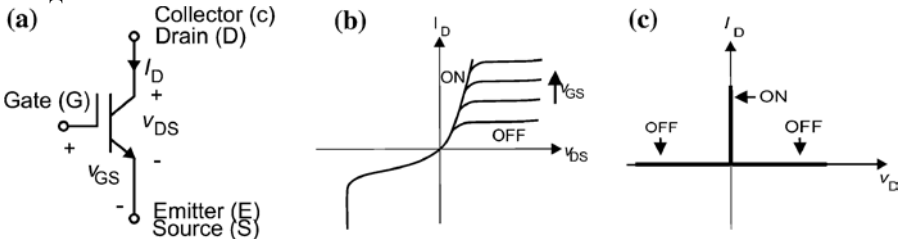


MOSFET: a — символ, b — і-*v* характеристики та c — ідеалізовані характеристики

На малюнку 2.10а показано символ схеми для n-канального МОП-транзистора з розширеним режимом. Подібно до ВJT, він має керуючий термінал, відомий як затвор (G), а клеми живлення є стоком (D) і джерелом (S). Управління пристроєм здійснюється шляхом подачі напруги (*v*GS) між затвором і джерелом. Це робить його пристроєм, керованим напругою, порівняно з ВJT, який є пристроєм з керуванням струмом. Реальні *v*-і характеристики пристрою наведені на рис. 2.10б. Подібно до ВJT, MOSFET працює в трьох робочих регіонах. Дві області використовуються, коли пристрій функціонує як

перемикач, а третій — коли пристрій використовується як підсилювач. Щоб підтримувати MOSFET у вимкненому стані,  $v_{GS}$  має бути меншим за порогову напругу, відому як  $v_T$ , що є областю під лінією, позначеною OFF. А коли пристрій увімкнено, він діє як опір, що визначається нахилом лінії, позначеної ON. Ідеалізовані характеристики перемикача MOSFET показані на рис. 2.10с. Коли пристрій увімкнено, він має нульовий  $v_{DS}$  і має поточний ідентифікатор [ 0, а коли пристрій вимкнено, він підтримує позитивний  $v_{DS}$  і має нульовий струм стоку ( $ID = 0$ ).

**С. Біполярний транзистор із ізольованим затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor — IGBT).** IGBT є гібридним або також відомим як пристрій з подвійним механізмом.



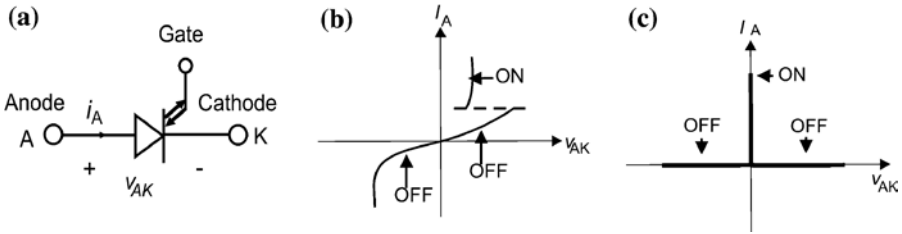
IGBT: *a* — символ, *b* — *i-v* характеристики та *c* — ідеалізовані характеристики

Його керуючий порт нагадує MOSFET, а його вихідний порт або порт живлення нагадує BJT. Таким чином, IGBT поєднує швидке перемикання МОП-транзистора і низькі втрати потужності на провідність BJT. На малюнку 2.11а показано символ схеми, який використовується для IGBT, який дещо відрізняється від MOSFET з подібними мітками клем. Керуюча клемма позначена як затвор (G), а клемми живлення позначені як колектор (C) і випромінювач (E). Характеристики *i-v* реального IGBT показані на рис. 2.11b, з якого видно, що пристрій працює в квадрантах I і III. Ідеальні характеристики пристрою наведені на рис. 2.11в. Пристрій може блокувати двонаправлену напругу і проводити односпрямований струм. IGBT може дуже швидко перейти в увімкнений стан, але повільніше, ніж пристрій MOSFET. Розрядження ємності затвора завершує контроль IGBT у стані OFF. IGBT зазвичай використовуються для високопотужних комутаційних додатків, таких як керування двигунами, а також для фотоелектричних та вітрових РЕ середньої потужності.

**D. Тиристор з відключенням затвора (Gate Turn-Off Thyristor. — GTO).**

Тиристор GTO — це пристрій, який працює подібно до звичайного тиристора, за винятком того, що фізика, конструкція та виробничі особливості пристрою дозволяють його вимикати негативним струмом затвора, що досягається за допомогою біполярного транзистора. Символ схеми для GTO показаний на рис. 2.12а. Характеристики *v-i* та характеристики ідеального перемикача наведені на рис. 2.12, б, в.

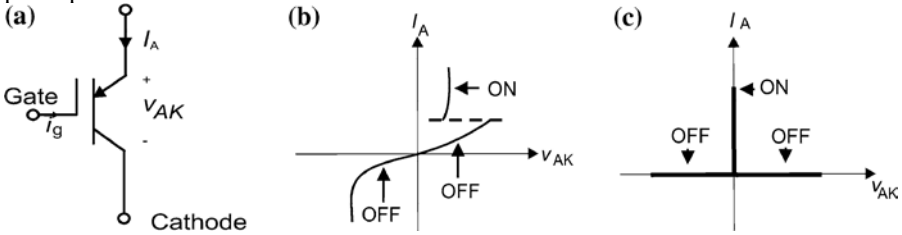
## Потужна (силова) електроніка



*GTO: a — символ, b —  $i-v$  характеристики та c — ідеалізовані характеристики*

Незважаючи на те, що пристрій існує з кінця 1960-х років і він успішно використовується в накопичувачах високої потужності, IGBT досягли ціни та рейтингу і, як очікується, замінять GTO в нових конструкціях силової електроніки.

**Е. МОП-керований тиристор (MOS-Controlled Thyristor — MCT).** Подібно до IGBT, MCT є пристроєм з гібридом або подвійним механізмом, який був розроблений так, щоб мати порт управління MOSFET і порт живлення тиристора.



*MCT: a — символ, b —  $i-v$  характеристики та c — ідеалізовані характеристики*

Символ схеми пристрою показаний на рис. 2.13а. Реальні характеристики пристрою та ідеалізовані характеристики показані на рис. 2.13б, с. Характеристики подібні до GTO, за винятком того, що схема приводу затвора для MCT менш складна, ніж конструкція для GTO, оскільки схема управління MCT використовує MOSFET замість транзистора. В результаті передбачалося, що MCT мав вищу частоту перемикання. Хоча MCT було винайдено в той самий період з IGBT, він так і не став повністю комерційно доступним.

### Топології силових електронних перетворювачів

Силові електронні перетворювачі — це схеми комутаційного режиму, які обробляють живлення між двома електричними системами за допомогою силових напівпровідникових перемикачів. Електричні системи можуть бути постійного або змінного струму. Отже, є чотири можливих типи перетворювачів; а саме DC/DC, DC/AC, AC/DC і AC/AC. Нижче описано чотири типи конвертерів:

1. Перетворювач DC/DC: також відомий як «перемикаючий регулятор». Схема змінить напругу рівня, доступну від джерела постійного струму, такого як батарея, сонячна батарея або паливний елемент, на інший рівень постійного струму, або для забезпечення навантаження постійного струму, або для використання в якості проміжної напруги для суміжного силового електронного перетворення, наприклад як перетворювач DC/AC. Перетворювачі DC/DC у поєднанні з перетворювачами AC/DC дозволяють використовувати високовольтну передачу постійного струму (HVDC), яка була прийнята в лініях електропередачі по всьому світу.

2. Перетворювач постійного/перемінного струму: також описується як «інвертор» — це схема, яка перетворює джерело постійного струму в синусоїдальну змінну напругу для живлення навантаження змінного струму, керування двигунами змінного струму або навіть підключення пристроїв постійного струму, підключених до мережі. Подібно до перетворювача DC/DC, вхід для інвертора може бути жорстким джерелом, таким як батарея, сонячна батарея або паливний елемент, або може бути від проміжної лінії постійного струму, яка може живитися від джерела змінного струму.

3. Перетворювач AC/DC: цей тип перетворювача також відомий як «Випрямляч». Зазвичай вхід змінного струму в схему є синусоїдальним джерелом напруги, який працює при напрузі 120 В, 60 Гц або 230 В, 50 Гц, які використовуються для розподілу електроенергії. Напруга змінного струму випрямляється в односпрямовану напругу постійного струму, яку можна використовувати безпосередньо для живлення резистивного навантаження постійного струму або керування двигуном постійного струму. У деяких випадках напруга постійного струму піддається подальшому перетворенню за допомогою перетворювача DC/DC або DC/AC. Випрямляч зазвичай використовується як вихідна схема в багатьох програмах енергосистем. При неправильному застосуванні випрямлячі можуть викликати гармоніки та низький коефіцієнт потужності, коли вони підключені до електромережі.

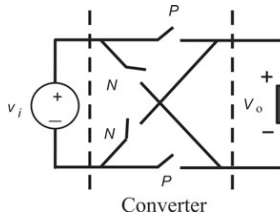
4. Перетворювач змінного/перемінного струму: ця схема є складнішою, ніж попередні перетворювачі, тому що перетворення змінного струму вимагає зміни напруги, частоти та можливості блокування біполярної напруги, що зазвичай вимагає складної топології пристрою. Перетворювачі, які мають однакові основні вхідні та вихідні частоти, називаються «контролерами змінного струму». Перетворення відбувається з фіксованої частоти напруги (FVFF) до фіксованої частоти змінної напруги (VVFF). Застосування включають: регулятори освітлення та керування однофазними двигунами змінного струму, які зазвичай використовуються в побутовій техніці. Коли змінюються і напруга, і частота, схеми називаються «циклоперетворювачами», які перетворюють FVFF в змінну частоту змінної напруги (VVVF), а коли використовуються повністю керовані перемикачі, цей клас схеми називається «матричний перетворювач». Інший спосіб досягнення перетворення змінного/перемінного струму - це використання AC/DC і DC/AC через проміжну лінію постійного струму.



Цей тип комбінованого підходу перетворювача може бути складним, оскільки має бути реалізований правильний підхід до керування, включаючи одночасне регулювання лінії постійного струму, подачу потужності із заданим коефіцієнтом потужності та двонаправлене керування потоком енергії.

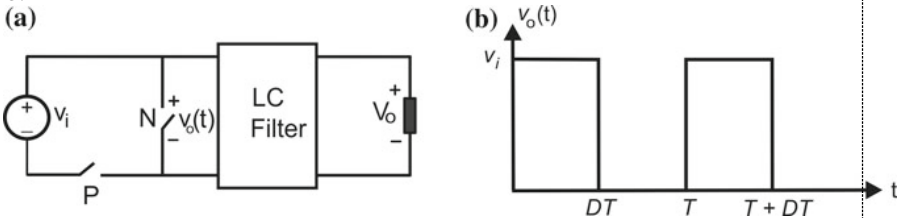
### Перетворювачі DC/DC

Узагальнена схема для DC/DC перетворювача зображена на рис. 2.14, де представлені всі можливі комутатори, що з'єднують вхід і вихід. Якщо використовується один P-перемикач і один N-перемикач, то результуюча схема показана на рис. 2.15а.



*Узагальнена схема для схем перетворювача DC/DC*

Увімкнення та вимкнення перемикачів здійснюється протягом певного періоду  $T$ . Вихідна напруга дорівнює вхідній напрузі, коли P-перемикач увімкнено, і дорівнює нулю, коли N-перемикач увімкнено. Відношення часу увімкнення перемикача P до періоду  $T$  визначається як коефіцієнт завантаження або робочий цикл ( $D$ ). Форма сигналу вихідної напруги  $v_o(t)$  показана на рис. 2.15b.



*Неізований понижувальний перетворювач постійного/постійного струму: а — схема і форми сигналів b*

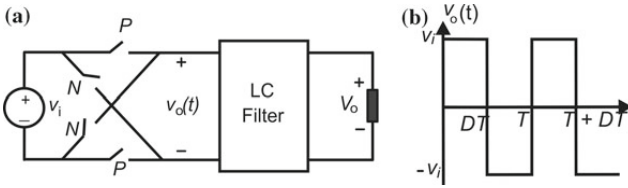
Оскільки  $v_o(t)$  є пульсуючим сигналом, LC-фільтр використовується для фільтрації напруги до постійного струму. У цьому випадку середня складова вихідної напруги  $V_o$  або постійного струму визначається рівнянням. (2.1), В

$$V_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_i = DV_i \tag{2.1}$$

Оскільки  $D < 1$ , вихідна напруга постійного струму цього перетворювача завжди менша за вхідну.

При використанні всіх узагальнених перемикачів перетворювача отримана схема показана на рис. 2.16.

## Розділ 12

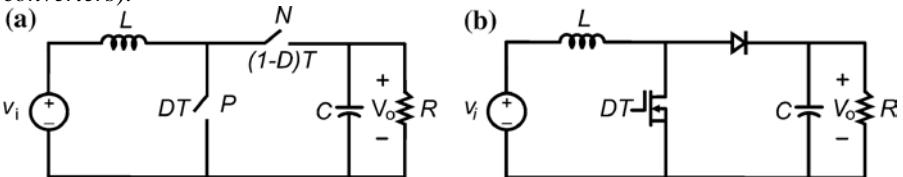


Повний мостовий неізолюваний понижувальний перетворювач постійного/постійного струму: а — схема і форми сигналів b

Коли Р-перемикачі увімкнені, вихідна напруга дорівнює входній напрузі, а коли N-перемикачі увімкнені, вихідна напруга дорівнює мінусовій напрузі входу. Отримана форма сигналу показана на рис. 2.16b. Складова постійного струму або середнє значення вихідної напруги визначається як:

$$V_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{DT} V_i dt + \int_{DT}^T -V_i dt \right] = (2D - 1)V_i \quad 2.2$$

Рівняння (2.2) показує, що вихідна напруга менше входної зі зміненою полярністю. Для робочого циклу  $D > 0,5$  вихід має додатнє значення, а для робочого циклу  $D < 0,5$  вихід має від'ємнє значення. LC-фільтр в конструкції використовується для фільтрації гармонічних складових вихідної напруги, щоб навантаження отримувала постійну напругу з незначними пульсаціями. Обидві напруги, задані рівняннями. (2.1) і (2.2) вказують на те, що вихідний сигнал має нижче значення постійного струму, ніж входна напруга. Тому перетворювачі називаються **понижувальними перетворювачами** (*step-down or buck converters*).



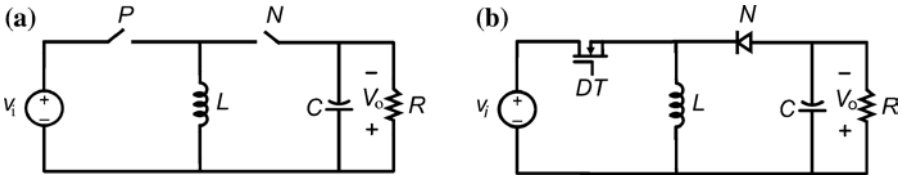
2.17 Неізолюваний підвищувальний перетворювач постійного/постійного струму: а - реалізація схеми і перемикача b

Два інших базових перетворювачі DC/DC включають підвищувальний та підвищувальний/підвищувальний перетворювачі. Підвищувальний перетворювач можна визначити як вихідна напруга постійного струму вище входної. Ця конструкція також називається підвищувачим перетворювачем і типова конструкція показана на рис. 2.17.

У цій схемі перемикачі вставлені між індуктивністю і конденсатором. Якщо перетворювач без втрат, відношення вихідної постійної напруги до входної постійної напруги визначається рівнянням. (2.3).

$$V_{\text{avg}} = \frac{V_i}{D} \quad 2.3$$

Оскільки  $D$  менше одиниці, вихідна напруга завжди вище вхідної.



2.18 Понижуючий (вгору/вниз) неізолюваний перетворювач DC/DC: а — реалізація схеми і перемикача б

На рис. 2.18 показано підвищувальний/підвищувальний або підвищувальний/знижуючий перетворювач. Цей перетворювач здатний забезпечити вихідну напругу постійного струму, яка може бути нижчою або вищою, ніж вхідна постійна напруга. Коефіцієнт вхідного/вихідного перетворення визначається рівнянням. (2.4).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1 - D} \quad 2.4$$

Коли  $D$ , менше 0,5, перетворювач працює як понижуючий або понижуючий перетворювач, а коли  $D > 0,5$ , перетворювач працює як підвищувальний або підвищувальний перетворювач. Для всіх базових перетворювачів DC/DC, обговорюваних досі, перемикач реалізований керованим перемикачем (транзистором) і некерованим перемикачем (діодом).

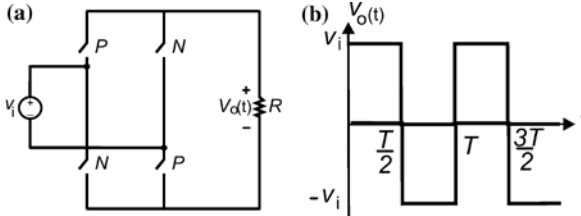
Коли транзистор і діод перемикаються по черзі, режим роботи називається **режимом безперервної провідності** (*continuous conduction mode* — CCM). У цьому режимі струм індуктивності ніколи не досягає нуля, а коефіцієнт перетворення вихідної напруги у вхідну напругу стає лише функцією робочого відношення. Якщо струм індуктивності дорівнює нулю протягом частини циклу, режим роботи відомий як **режим переривчастої провідності** (*discontinuous conduction mode* — DCM). Перетворювач буде працювати на DCM, коли параметри ланцюга, такі як індуктивність, зменшуються, або коли частота перемикання зменшується, або коли збільшується опір навантаження. Таким чином, коефіцієнт перетворення вихід-вхід є функцією коефіцієнта завантаження та кількох із цих параметрів.

Три основні перетворювачі постійного/постійного струму, які обговорювалися досі, називаються неізолюваними топологіями перетворювачів. Інший клас перетворювачів називається ізолюваними перетворювачами, у яких використовується трансформатор, який розміщується безпосередньо між входом і виходом і зазвичай має більше перемикачів і більше компонентів фільтра, ніж неізолювані перетворювачі. Ізолювані перетворювачі DC/DC можуть бути розроблені для забезпечення декількох вихідних напруг постійного струму. Існують деякі неізолювані перетворювачі, які використовують фільтр вищого порядку, такі як конвертер 'Сук, конвертер SEPIC і конвертер ZETA.

**Перетворювачі DC/AC (інвертори)**

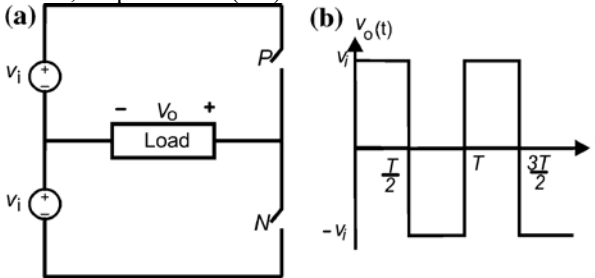
Інвертори — це силові електронні пристрої, які перетворюють постійну напругу від джерел, таких як батареї, сонячні батареї або паливні елементи (або вихід випрямляча) в змінний струм, для живлення приводів двигунів, забезпечення автономного виходу змінного струму або підключення до мережі змінного струму. Зазвичай інвертори можна класифікувати відповідно до їхньої вихідної змінного струму на однофазні або трифазні, а також на напів- та повномостові перетворювачі.

**Однофазні інвертори**



2.19 Повний міст (Full bridge — FB) Перетворювач постійного/змінного струму: а — схема і форми сигналів b

На малюнку 2.19а представлено узагальнений однофазний інвертор постійного/ змінного струму. На малюнку 2.19b показано результуючу форму сигналу змінного струму, коли P- та N-перемикачі працюють при  $D = 0,5$ . На графіку видно, що сигнал змінного струму являє собою прямокутну хвилю  $D = 0,5$ . Крім того, напруга не має постійної складової, що також можна показати, підставивши  $D = 0,5$  в рівняння. (2.2).



2.20 Напівмостовий (Half-bridge — HB) DC/AC перетворювач (інвертор): а — схема і форми сигналів b

Напівмостовий перетворювач можна отримати, використовуючи два рівних джерела постійного струму напруги, один P-перемикач і один N-перемикач, як показано на рис. 2.20. На виході виходить прямокутна хвиля з періодом  $T$ , який відповідає основній частоті змінного струму як:

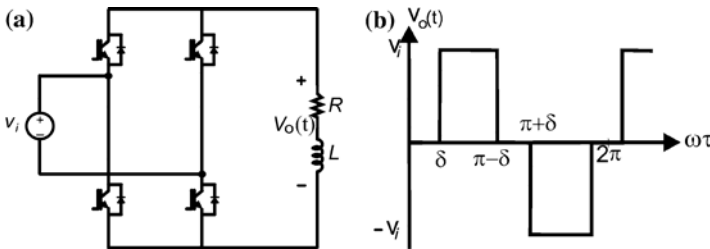
$$f = \frac{1}{T} \text{ Hz or } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \text{ rad/s}$$

2.5

Амплітуду  $n$ -ї синусоїдної напруги можна оцінити за допомогою ряду Фур'є прямокутної хвилі  $v_o(t)$  як

$$v_{on} = \frac{2}{T} \int_0^T v_o(t) \sin n\omega_a t dt = \frac{4V_i}{n\pi} \rightarrow n = 1, 3, 5, \dots \quad 2.6$$

Такий фільтр, як резонансна схема типу LC, може бути розроблений для фільтрації більшості гармонік, присутніх в прямокутній хвилі, і запобігання їх появі при навантаженні. Основна напруга, доступна з квадратної напруги, має фіксовану амплітуду (як отримано шляхом підстановки  $n = 1$  в рівняння (2.6)). Напівмостові перетворювачі мають фіксовану амплітуду, але повномостові перетворювачі (як показано на рис. 2.21) мають не мають цього обмеження.



2.21 Повний мостовий (FB) перетворювач постійного/змінного струму зі змінною напругою змінного струму  $a$  — схема і форми сигналів  $b$

Замість того, щоб напруга  $v_o$  мала лише два рівні  $V_{dc}$  або  $-V_{dc}$ , можна використовувати третій рівень, де напруга  $v_o$  дорівнює нулю і називається трирівневим інвертором. Форма результуючого сигналу напруги показана на рис. 2.21b. Кут  $d$  є зсувом фази між двома вітками транзистора і використовується для контролю амплітуди синусоїдальної  $n$ -ї напруги, як демонструє ряд Фур'є  $v_o$ .

$$v_{on} = \frac{4}{T} \int_0^T v_o(t) \sin n\omega_a t d(\omega t) = \frac{4V_i}{n\pi} \cos n\delta \rightarrow n = 1, 3, 5, \dots \quad 2.7$$

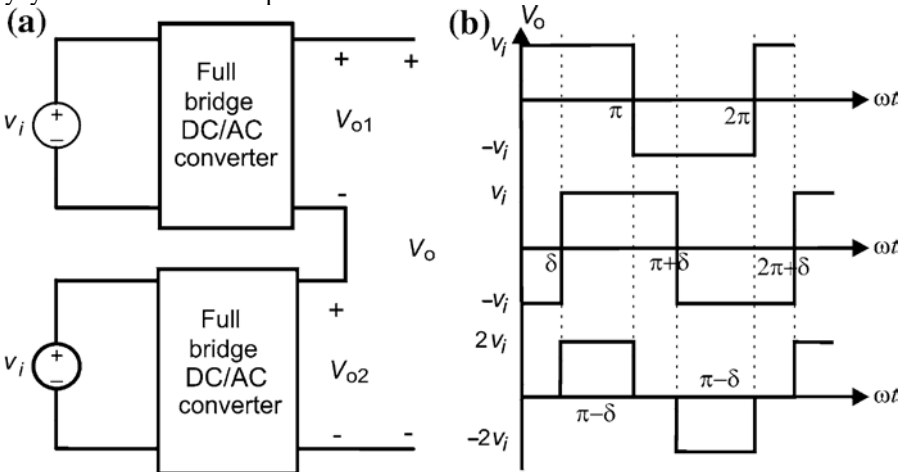
Можна помітити, що змінюючи  $d$  від нуля до  $\pi$ , вихідну напругу можна змінити від фіксованої напруги при  $d = 0$  до нульової напруги при  $d = \pi$ . Цей  $d$ -контроль вводить змінну напругу змінного струму, а також може усунути одну гармонічну напругу, якщо еків. (2.8) спостерігається.

$$\cos n\delta = 0, \text{ which means } n\delta = \frac{\pi}{2} \quad 2.8$$

Наприклад, якщо вибрано напругу третьої гармоніки для усунення, тоді  $\delta = \pi/6$ . Цей метод усунення гармоній відомий як активна фільтрація на відміну від пасивної фільтрації, яка вимагає фактичних компонентів фільтра. Інший

## Розділ 12

метод активної фільтрації відомий як погашення гармоній, коли гармоніки усуваються шляхом обробки сигналів.



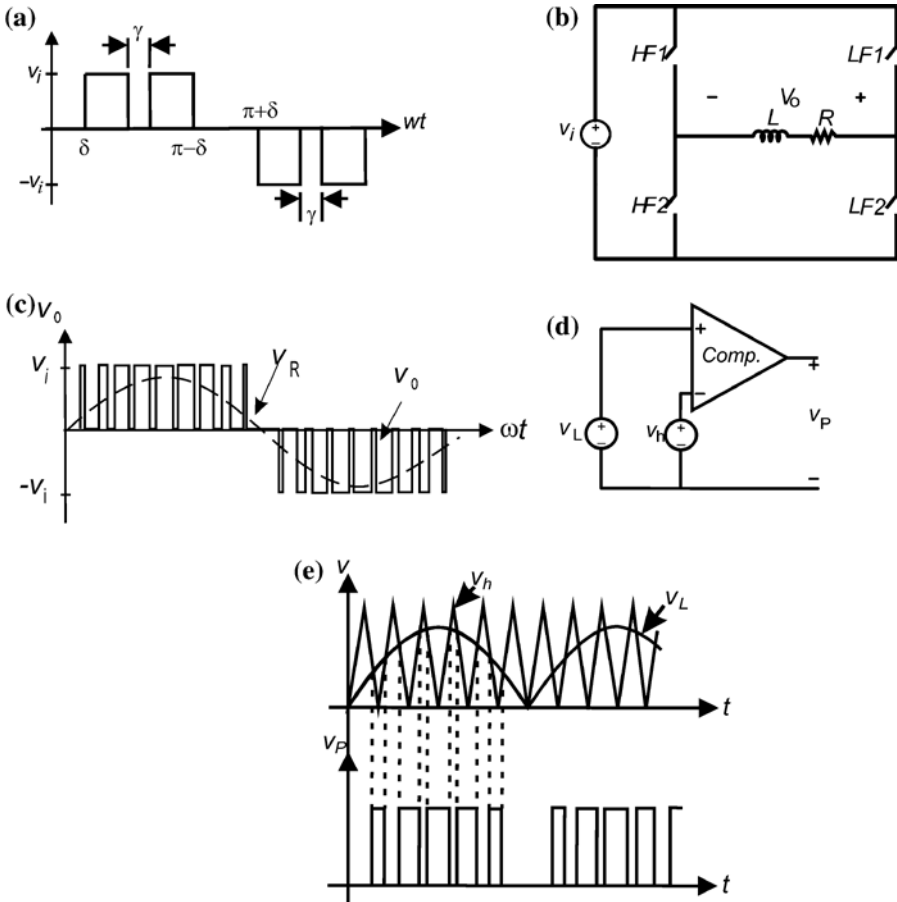
2.22 Активна фільтрація з використанням усунення гармоній: а — схема і форми сигналів б

На малюнку 2.22а показано два перетворювачі, де обидва перетворювачі перемикаються на постійну прямокутну напругу. Форми вихідних сигналів  $v_{o1}(t)$  і  $v_{o2}(t)$  двох перетворювачів показані на рис. 2.22б. Видно, що кожен з двох перетворювачів виробляє фіксовану дворівневу прямокутну напругу. При зміщенні керування одним перетворювачем на кут  $d$  і додаванні двох напруг отримана вихідна напруга  $v_o(t)$  є змінним трирівневим інвертором, подібним до того, що показано на рис. 2.21. Кожен з виходів інвертора містить третю гармоніку.

Однак, якщо додати вихід двох інверторів, результуюча напруга не матиме напруги третьої гармоніки, якщо  $d$  вибрано рівним  $30^\circ$ . У літературі запропоновано численні методи керування для усунення гармонік і погашення гармонік. Ці методи привели до двох великих проривів у формуванні активних хвиль або активних фільтрів; а саме метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) і метод багаторівневих інверторів, про які буде коротко мова далі.

Метод  $\delta$ -контролю накладає нульову напругу на вихідну напругу, і якщо введено більше сегментів нульової напруги, вміст гармоній змінної напруги може бути зменшено. Наприклад, якщо ввести два сегменти, як показано на рис. 2.23а, з  $\delta=30^\circ$  і  $c=12^\circ$ , то можна показати, що напруги як третьої, так і п'ятої гармоніки можна виключити. Крім того, якщо ці області нульової напруги можна ввести на високій частоті (HF) зі змінною шириною, яка синусоїдно розподілена на основній частоті напруги змінного струму, результуюча змінна напруга буде містити лише основний змінний компонент і компоненти на HF.  $d$ -контролю.

## Потужна (силова) електроніка



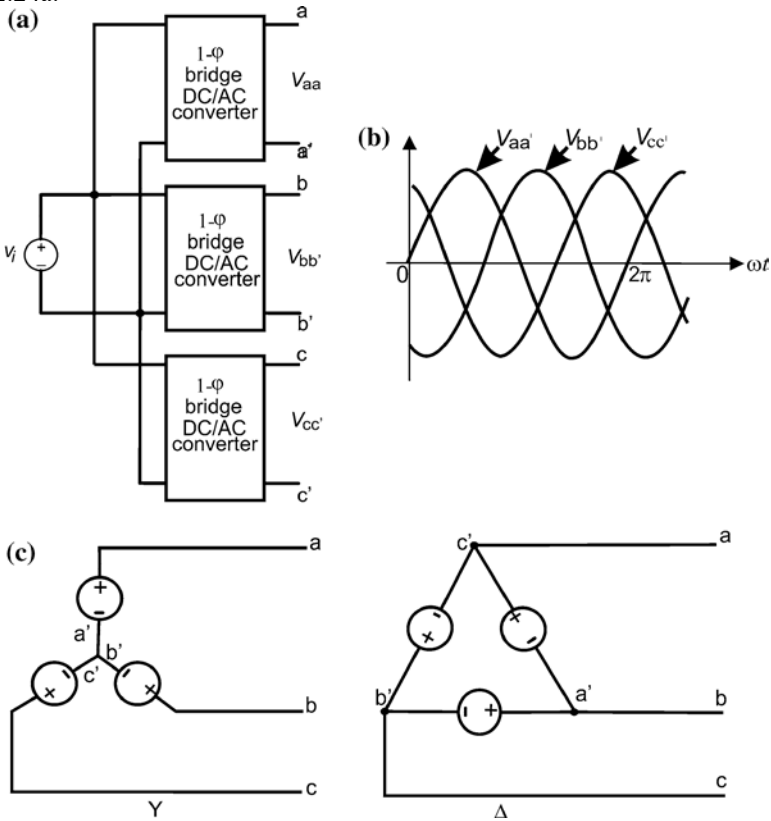
2.23 Техніка перемикання з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ): *у* – усунення множинних гармонік, *б* – схема ШІМ, *с* – вихід змінного струму ШІМ, *д* – генерація ШІМ та *е* – сигнал ШІМ

На малюнку 2.23б показано перетворювач, подібний до топології повного моста, де комутатори керуються або на ВЧ, або на низькій частоті (НЧ). ВЧ-перемикачі працюють на частоті, відомій як несуча частота, яка набагато вище основної частоти змінного струму. НЧ-перемикачі працюють на основній частоті, що називається частотою модуляції. Під час позитивного напівперіоду НЧ-перемикачів КВ-перемикачі чергуються на постійній несучій частоті з різним часом увімкнення, тобто зі змінним коефіцієнтом навантаження. Коефіцієнт завантаження можна отримати шляхом порівняння сигналу трикутної хвилі на несучій частоті з сигналом синусоїди на частоті модуляції, як показано на рис. 2.23с. Отримана вихідна форма сигналу має постійну частоту з

модульованою шириною імпульсу, тому цей метод називається ШІМ. Незважаючи на те, що специфічне усунення (або погашення) гармонік не вводиться, небажані частоти збільшуються на декаду вище основної частоти змінного струму, і, як наслідок, необхідна пасивна фільтрація може бути зведена до мінімуму.

**Трифазні інвертори**

Трифазні перетворювачі DC/AC можна сконструювати з використанням однофазних перетворювачів DC/AC (одна гілка). До загального джерела постійного струму можна підключити три однофазні інвертори, як показано на рис. 2.24а.



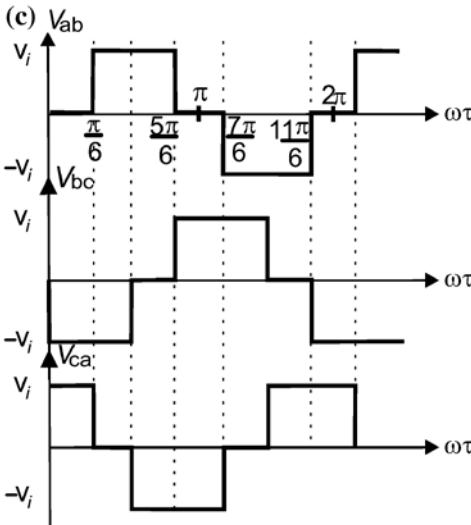
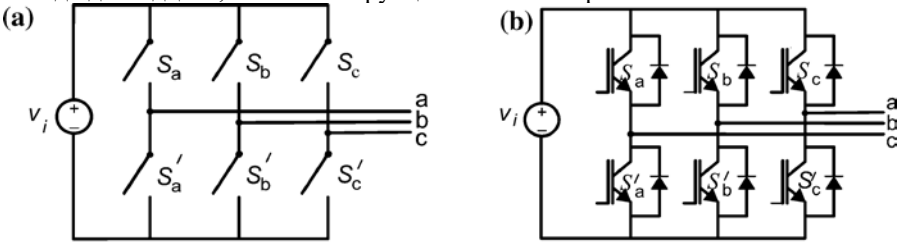
2.24 Трифазний перетворювач змінного/постійного струму: а — схема, форми сигналів  $b$  і з'єднання  $c$

Їхні перемикачі зміщені на  $120^\circ$ , з результуючою вихідною напругою, показаною на рис. 2.24b. Три виходи можна підключити в  $\Upsilon$  або  $\Delta$ , як показано на рис. 2.24c. Можна показати, що кількість перемикачів для трьох незалежних



## Потужна (силова) електроніка

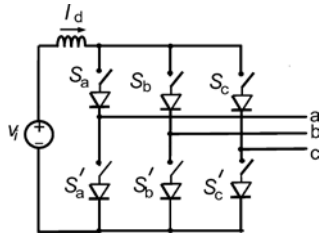
однофазних мостових перетворювачів можна зменшити до шести комутаторів, а не до дванадцяти, і така конструкція показана на рис. 2.25а і б.



2.25 Шестиступінчастий інвертор і форми сигналів: а — схема, реалізація перемикача б і форми сигналу с

Ця конструкція перетворювача є стандартною топологією схеми, яка використовується для перетворення постійного струму в трифазний змінний струм. Вихід змінного струму залежить від керування шістьма перемикачами. Наприклад, якщо перемикачами керують командою зсуву фази  $60^\circ$ , результуючі форми сигналу показані на рис. 2.25с.

Коли напруга постійного струму є вхідним для перетворювача, конструкція визначається як **інвертор із напругою** (voltagefed inverter — VFI) або **інвертор джерела напруги** (voltage source inverter — VSI). Коли постійний струм є вхідним для перетворювача, він визначається як **інвертор з живленням струму** (current-fed inverter — CFI) або **інвертор джерела струму** (current source inverter — CSI), як показано на рис. 2.26.

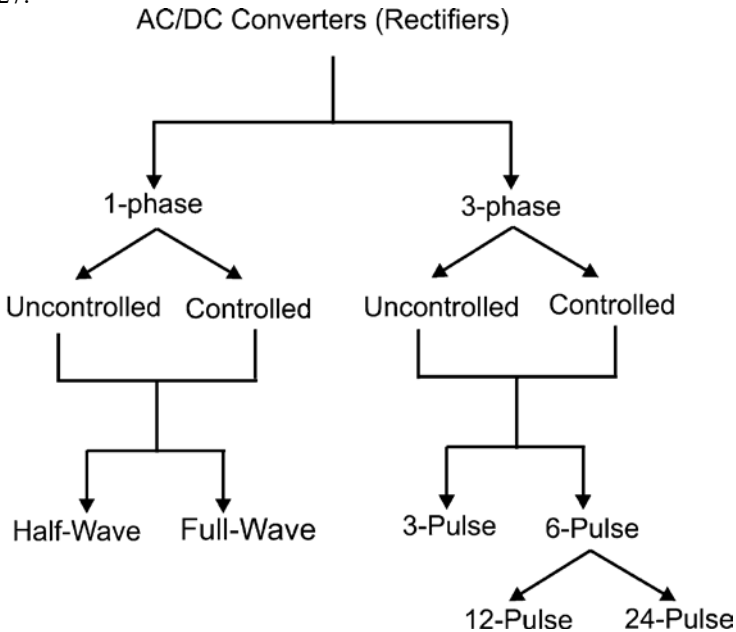


2.26 Інвертор джерела струму (CSI)

Обмеженнями роботи CSI є: (1) завжди повинен існувати поточний шлях для джерела струму; (2) вихідні фази не можуть бути замкнені накоротко. Постійний струм є односпрямованим, і лише два перемикачі проводять одночасно, забезпечуючи шлях для циркуляції струму. Типи перемикачів для цієї конструкції повинні повністю керуватися струмом і двонаправленою напругою. Перемикачі, які відповідають цій вимозі, включають: SCR, GTO та нещодавно представлений IGBT.

**Перетворювачі змінного/постійного струму (випрямлячі)**

Перетворювачі змінного/постійного струму називаються схемами випрямлячів, які можна широко класифікувати на основі типу джерела змінного струму, а тип напівпровідникового вимикача використовується, як показано на рис. 2.27.



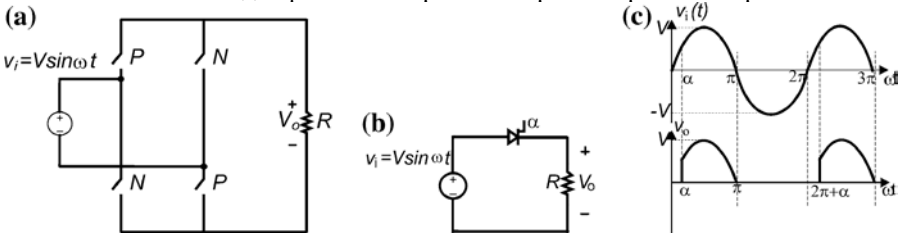
2.27 Класифікації схем випрямляча

Випрямлячі зазвичай використовуються як в однофазних, так і в трифазних програмах, але багатofазні топології можливі для застосування високої потужності.

Перемикачі, які використовуються в конструкціях випрямлячів, можуть бути як некерованими (діод), так і керованими (тиристорними). Однофазні випрямлячі можна класифікувати як напівхвильові або повнохвильові схеми. Трифазні випрямлячі класифікуються на основі кількості імпульсів випрямленої вихідної напруги, тобто 3-імпульсні випрямлячі, 6-імпульсні, 12-імпульсні або більш загально 3·2n-імпульсні (де n = 0, 1, 2, 3...). Кількість імпульсів - це відношення основної частоти виходу випрямляча до частоти входу змінного струму.

**Однофазні випрямлячі**

Загальна схема однофазного випрямляча проілюстрована на рис. 2.28.



2.28 а Загальна схема 1-фазного випрямляча, б 1-фазний керований випрямляч і с Форми сигналів вхідної та вихідної напруги

Зауважте, що ця конструкція така ж, як і узагальнений DC/DC перетворювач, показаний на рис. 2.14, за винятком того, що синусоїдальна напруга заміняє вхідне джерело постійного струму. Основні схеми однофазного випрямляча завершуються встановленням P- і N-перемикачів на постійне замикання або розімкнення. Наприклад, якщо всі N-перемикачі постійно розімкнуті, а нижній P-перемикач постійно замкнутий, у результаті утворюється коло напівхвильового випрямляча. Якщо P-перемикач, що залишився, є тиристором, то отримана ланцюг являє собою керований напівхвильовий випрямляч. Зображення цієї топології показано на рис. 2.28b, а результуючі форми сигналу показані на рис. 2.28c. У такому випадку кут  $\alpha$  є кутом затримки включення тиристора, який вимірюється, починаючи з переходів від нуля джерела вхідної напруги. Форма вихідного сигналу має середнє значення (необхідну складову постійного струму), яке можна розрахувати за допомогою рівняння. (2.9) як,

$$V_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \tag{2.9}$$

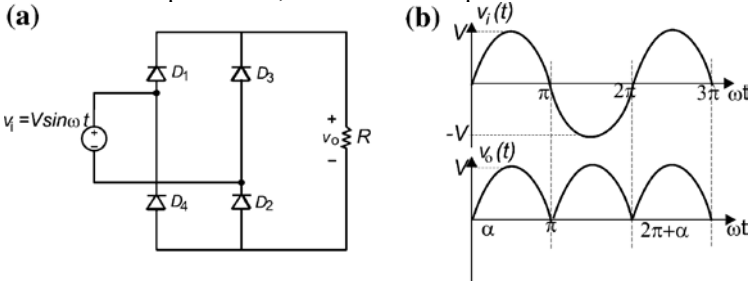
Рівняння (2.9) показує, що значення постійної напруги можна змінювати при зміні  $\alpha$ . Напівхвильовий некерований випрямляч можливий, коли

залишився Р-перемикач реалізований за допомогою діода; ця схема така ж, як на рис. 2.28б, за винятком того, що тиристор замінено на діод. Оскільки діод є некерованим перемикачем, а встановлюється на нуль, і діод вмикається при переході нуля напруги живлення. Коли  $\alpha=0$  підставляється в рівняння (2.9) тоді середня напруга задається як:

$$V_{\text{avg}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V}{\pi} \quad 2.10$$

Рівняння (2.10) показує, що постійна напруга є фіксованою і не може бути змінена, і в результаті цей тип випрямляча визначається як некерований.

Якщо використовуються всі перемикачі на рис. 2.28а, то отримана схема є повнохвильовим випрямлячем, як показано на рис. 2.29а.



2.29 Приклади некерованих випрямлячів: а — повний міст (full-bridge — FB) і б — сигнали

Коли всі перемикачі є діодами, результуюча форма сигналу проілюстрована на рис. 2.29б. Напруга постійного струму в конструкції повнохвильового випрямляча буде вдвічі більше, ніж у напівхвильовому випрямлячі.

Існують топології схем, такі як одноквADRANTНИЙ, двоквADRANTНИЙ і чотирьоквADRANTНИЙ, для напів- або повнохвильових типів. Деякі з них є некерованими, а інші повністю керовані в залежності від комбінації діодів і тиристорів, які зазвичай відносять до напівкерованих або гібридних випрямлячів. Деякі випрямлячі використовують трансформатори для ізоляції для подальшої можливості випрямлення.

### Трифазні випрямлячі

Як зазначено в класифікації трифазних випрямлячів, вихід визначається через кількість імпульсів за один цикл вхідної напруги. 3-імпульсний випрямляч — це базова схема трифазного випрямляча (підключена до трифазної системи) і може використовуватися як будівельний блок для більшості інших трифазних випрямлячів. Кожну з трифазних вхідних напруг можна визначити за допомогою рівняння. (2.11). Робота трифазного 3-імпульсного випрямляча показана на рис. 2.30а, б.

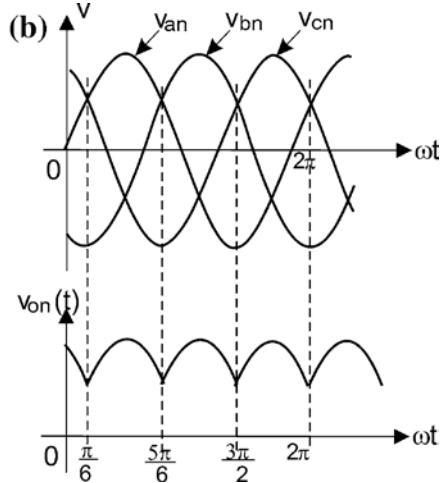
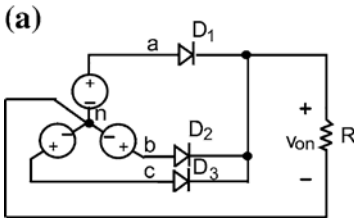
## Потужна (силова) електроніка

$$v_a = V \sin \omega t \quad \text{V}$$

$$v_b = V \sin(\omega t - 120^\circ) \quad \text{V}$$

$$v_c = V \sin(\omega t + 120^\circ) \quad \text{V}$$

2.11



2.30 трифазний 3-імпульсний випрямний контур: : a — схема, b — осцилограми

У цьому випадку перемикачі реалізовані з діодами (некерований випрямляч). Діод увімкнеться, коли його напруга буде вище, ніж у двох інших діодів, тобто діод, підключений до найвищої з трьох напруг, буде проводити. Отриманий результат показаний на рис. 2.30б; Зверніть увагу, що діодна провідність починається і закінчується, коли дві з трьох напруг рівні. Крім того, кожен діод проводить під кутом  $120^\circ$ , а вихідна напруга має 3 імпульси протягом одного циклу входу. Отже, основна частота вихідної напруги втричі перевищує частоту вхідної напруги. Компонента постійного струму виходу кожного з них може бути розрахована за середнім за його період як:

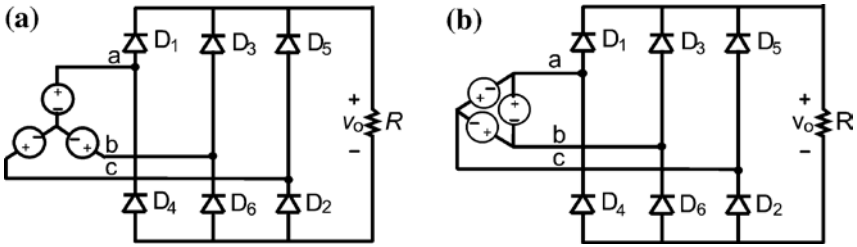
$$V_{\text{avg}} = \frac{1}{(2\pi/3)} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}V}{2\pi}$$

2.12

Напруга постійного струму, задана формулою (2.12), вище вихідної напруги однофазного повнохвильового випрямляча. Звичайно, недоліком є потреба в трифазному джерелі, яке є найбільш поширеним для промислових застосувань.

Якщо підключити два 3-імпульсні випрямлячі, то отримана топологія показана на рис. 2.31.

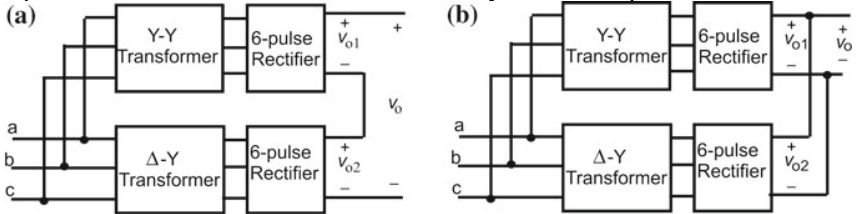
## Розділ 12



2.31 Схеми 6-імпульсного випрямляча: джерело, з'єднане зіркою (Y), і б джерело, з'єднане трикутником ( $\Delta$ )

Ця схема відома як 6-імпульсний випрямляч і є будівельним блоком для всіх високопотужних схем багатоімпульсного випрямляча.

За допомогою трансформаторів Y-Y і  $\Delta$ -Y для побудови 12-імпульсних випрямлячів можна з'єднати дві схеми 6-імпульсних випрямлячів.



2.32 Схеми 12-імпульсного випрямляча: а — високовольний 12-імпульсний випрямляч і б — високострумний 12-імпульсний випрямляч

Якщо два випрямлячі з'єднані послідовно, то отримана схема показана на рис. 2.32а і підходить для високої напруги, тоді як перетворювач підключений паралельно, як показано на рис. 2.32б, схема придатна для високого струму.

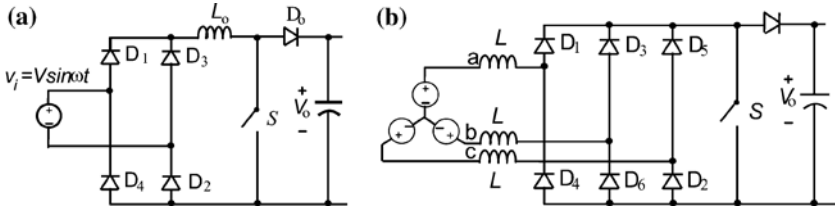
### Керовані випрямлячі

Коли діоди замінюються тиристорами, схема трифазного випрямляча стає керованою, а кут затримки  $\alpha$  (вимірний відносно часу, коли діоди починають проводити провідність) буде керувати вихідною напругою. Подібно до однофазних випрямлячів, існують комбінації перемикачів і трансформаторів, які призводять до отримання більш високих імпульсів трифазних випрямлячів.

### ШІМ-випрямлячі

ШІМ-випрямлячі можуть бути реалізовані як односпрямовані або двонаправлені, що стосується їх можливостей потоку потужності. Базовий односпрямований підсилювальний варіант складається з некерованого діодного моста, за яким слід підвищувальний перетворювач, як показано на рис. 2.33а. Коли перемикач увімкнено, струм індуктивності зростає пропорційно вхідній напрузі (синусоїдальній). Коли перемикач вимкнено, струм індуктивності зменшується, і його енергія передається конденсатору, повторюючи такий цикл із змінною вхідною напругою.

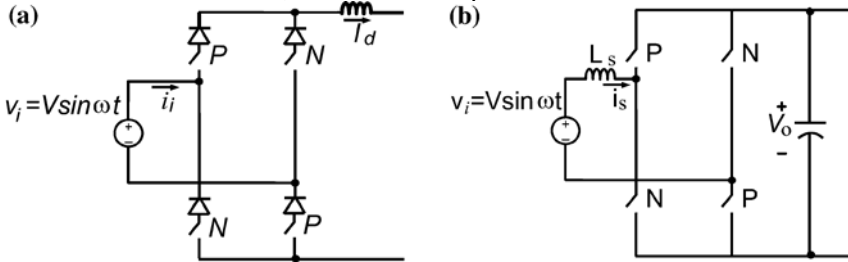
## Потужна (силова) електроніка



2.33 ШІМ-випрямляч: а однофазний, б трифазний

Підвищувальний перетворювач регулює напругу конденсатора, а також вражає синусоїдальним профілем вхідного струму, що покращує вхідний коефіцієнт потужності. Оскільки цей перетворювач може працювати в режимі безперервної провідності (ССМ), або в режимі безперервної провідності (DCM), його керування має бути спроектовано таким чином, щоб воно було стабільним і працювало в обох умовах. Трифазний варіант односпрямованого підвищувального випрямляча показаний на рис. 2.33б, але котушки індуктивності підключені на стороні змінного струму.

З метою реалізації двонаправленого перетворювача повністю керовані перемикачі замінюють діоди, як показано на рис. 2.34а.



2.34 Однофазні ШІМ випрямлячі

Ця топологія називається **випрямлячем джерела струму** (*current source rectifier — CSR*). У цій конструкції вихідна напруга  $V_0$  менша за амплітуду вхідної напруги  $V$ , як зазначено в рівнянні. (2.13). Таким чином, CSR також визначається як понижувальний випрямляч, метою якого є забезпечення постійного струму  $I_d$  на виході.

$$V_0 < \frac{\sqrt{3}}{2} V$$

2.13

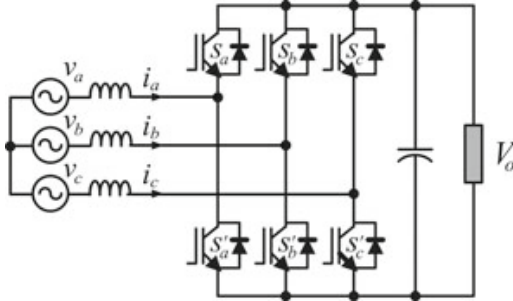
Функція підсилення можлива при підключенні індуктивності підвищувального перетворювача на стороні змінного струму, як показано на рис. 2.34б. Коли змінна напруга є позитивною, а перемикач  $T_2$  знаходиться у ON, струм індуктивності зростає пропорційно напрузі змінного струму, а коли  $T_2$  вимикається, енергія індуктивності перекачується на конденсатор через діоди  $D_1$  і  $D_4$ . Аналогічно, коли напруга змінного струму негативна,  $T_4$  включається. Коли він вимикається, енергія тече через діоди  $D_2$  і  $D_3$ . Ця топологія відома як **випрямляч джерела напруги** (*voltage source*

*Rectifier — VSR*). У VSR вихідна напруга  $V_0$  перевищує амплітуду вхідної напруги  $V$ , як зазначено в формулі. (2.14).

$$V_0 > V$$

2.14

VSR також відомий як *підвищувальний випрямляч* з метою забезпечення постійної напруги  $V_0$  на виході. CSR і VSR подвійні один від одного.



2.35 Реалізація трифазного VSR

На малюнку 2.35 показана реалізація трифазної версії PWM VSR (з IGBT). VSR потребує великого конденсатора на виході, він за своєю суттю є двонаправленим і може застосовуватися в кількох програмах, де перетворювач з боку лінії повинен мати можливість доставити енергію назад до джерела, наприклад, у локомотивах, кранах та відновлюваних джерелах енергії, підключених до сторона зв'язку постійного струму.

### Перетворювачі змінного/перемінного струму

Перетворювачі АС/АС використовуються для з'єднання джерел змінного струму, наприклад, від однофазного або трифазного джерела до однофазного або трифазного джерела.

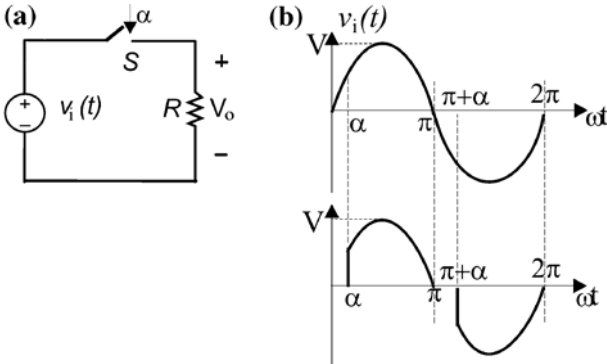
У програмах, які потребують змінного струму, таких як диммери та приводи змінного струму, енергія перетворюється із системи з *фіксованою напругою і фіксованою частотою* (*fixed voltage fixed frequency — FVFF*) в однофазну або трифазну систему зі *змінною напругою і фіксованою частотою* (*Variable voltage fixed frequency — VVFF*) або *змінною напругою і змінною частотою* (*variable voltage variable frequency — VVVF*).

Дуже проста схема перетворювача АС/АС для регулювання потужності змінного струму для резистивного навантаження показана на рис. 2.36а, а форма сигналу – на рис. 2.36б. Ця схема відома як контролер змінного струму, який перетворює однофазний змінний струм FVFF в однофазний змінний струм VVVF.

Основна частота входу і виходу однакова. Змінюючи кут затримки включення перемикача а, змінюється амплітуда основної напруги.

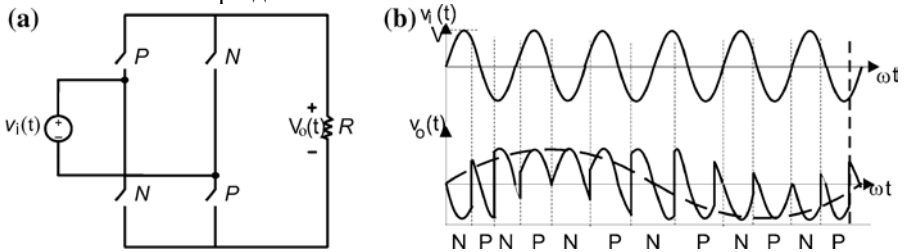


## Потужна (силова) електроніка



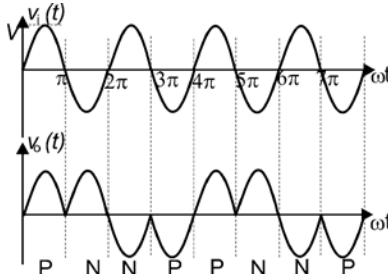
### 2.36 Перетворювач змінної напруги з фіксованою частотою (VVFF).

Типовими сферами застосування цієї схеми є диммери та однофазні електроприводи, що використовуються в побутовій техніці. Реалізація перемикача зазвичай являє собою симистор (комбінація двох антипаралельних SCR), який керує позитивним півперіодом джерела змінного струму з одним тиристором і негативним півперіодом з іншим.



### 2.37 Циклоконвертер як перетворювачі зі змінною напругою і змінною частотою VVVF

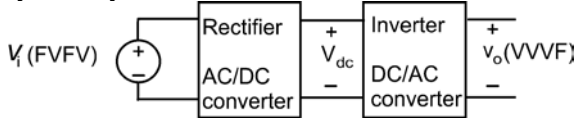
Схема, показана на рис. 2.37а, є загальним перетворювачем змінного/перемінного струму, який називають циклоконвертером. Перемикачами можна керувати для отримання вихідної напруги зі змінною амплітудою та змінною частотою.



### 2.38 Управління з інтегральним циклом для (VVVF) перетворювача AC/AC струму

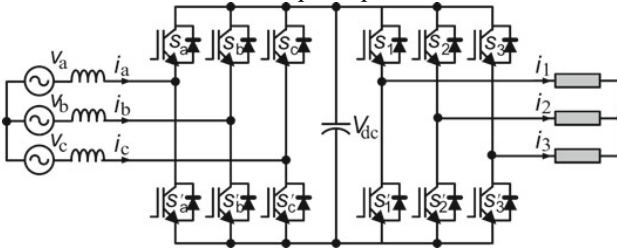
Це називається виходом VVVF, як показано на рис. 2.37b. P- і N-перемикач керуються для досягнення вихідної напруги на частоті, нижчій, ніж вхідна.

Інший можливий підхід до керування перетворювачем змінного/перемінного струму відомий як керування за інтегральним циклом, як показано на осцилограмі на рис. 2.38, що є прикладом випадку, коли основна частота виходу вдвічі перевищує вхідну.



### 2.39 Перетворювач AC/AC FVfV в VVVF через канал постійного струму

Перетворення AC/AC також можна отримати шляхом каскадного поєднання перетворювача AC/DC з перетворювачем DC/AC, як показано на рис. 2.39; цей підхід відомий як підхід «перетворення лінії постійного струму».



### 2.40 Реалізація перетворювача AC/AC FVfV до VVVF через канал постійного струму

Реалізація цього перетворювача з IGBT показана на рис. 2.40.

Ця конструкція забезпечує двосторонній потік енергії та чотириквADRантну роботу та зазвичай застосовується для приводів двигунів, виробництва електроенергії за допомогою асинхронних машин, систем зберігання енергії (таких як батареї, ДБЖ та енергетичні системи маховика) та підключення двох незалежних сітки. Оскільки CSR можна моделювати як кероване джерело постійного струму, природним навантаженням є CSI, який підтримує перетворювач AC/AC FVfV у VVVF через індуктивну лінію постійного струму.

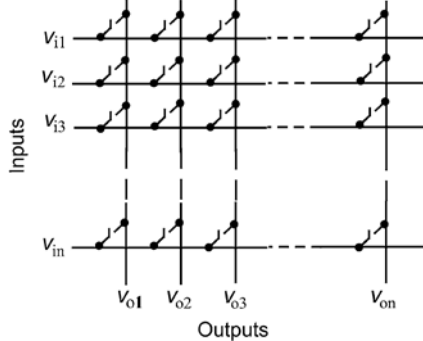
### Передові топології перетворювача

Було розроблено кілька передових схем, і сфера потужної електроніки все ще розвивається та швидко розвивається з новими перетворювачами. Деякі з цих топологій є специфічними для програми і будуть обговорені в наступних розділах

#### Матричний конвертер

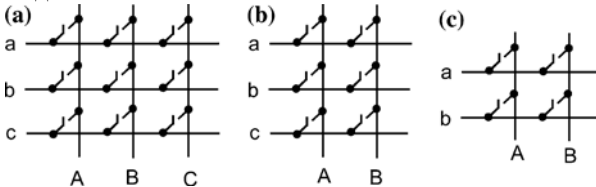
Матричний перетворювач складається з комутаційної матриці з кількома входами і багатьма виходами, яка може представляти всі комутаційні

перетворювачі. Його можна розглядати як повністю керований чотириквдратний двонаправлений перемикач, який дозволяє працювати на ВЧ.



2.41 Узагальнені матричні перетворювачі

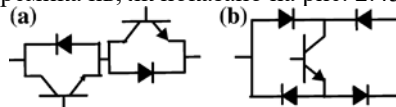
На малюнку 2.41 наведено приклад матричного перетворювача з  $n$ -входами та  $m$ -виходами.



2.42 Приклади перетворювачів, отриманих від матричного перетворювача:  
 $a$  — AC/AC,  $b$  — AC/DC,  $c$  — AC/DC і DC/DC

На малюнку 2.42а показано конкретний випадок, коли  $n = m = 3$ , тобто перетворювач AC/AC струму з трифазного в трифазний, а на рис. 2.42b показано випадок для  $n = 3$  і  $m = 1$ , який може бути або трифазним AC/DC перетворювач або перетворювач постійного струму в трифазний. На малюнку 2.42c показано перетворювач для  $n = m = 1$  (тобто будь-який перетворювач DC/DC струму, однофазний перетворювач AC/DC струму або перетворювач постійного струму в однофазний змінний струм).

Двоспрямований перемикач напруги і струму може бути виготовлений з діодів і керованих перемикачів, як показано на рис. 2.43а, б.



2.43 Реалізація повністю двонаправленого перемикача

Трифазний перетворювач змінного струму в змінний наведено на рис. 2.44. Незважаючи на те, що топологія матричного перетворювача існує вже досить давно, вона привернула увагу в багатьох програмах через недавно доступність комутаційних силових електронних пристроїв і контролерів.

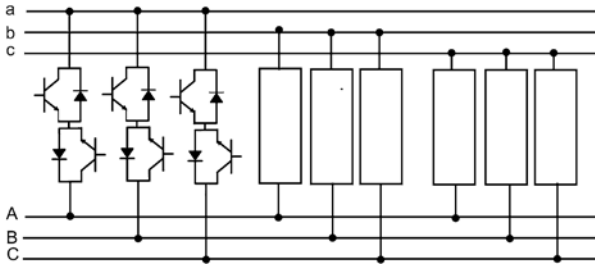


Рис. 2.44 Реалізація трифазного перетворювача AC/AC

### Багаторівневі інвертори

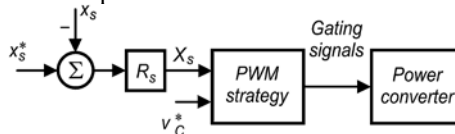
Багаторівневі інвертори — це перетворювачі змінного/постійного струму, де послідовне з'єднання силових електронних пристроїв і розділених конденсаторів дозволяє застосовувати високовольтні пристрої. Ці інвертори модулюються таким чином, що вихідна напруга нагадує сходи, як показано узагальненим багаторівневим інвертором на рис. 2.45а. Трирівневий перетворювач складається з послідовного конденсатора з центральним відводом в якості нейтралі, де кожна фаза ніжка перетворювача має дві пари комутаційних пристроїв, включених послідовно. Зі збільшенням кількості рівнів синтезована вихідна форма сигналу додає більше ступенів, створюючи більш витончену хвилю сходів з мінімальними гармонійними спотвореннями, як показано на рис. 2.45b. Звичайно, спотворення з нульовою гармонікою вихідної хвилі можна отримати нескінченною кількістю рівнів. Більше рівнів також означає, що послідовний пристрій може забезпечувати вищі вихідні напруги без будь-яких проблем із розподілом напруги пристрою. Такі численні перемикачі та схеми зазвичай роблять багаторівневі інвертори дорожчими, ніж дворівневі інвертори, і є економічно ефективними лише для дуже специфічних додатків комунальних і передаючих або розподільних систем електропостачання. Різні топології багаторівневого інвертора можна розробити на основі базової схеми на рис. 2.45, наприклад, інверторів із затисканням діодів (або нейтральних інверторів, NPC) та інверторів із затисканням конденсаторів або інверторів, що летять (FC), як показано на рис. 2.45. с, d відповідно для трирівневих інверторів. Іншою популярною конфігурацією є Cascaded H-Bridge, з окремими джерелами постійного струму, яка розвинена на основі дворівневого інвертора, показаного на рис. 2.45e для п'ятирівневого інвертора. Усіма цими інверторами також можна керувати методами ШІМ [5, 6], один з яких показаний на рис. 2.45f для трирівневого інвертора NPC

### Управління силовими перетворювачами

Існує кілька цілей у застосуванні перетворювачів живлення, таких як контроль напруги в мережі, контроль струму, контроль напруги або струму лінії постійного струму, як підключення навантаження або постійного струму,

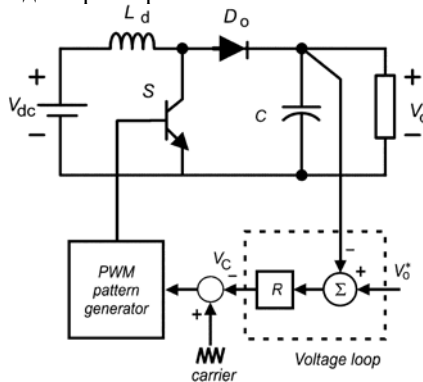
контроль напруги або струму змінного струму, контроль гармонік, контроль швидкість тощо. Стратегія контролю, застосована до цих випадків, часто стосується регулювання двох змінних з різною динамікою, одна, ймовірно, повільна, а інша швидка. Приклади: (1) для випрямляча: напруга конденсатора (повільно) і струм мережі (швидкий), (2) для приводу двигуна: швидкість двигуна (повільно) і струм двигуна (швидкий), (3) інвертор, підключений до мережі: вихід струм (повільний) і вхідна напруга (швидкий).

У цьому розділі розглядатиметься лише контроль напруг і струмів. На малюнку 2.46 показано типове керування ШІМ для повільної змінної, визначеної як  $X_s$  порівнюється з її опорним  $X_s^*$ .



2.46 Повільний змінний регулятор

Результуюча помилка регулюється регулятором повільної змінної  $R_s$ : цей регулятор має динамічні характеристики, такі як  $D$ , безпосередньо регулюється, щоб повільна змінна залишалася регульованою. Цю схему можна безпосередньо застосувати до перетворювачів DC/DC.



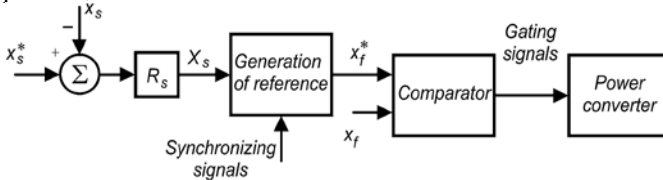
2.47 Регулювання напруги підвищувального перетворювача

Прикладом є посилюючий перетворювач DC/DC, показаний на рис. 2.47, де метою є регулювання вихідної напруги,  $V_o$ : для цього похибка між опорним і фактичним вихідним напругою зазвичай живить пропорційно-інтегративний (PI) регулятор,  $R$ : вихід регулятора, контроль напруги  $X_s$   $\frac{1}{4}$   $v_c$  порівнюється з несучим сигналом, щоб отримати пряме ШІМ-управління. Цей тип керування також може бути використаний, коли керується лише одна змінна, наприклад, напруга в PWM VSI і струм у PWM CSI.

Схему керування можна узагальнити за допомогою каскадної стратегії, в якій будь-який зовнішній (повільно змінний) контроль визначає еталон для внутрішнього (швидко змінного) керування. Цей вид управління найчастіше є

## Розділ 12

стабільним, оскільки обидва петлі мають різну динаміку. Щоб забезпечити бажаний швидкий змінний профіль, вихід регулятора  $R_s$  синхронізується з сигналом шаблону для визначення внутрішнього контрольного опорного сигналу,  $x_f$ : Як приклад, для отримання роботи коефіцієнта потужності, близької до одиниці, шаблон струму вхідної лінії ШІМ синхронізується з напругою мережі. Цього можна досягти двома способами: (1) напруга мережі після фільтрації може використовуватися безпосередньо як шаблон для струму, або (2) перетин нуля мережі або напруга конденсатора можна використовувати як сигнал синхронізації.

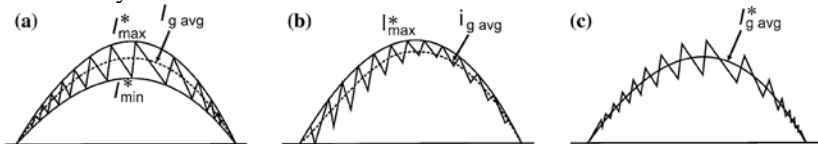


2.48 Схема як для повільного, так і для швидкого змінного керування

Тепер розглянемо дві схеми внутрішнього контролю: перша показана на рис. 2.48, де  $x_f$  порівнюється з опорним внутрішнім циклом  $x_f$ ; щоб генерувати стробірни імпульси.

Враховуючи лише роботу ССМ, цей компаратор може:

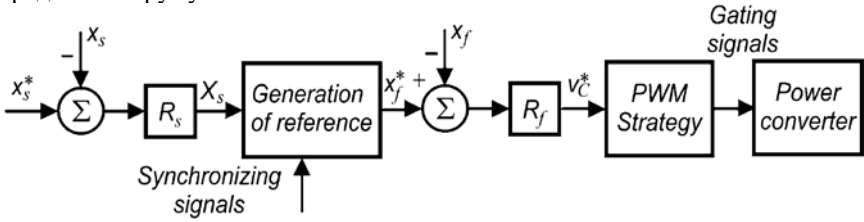
- (1) використовувати методики гістерезису (вибух-вибух), за яких регульована змінна підтримується всередині діапазону допуску;
- (2) порівняти безпосередньо  $x_f$  і  $x_f^*$ ,
- (3) порівняти інтеграл від  $x_s$  з  $x_f$ : ці три принципи показано на рис. 2.49, коли керованою змінною є струм, а шаблоном є синусоїдна форма сигналу.



2.49 ССМ: а контроль гістерезису, б контроль піку струму і с контроль середнього струму

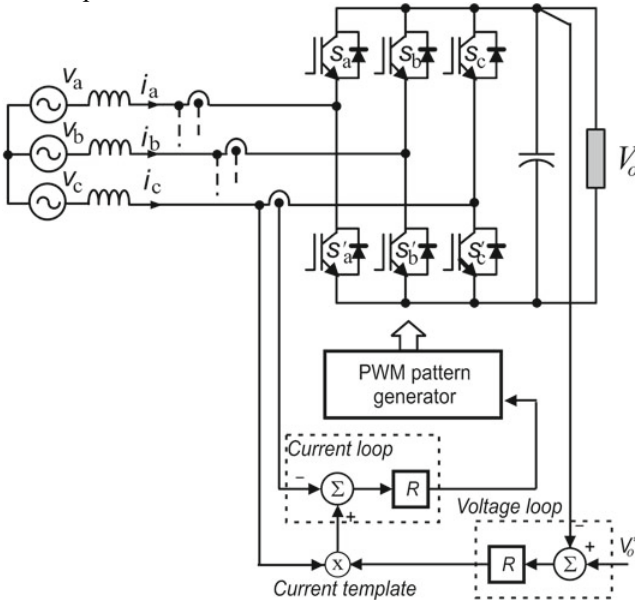
У техніці гістерезису, показаній на рис. 2.49а, вимірний струм порівнюється зі смугою допуску навколо еталону. Відповідний перемикач включається, коли струм досягає нижньої межі діапазону  $I_{min}$ ; і вимикається, коли фактичний струм досягає верхньої межі діапазону,  $I_{max}$ . Частота перемикання змінюється вздовж поточної форми сигналу. На відміну від попередньої техніки, випадок (2), рис. 2.49б, працює з постійною частотою перемикання: відповідний перемикач включається годинником на початку кожного інтервалу перемикання і вимикається, коли фактичний струм намагається вийти за межі послання. Цей метод відомий як поточний піковий контроль. На рис. 2.49с вимірний струм інтегровано, щоб його середнє значення можна було

порівняти з опорним струмом. З цієї причини цей підхід відомий як контроль середнього струму.



2.50 Узагальнена стратегія керування, застосована до силових перетворювачів

Можлива схема наведена на рис. 2.50, де похибка керування регулюється регулятором  $R_f$ ; чий вихід дає модулюючий сигнал, який буде застосовуватися до обраної стратегії ШІМ.

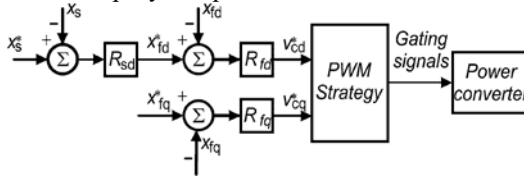


2.51 ШІМ-випрямляч, керований і струмом, і напругою

Розглянемо, як приклад, управління схемою PWM VSR, як показано на рис. 2.51. У цьому випадку вихідна напруга і струм мережі є основними завданнями управління перетворювачем. На схемі рис. 2.51  $x_s$  — напруга конденсатора,  $x_f$  — струм мережі.

Схема на рис. 2.51 включає контролер швидкого струму, повільний регулятор напруги постійного струму, такий як PI, P, Fuzzy або інший, і генератор ШІМ. Оскільки для керування коефіцієнтом потужності опорне значення вхідного струму,  $i$ ; має бути синусоїдальним, а вихід регулятора напруги

помножується на синусоїдний сигнал (шаблонний сигнал) з тією ж частотою і таким же кутом зсуву фази мережі живлення. Цей шаблон використовується для створення шаблону ШІМ, який змушує вхідні струми слідувати бажаному шаблону струму  $I$ : Цей ШІМ-випрямляч, керований струмом джерела напруги, простіший і стабільніший, ніж метод ШІМ-випрямляча, керованого напругою джерела напруги. Його стабільність може бути забезпечена адекватним вибором підсилення регулятора.



*2.52 Схема управління просторовим вектором*

Використовуються також інші стратегії управління, такі як схема просторового вектора (рис. 2.52). У цьому випадку контролер напруги надає значення опорного d-компонентного струму,  $X_d$ ; тоді як опорний q компонент струму  $X_q$ ; фіксується до нуля, щоб отримати унітарний коефіцієнт потужності. Ці послання порівнюються з вхідними струмами, які представлені в координатах d-q. Два контролери, зазвичай PI, дають контрольні значення  $v_{cd}$  і  $v_{cq}$ , які генерують шаблон ШІМ, який керує VSR. Зворотне перетворення dq/abc дозволяє отримати імпульси приводу затвора для перемикачів.

Важливим моментом є те, що регулятор струму може бути модифікований іншими сигналами, такими як сигнал балансування напруги конденсатора в багаторівневному перетворювачі NPC.



