***Зміст***

[§34. Електричні заряди](#_Toc505615851)

[§35. Електричне поле](#_Toc505615852)

[§36. Речовина в електричному полі](#_Toc505615853)

[§37. Постійний струм](#_Toc505615854)

[§38. Електричний струм у металах](#_Toc505615855)

[§39. Електричний струм у напівпровідниках](#_Toc505615856)

[§40. Електричний струм в електролітах](#_Toc505615857)

[§41. Електричний струм у газах](#_Toc505615858)

[§42. Електричний струм у вакуумі](#_Toc505615859)

[§43. Магнітна взаємодія струмів](#_Toc505615860)

[§44. Речовина в магнітному полі](#_Toc505615861)

[§45. Електричний двигун постійного струму](#_Toc505615862)

[§46. Електромагнітна індукція](#_Toc505615863)

[§47. Самоіндукція](#_Toc505615864)

[§48. Електромагнітні коливання](#_Toc505615865)

[§49. Генератори незгасаючих електромагнітних коливань](#_Toc505615866)

[§50. Змінний електричний струм](#_Toc505615867)

[§51. Трансформатор](#_Toc505615868)

[§52. Електромагнітні хвилі](#_Toc505615869)

[§53. Принципи радіозв'язку](#_Toc505615870)

[§54. Елементи теорії відносності](#_Toc505615871)

## [§34. Електричні заряди](" \l "Зміст)

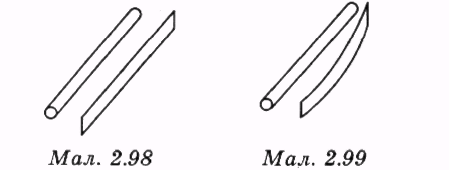
Вивчаючи властивості твердих тіл, рідин і газів, можна виявити дію сил притягання і відштовхування між їхніми частинами. Оскільки всі тіла складаються з атомів, ці сили діють між атомами. Сили притягання між атомами сталевої пружини перешкоджають її розтягненню, а після розтягнення повертають її до почат­кового стану. Сили притягання між атома­ми або молекулами з'єднують їх у рідину або у тверде тіло. Сили відштовхування між атомами перешкоджають стисненню твердих, рідких і газоподібних тіл. Яка ж природа сил притягання й відштов­хування, що діють між атомами або їхніми частинами?

Відповідь на це питання було знайдено після відкриття електричних зарядів і вив­чення законів їхніх взаємодій.

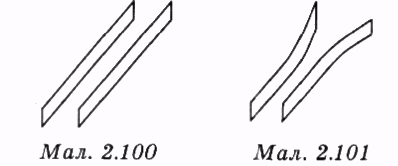
### Електричні заряди

Дослід показує, що після зіткнення й на­ступного розділення двох тіл з різних речо­вин між цими тілами діють сили притяган­ня. Виникнення такої взаємодії можна спо­стерігати під час досліду зі скляним стриж­нем і смужками поліетиленової плівки. Візьмемо в одну руку скляний стрижень, у другу — смужку й наблизимо їх на від­стань 1-2 см. Дослід не виявляє дії яких-небудь сил між ними — смужка не притя­гується до стрижня й не відштовхується від нього (мал. 2.98).

Тепер покладемо смужку на стіл і проведе­мо декілька разів по її поверхні скляним стрижнем. Потім повторимо дослід з вияв­лення взаємодії між стрижнем і смужкою. Дослід показує, що смужка згинається в бік стрижня, виявляючи дію сил притяган­ня (мал. 2.99).



Візьмемо в руки дві однакові смужки, на­близимо їх на відстань 1-2 см й перевіри­мо, чи діють між ними сили притягання або відштовхування. Смужки не згинають­ся, отже, не притягуються й не відштовху­ються (мал. 2.100).



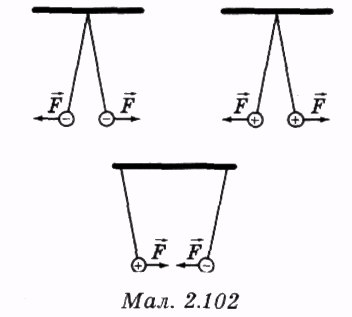
Покладемо поряд на стіл ці смужки й про­ведемо по них кілька разів скляним стриж­нем. Потім знову візьмемо смужки в руки й наблизимо їх на відстань 1-2 см. Смуж­ки згинаються в протилежних напрямах, виявляючи дію сили відштовхування (мал. 2.101).

Явище, яке ми спостерігаємо під час цих дослідів, називають *електризацією* тіл.

### Електризація. Електричні заряди

Явище електризації тіл і взаємодію наелек­тризованих тіл виявили більше ніж 2 000 років тому й пояснили на основі гіпотези про існування *електричних зарядів.* Згідно з цією гіпотезою в усіх тілах є елек­тричні заряди двох типів, позитивні й нега­тивні. Заряди однакового знака відштовху­ються один від одного, заряди різного зна­ка притягуються один до одного. Якщо в тілі є однакова кількість негативних і по­зитивних зарядів, їхня дія взаємно нейт­ралізується, тіло нейтральне. Якщо у двох тілах є надлишок електрич­них зарядів одного знака, тіла відштовху­ються.

Якщо в одному тілі надлишок позитивних зарядів, а в іншому надлишок негативних зарядів, то тіла притягуються (мал. 2.102).



Явище електризації двох нейтральних тіл під час зіткнення можна пояснити тим, що частина зарядів одного знака переходить з одного тіла на інше, у результаті чого тіла заряджаються різнойменно.

### Електричні заряди та елементарні частинки

Що таке електричні заряди і який їхній зв'язок з атомами речовини зрозуміли тільки після відкриття складної будови атома й вивчення властивостей *елементар­них частинок.*

За сучасними уявленнями електричні заря­ди не існують окремо від елементарних ча­стинок. Електричний заряд є характерис­тикою, властивістю елементарної частин­ки, таким самим, як його маса. Маса частинки є її властивістю, що харак­теризує здатність до взаємодії з іншими ча­стинками, які мають масу, за допомогою сил гравітаційної взаємодії.

### Сили електромагнітної взаємодії

Електричний заряд частинки є її влас­тивістю, що характеризує здатність до взаємодії з іншими частинками, які мають електричні заряди, за допомогою сил, що називають *силами електромагнітної взає­модії.*

Електричний заряд частинки має суттєві відмінності від маси частинки. По-перше, існує два типи електричних зарядів, пози­тивні і негативні, які складаються алгеб­раїчно. Під час додавання рівних за моду­лем позитивних і негативних зарядів за­гальний електричний заряд дорівнює нулю. Маси всіх частинок позитивні, під час з'єднання будь-яких частинок їхня загаль­на маса дорівнює сумі мас честинок. По-друге, між частинками з електричними зарядами різного знака діють електро­магнітні сили притягання, а між частинка­ми, які мають заряди одного знака, — си­ли відштовхування.

Сили гравітаційної взаємодії, які діють між будь-якими частинками, що мають ма­су, завжди є силами притягання.

### Анти гравітація

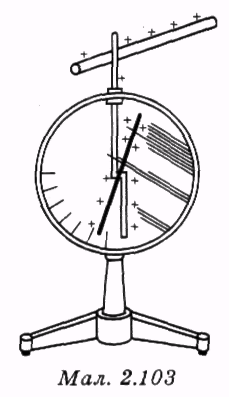
Щоправда, потрібно зробити одне заува­ження. Теоретично можливе існування час­тинок з «негативною» масою, які будуть відштовхуватися від частинок з позитив­ною масою. Це гіпотетичне явище назива­ють *антигравітацією.* Проте всі спостере­ження й експерименти, здійснені до нинішнього часу, не виявили явищ, що до­водять існування в природі антигравітації.

### Пояснення явища електризації тіл

Відкриття електрона як елементарної час­тинки, що має негативний електричний за­ряд і входить до складу будь-яких атомів речовини, дозволило *пояснити явище елек­тризації тіл* під час зіткнення. Сили при­тягання електронів на зовнішніх оболонках атомів різних хімічних елементів різні. Під час зіткнень тіл частина електронів із зовнішніх оболонок атомів, які слабко ут­римують електрони, може переходити до атомів, які притягують електрони силь­ніше. Тіло, яке втратило частину елек­тронів, має позитивний електричний заряд, а тіло, що одержало надлишок електронів, має негативний електричний заряд.

### Електрометр

Для виявлення й вимірювання електрич­них зарядів застосовують *електрометр.* Ос­новними частинами електрометра є метале­вий стрижень, закріплена на стрижні мета­лева стрілка, яка може вільно рухатися на­вколо горизонтальної осі, і металевий кор­пус. У процесі передачі стрижню електрич­ного заряду заряджається і стрілка. Між стрижнем і стрілкою діють сили відштовху­вання, стрілка відхиляється від вертикаль­ного положення. Відхилення стрілки збільшується із збільшенням заряду, що передається електрометрові (мал. 2.103).



### Закон збереження електричного заряду

У дослідах, під час яких вимірювали елек­тричні заряди, був установлений фунда­ментальний закон — *закон збереження еле­ктричного заряду.* Якщо до системи не надходять ззовні частинки з електричними зарядами і з системи не виходять частинки з електричними зарядами, то під час будь-яких взаємодій частинок усередині системи алгебраїчна сума їхніх електричних за­рядів залишається сталою:



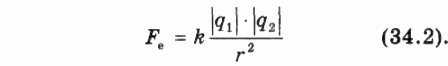
Закон збереження електричного заряду не забороняє виникнення або зникнення час­тинок, що мають електричні заряди. Він лише стверджує, що під час будь-яких взаємодій і перетворень частинок виник­нення частинки з негативним електричним зарядом обов'язково супроводжується ви­никненням частинки з рівним за модулем позитивним електричним зарядом. Дві за­ряджені частинки можуть перетворитися на нейтральні частинки, якщо вони мали електричні заряди протилежного знака і їхній сумарний електричний заряд дорів­нював нулю.

### Закон Кулона

Закон електромагнітної взаємодії нерухо­мих електричних зарядів експерименталь­но встановив у 1875 році французький фізик Шарль Кулон. Сила  електро­магнітної взаємодії точкових нерухомих електричних зарядів прямо пропорційна до

добутку абсолютних значень зарядів і  й обернено пропорційна до квадрата

відстані rміж ними:



### Сила електростатичної взаємодії або сила кулонівської взаємодії

Силу електромагнітної взаємодії нерухо­мих електричних зарядівназивають *си­лою електростатичної взаємодії* або *силою кулонівської взаємодії.*

Ця сила напрямлена вздовж прямої, яка з'єднує заряди, і є силою притягання для різнойменних зарядів і силою відштовху­вання для однойменних зарядів. Вираз (34.2) показує, що закон електро­магнітної взаємодії нерухомих електрич­них зарядів збігається за формою із зако­ном гравітаційної взаємодії (14.1).

### Одиниця електричного заряду

*Електричний заряд у Міжнародній системі одиниць вимірюють у кулонах (Кл).* 1 ку­лон дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз про­відника за 1 секунду, коли сила струму становить 1 ампер:



Під час вимірювання електричного заряду в кулонах коефіцієнт пропорційності *k* в законі Кулона дорівнює:



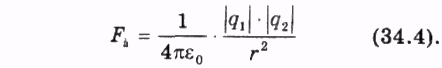
### Електрична стала

Замість коефіцієнта *k* у формулах і розра­хунках часто використовують коефіцієнт  , який називають *електричною сталою.* Електрична стала пов'язана з коефіцієнтом *k* виразом:





З (34.2) і (34.3) випливає:



## [§35. Електричне поле](" \l "Зміст)

### Далекодія

Після виявлення факту взаємодії електрич­них зарядів постає питання про механізм цієї взаємодії. Першу можливу відповідь на це питання дала *теорія далекодії.* Відповідно до цієї теорії електричні заряди мають здатність миттєво діяти один на од­ного на будь-якій відстані.

### Близькодія. Електричне поле

Іншу можливу відповідь дала *теорія близь­кодії,* створена на основі експерименталь­них досліджень, які здійснив англійський фізик Майкл Фарадей. Згідно з уявлення­ми теорії близькодії електричні заряди не здатні безпосередньо діяти один на одного. Але кожний електричний заряд створює навколо себе *електричне поле,* яке здатне діяти на інші електричні заряди. Елект­ричне поле поширюється в усьому просторі навколо електричних зарядів до нескінчен­ності.

У процесі прискореного руху електричного заряду електричне поле навколо нього змінюється, але ці зміни поширюються в просторі з кінцевою швидкістю. Тверджен­ня про кінцеву швидкість поширення змін електричного поля в просторі є основною відмінністю теорії близькодії й теорії дале­кодії.

Відкриття радіохвиль стало доказом пра­вильності теорії близькодії й помилковості теорії далекодії.

Швидкість поширення змін в електрично­му полі — швидкість електромагнітної хви­лі — виявилася кінцевою й дорівнює при­близно 300 000 км/с.

### Електромагнітне поле. Електростатичне поле

Доказ правильності теорії близькодії є основою для розгляду всіх взаємодій електричних зарядів на основі викорис­тання уявлень про існування *електро­магнітного поля* як джерела впливу на електричні заряди. У випадку взаємодії нерухомих електричних зарядів електро­магнітне поле називають *електроста­тичним полем.*

За законом Кулона (34.2) на позитивний електричний заряд , що перебуває на

відстані r від позитивного заряду *q2,* діє кулонівська сила:

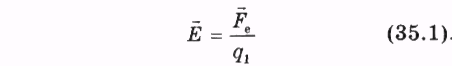


Згідно з уявленнями теорії близькодії ця силає силою дії електростатичного поля зарядуна електричний зарядНа за­ряд діє рівна за модулем сила з боку електричного поля заряду Електричне поле одного електричного заря­ду діє на будь-які інші електричні заряди, але не діє на електричні поля цих зарядів.

### Напруженість електричного поля

Для характеристики здатності електричного поля діяти на електричні заряди в одній  
точці простору використовують фізичну ве­личину, яку називають *напруженістю  
електричного поля.*

Напруженістю  електричного поля в даній точці простору називають величину, що дорівнює відношенню сили, яка діє на точковий позитивний заряд, до значення цього заряду



Напруженість електричного поля— ве­личина векторна, напрям вектора напруже­ностівказує напрям дії кулонівської си­ли на позитивний електричний заряд, уміщений у даній точці поля. Використовуючи визначення напруженості електричного поля (35.1) і закон Кулона (34.2), можна одержати формулу для об­числення напруженості на довільній відстані г від електричного заряду *q.* Уяві­мо, що в точку на відстані rвід заряду *q* вміщено зарядНа зарядз боку елек­тричного поля заряду *q* діє сила згідно з (35.1) вона дорівнює:



За законом Кулона (34.2) ця сила дорівнює:



З (35.2) і (35.3) одержуємо формулу для об­числення модуля напруженості електрич­ного поля *Е* на відстані г від точкового електричного заряду *q:*



### Принцип суперпозиції

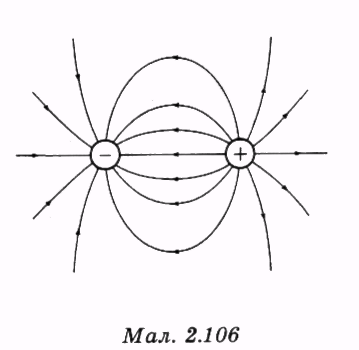
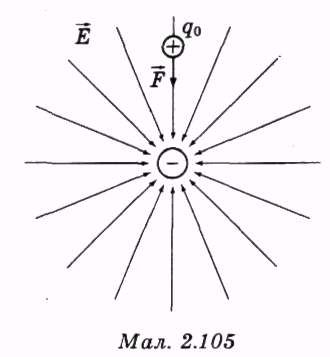
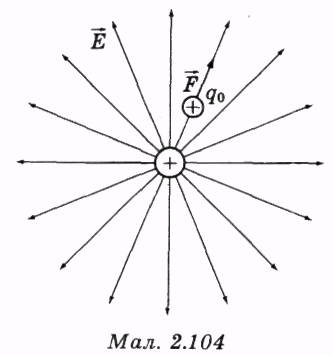
Якщо є декілька точкових електричних за­рядів, то вектор напруженостіелектрич­ного поля в будь-якій точці простору зна­ходять як суму векторів напруженості  полів кожного з електричних зарядів у даній точці:



Цю властивість додавання електричних полів називають підпорядкуванням *прин­ципу суперпозиції.*

### Лінії напруженості електричного поля

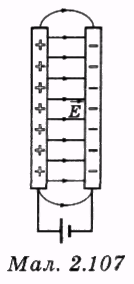
Наочне уявлення про розподіл електрично­го поля в просторі дає використання *ліній напруженості електричного поля.* Лінією напруженості електричного поля назива­ють лінію, у якої дотична в кожній її точці збігається з напрямом вектора напруже­ності електричного поля. На мал. 2.104 подано картину розподілу ліній напруженості електричного поля нав­коло поодинокого позитивного заряду, на мал. 2.105 — навколо поодинокого нега­тивного заряду, на мал. 2.106 — навколо системи з двох різнойменних зарядів.



### Однорідне поле

Якщо в кожній точці певного простору нап­руженість електричного поля однакова за модулем і напрямом, то електричне поле в цьому просторі називають *однорідним по­лем.* Лінії напруженості в однорідному електричному полі паралельні одна до од­ної. Приблизно однорідне електричне поле утворюється між двома паралельними ме­талевими пластинами з різнойменними електричними зарядами в тій частині про­стору, де відстань до краю значно більша за відстань між пластинами (мал. 2.107). Під час переміщення будь-якого тіла в по­лі сили тяжіння робота гравітаційних сил під час переміщення по будь-якій траєк­торії дорівнює зміні потенціальної енергії тіла в гравітаційному полі, узятому з про­тилежним знаком (23.2). Так само робота *А* електричного поля під час переміщення електричного заряду *q* в електростатичному полі з точки 1 в точку 2 по будь-якій траєкторії дорівнює зміні по­тенціальної енергіїелектричного заряду *q* в електростатичному полі, узятій з проти­лежним знаком:





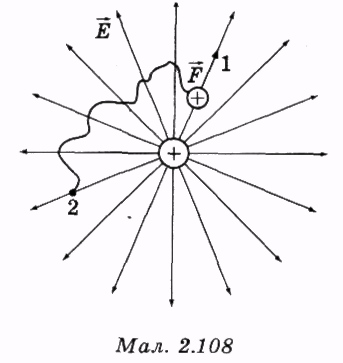
### Потенціал електричного поля

В одній і тій самій точці електричного по­ля потенціальна енергія різних електрич­них зарядів має різні значення. Оскільки сила дії електричного поля на заряд *q* про­порційна до заряду *q,* то й потенціальна енергія електричного заряду *q* про­порційна до його значення. Відношення по­тенціальної енергії заряду до його зна­чення *q* в одній і тій самій точці елект­ростатичного поля для будь-якого заряду однакове. Тому це відношення є енергетич­ною характеристикою даної точки елект­ростатичного поля. Це відношення 

називають *потенціалом електричного поля.* З (35.6) і (35.7) випливає:



Робота сил електричного поля під час переміщення електричного заряду з точки 1 в точку 2 електростатичного поля дорівнює добуткові заряду *q* на різницю потенціалів електростатичного поля в точці 1 і в точці 2 (мал. 2.108).



Потенціал – скалярна величина. Якщо є декілька електричних зарядів, то потенціал електричного поля в певній точці простору визначають як алгебраїчну суму потенціалів електричних полів кож­ного заряду в цій точці:



Так само, як і в гравітаційному полі, по­тенціальна енергія електричного заряду в електричному полі величина відносна, що залежить від вибору початку відліку, відповідно, відносним є і значення по­тенціалу електричного поля.

### Потенціал точкового електричного заряду

Звичайно для точкового електричного заря­ду значення потенціалу його електричного поля на нескінченно далекій відстані вва­жають рівним нулю. У цьому випадку потенціал електричного заряду *q* на відстані г від нього визначають виразом:



Потенціал позитивного заряду позитивний, негативного заряду — негативний. Хоч значення потенціалу в кожній точці електричного поля відносне, значення різниці потенціалів у двох точках поля має абсолютне значення й не залежить від ви­бору початку відліку потенціалу.

### Напруга

У процесі переміщення електричного заря­ду в будь-якому електричному полі сили електричного поля виконують роботу. Відношення роботи *А* сил електричного по­ля в процесі переміщення заряду *q* з однієї точки в іншу до величини заряду назива­ють *електричною напругою.* Електричну напругу позначають літерою *U:*



З виразів (35.8) і (35.11) випливає: *в електростатичному полі різниця потен­ціалів між двома точками дорівнює нап­рузі між ними:*

**

### Вольт

*Одиницю напруги й одиницю різниці по­тенціалів у Міжнародній системі одиниць називають вольт (В).* З (35.11) випливає:



Під час переміщення електричного заряду в 1 кулон між точками з різницею по­тенціалів 1 вольт сили електричного поля виконують роботу 1 джоуль. Для однорід­ного електричного поля можна встановити зв'язок між напругою *U* і напруженістю *Е* електричного поля. Якщо напруженість од­норідного електричного поля *Е,* то під час переміщення електричного заряду *q* за на­прямом вектора дії сили електричного поля  на відстань *d* його робота *А* дорівнює (мал. 2.109):

З виразу (35.11) та сама робота дорівнює:



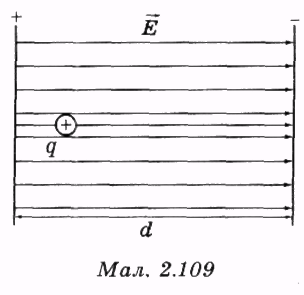


З (35.12) і (35.13) випливає:





З (35.15) можна зробити висновок, що нап­руженість електричного поля вимірюється у вольтах на метр (В/м).



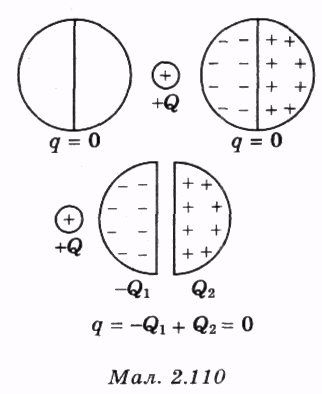
## [§36. Речовина в електричному полі](" \l "Зміст)

Будь-які тіла складаються з атомів. Атоми складаються з позитивно заряджених ядер і негативно заряджених електронів, які ут­ворюють електронні оболонки навколо ядер. Тому можна сподіватися, що під час переміщення в електричне поле будь-які електрично нейтральні тіла будуть зазнава­ти певної дії з боку електричного поля. Це припущення повністю підтверджують дос­ліди.

Усі рідкі й тверді речовини за характером дії на них електростатичного поля можна умовно поділити на два класи: *провідники та ізолятори.*

### Провідники та ізолятори

Дослід показує, що будь-який нейтральний металевий предмет, розміщений в елект­ричному полі, зазнає притягання як до по­зитивно, так і до негативно заряджених тіл. Під час розділення металевого тіла на дві частини в напрямі, перпендикулярному до ліній напруженості електричного поля, з'ясовується, що обидві ці частини виявля­ються електрично зарядженими, їхні заря­ди рівні за модулем і протилежні за зна­ком. Частина тіла, що розміщена ближче до позитивного заряду, який створює елек­тричне поле, набуває негативного заряду, протилежна частина заряджена позитивно (мал. 2.110).

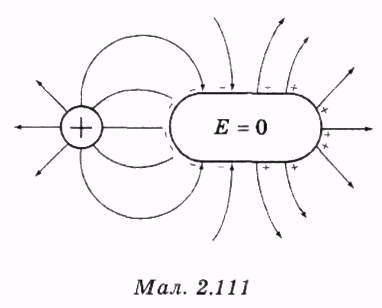


### Електростатична індукція. Провідники

Такий результат впливу електричного поля на металеві тіла називають *електроста­тичною індукцією.* Електростатичну індук­цію пояснюють наявністю в металах віль­них електронів, здатних переміщуватися всередині тіла під дією зовнішнього елек­тричного поля. Речовини, у яких є елек­трично заряджені частинки, що здатні вільно переміщуватися під дією зовнішньо­го електричного поля, називають *провідни­ками.*

### Електричне поле в провідниках

Під дією зовнішнього поля вільні заряди в провіднику переміщуються доти, доки електричне поле, що виникло в результаті перерозподілу зарядів, не компенсує дії зовнішнього електричного поля. *Напру­женість електричного поля всередині провідних тіл, уміщених в електричне по­ле, дорівнює нулю* (мал. 2.111).



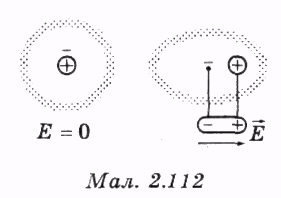
### Діелектрики. Ізолятори

Під час уміщення в електричне поле нейт­ральних тіл з таких матеріалів, як скло, ебоніт, також спостерігають їхнє притяган­ня як до позитивно заряджених, так і до негативно заряджених тіл, але значно слабше. Проте під час розділення таких тіл в електричному полі їхні частинки залишаються нейтральними, як і все тіло в цілому.

Отже, у таких тілах немає вільних елек­трично заряджених частинок, здатних пе­реміщуватися в тілі під дією зовнішнього електричного поля. Речовини, що не містять вільних електрично заряджених частинок, називають *ізоляторами* або *діелектриками.*

### Поляризація. Диполь

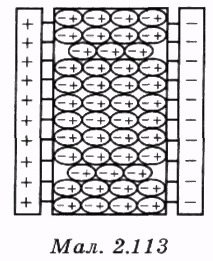
Притягання незаряджених тіл з діелект­риків до заряджених тіл пояснюють їхньою властивістю до *поляризації.* Поляризацією називають явище зміщення зв'язаних електричних зарядів усередині атомів, молекул або всередині кристалів під дією зовнішнього електричного поля. Найпростіший приклад поляризації — дія зовнішнього електричного поля на нейт­ральний атом. У зовнішньому електрично­му полі сила, що діє на негативно зарядже­ну оболонку, протилежно напрямлена до сили, що діє на позитивне ядро. Під дією цих сил електронна оболонка трохи зміщується відносно ядра й деформується. Атом у цілому залишається нейтральним, але центри позитивного й негативного заря­ду в ньому вже не збігаються (мал. 2.112).



Такий атом можна розглядати як систему з двох рівних за модулем точкових зарядів протилежного знака, яку називають *дипо­лем.*

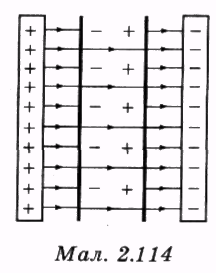
Під час розміщення пластини з діелектри­ка між двома металевими пластинами із за­рядами протилежного знака всі диполі в

діелектрику під дією зовнішнього елек­тричного поля обернені позитивними заря­дами до негативної пластини та негативни­ми зарядами до позитивно зарядженої пластини. Пластина діелектрика зали­шається в цілому нейтральною, але її по­верхні покриті протилежними за знаком зв'язаними зарядами (мал. 2.113).



### Електричне поле в діелектрику

Поляризаційні заряди на поверхні діелект­рика в електричному полі створюють елек­тричне поле, напрямлене протилежно до зовнішнього електричного поля (мал. 2.114). У результаті цього напруженість електричного поля в діелектрику змен­шується, але не дорівнює нулю.



Відношення модуля напруженостіелек­тричного поля у вакуумі до модуля напру­женості *Е* електричного поля в однорідно­му діелектрику називають діелектричною проникністюречовини:



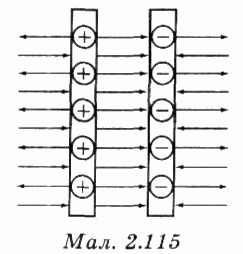
У випадку взаємодії двох точкових елект­ричних зарядів у середовищі з діелектрич­ною проникністюв результаті зменшення поля в  разів кулонівська сила також зменшується вразів:



### Конденсатори. Електроємність

Здатність діелектриків послаблювати зовні­шнє електричне поле застосовують у *кон­денсаторах.*

Конденсаторами називають електричні при­лади для нагромадження електричних за­рядів. Найпростіший конденсатор скла­дається з двох паралельних металевих плас­тин, розділених шаром діелектрика. Під час надання пластинам рівних за модулем і про­тилежних за знаком зарядівміж пластинами створюється електричне поле з напруженістю *Е.* Поза пластинами дія елек­тричних полів протилежно заряджених пла­стин взаємно компенсується, напруженість поля дорівнює нулю (мал. 2.115).



Напруга *U* між пластинами прямо про­порційна до заряду на одній пластині, тому відношення заряду *q* до напруги *U*

є для конденсатора сталою величиною при будь-яких значеннях заряду *q.* Це відно­шення *С* називають *електроємністю кон­денсатора.*



*Одиницю електроємності в СІ називають фарад (Ф).* Під час надання зарядів +1 кулон та -1 кулон обкладкам конденсатора електро­ємністю 1 фарад напруга між його обкладка­ми становить 1 вольт:



Електроємність 1 фарад — дуже велика електроємність. Більшість конденсаторів, які використовують на практиці, має знач­но менші значення електроємності. Менші одиниці електроємності мають наз­ви мікрофарад (мкФ), нанофарад (нФ) та пікофарад (пФ):



### Електроємність плоского конденсатора

Електроємність С конденсатора з двох плоских паралельних пластин з площею S кожна і відстанню *d* між пластинами дорівнює:



Під час розміщення між пластинами кон­денсатора шару діелектрика з діелектрич­ною проникністю є електроємність Конденсатора збільшується в  разів: 

Для надання обкладкам конденсатора різ­нойменних електричних зарядів необхідно виконати роботу проти сил електричного поля. Уявімо, що процес зарядження від­бувається шляхом поступового перенесення зарядів з однієї пластини на іншу. У цьому випадку напруга між пластинами лінійно зростає від 0 до І/, середнє значення напру­гидорівнює:

Повна робота *А* проти дії електричного по­ля під час перенесення заряду *q* дорівнює:



З (36.6) і (36.3) випливає:



Робота *А* дорівнює потенціальній енергії електричного поля в конденсаторі



### Енергія електричного поля

Потенціальна енергія електричного поля зарядженого конденсатора може перетво­рюватися на інші види енергії. Наприклад, під час підключення виводів зарядженого конденсатора до електричної лампи елект­ричне поле створює електричний струм, нитка лампи нагрівається й випромінює світло.

## [§37. Постійний струм](" \l "Зміст)

### Сила струму

Якщо з'єднати провідником виводи обкла­док конденсатора, то під дією електричного поля вільні електричні заряди в провідни­ку набувають упорядкованого руху — ви­никає електричний струм. За напрям елек­тричного струму беруть напрям руху пози­тивно заряджених частинок. Електричний струм характеризується *си­лою струму.*

Сила струму *І* дорівнює відношенню заряду  що переноситься через поперечний пе­реріз провідника за малий інтервал часу до цього інтервалу часу:



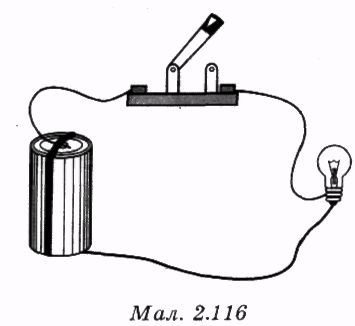
Одиниця сили струму *ампер,* визна­чається за магнітною взаємодією електрич­них струмів (див. §43).

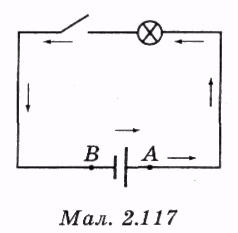
### Постійний струм

Електричний струм, що не змінюється з ча­сом, називають *постійним струмом.* Електричний струм, що виникає в провід­нику під час з'єднання двох різнойменно заряджених тіл або обкладок конденсатора зменшується поступово до нуля внаслідок нейтралізації різнойменних зарядів і зник­нення електричного поля. Для підтримання постійного струму в провіднику необхідно, щоб між його кінцями була постійна різни­ця потенціалів. Для цього використовують *джерела постійного струму.*

### Джерела постійного струму. Гальванічний елемент

Найпростіше джерело постійного струму — *гальванічний елемент.* Вимірювання за до­помогою вольтметра показують, що між електродами гальванічного елемента існує різниця потенціалів 1,5 В. Під час підклю­чення електричної лампи до виводів галь­ванічного елемента через нитку лампи про­ходить постійний електричний струм, лам­па світиться (мал. 2.116). Вольтметр пока­зує, що в процесі цього напруга на виводах елемента з часом не змінюється, амперметр показує, що сила струму в колі постійна. Якщо за кожний інтервал часуелект­ричний струм І переносить від позитивного електрода *А* через лампу до негативного електрода *В* заряда різниця потенціалів між ними не змінюється, то це означає, що всередині джерела струму за той самий часпереноситься точно такий самий зарядвід електрода *В* до електро­да А (мал. 2.117).





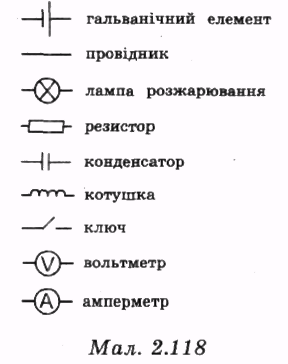
### Сторонні сили

Від А до В електричний заряд переміщу­ється під дією сил електричного поля. Від В до А в напрямі проти сил електричного поля перенесення заряджених частинок можливе тільки за рахунок сил неелектростатичної природи. Сили, що діють усере­дині джерел постійного струму, називають *сторонніми силами.* Сторонні сили в різних джерелах струму можуть мати різну фізичну природу. У гальванічному еле­менті перенесення електричних зарядів проти напряму дії сил електричного поля здійснюється внаслідок хімічних реакцій на межі зіткнення металевого електрода з рідким електролітом.

### Електричне коло

Джерело електричного струму в з'єднанні з іншими приладами утворює *електричне ко­ло.* Для того, щоб наочно уявити елект­ричні кола, використовують умовні позна­чення елементів електричних кіл, подані на мал. 2.118.

Електричне коло, подане на мал. 2.116, з використанням умовних позначень зобра­жають за допомогою схеми на мал. 2.117.



### Електричний опір

Відношення напруги *U* на ділянці елект­ричного кола до сили струму I називають *електричним опором.* Електричний опір позначають символом *R:*



Одиницю електричного опору називають *ом* (Ом). Ділянка електричного кола має опір 1 Ом, якщо при напрузі на її кінцях 1 вольт сила струму дорівнює 1 ампер:



Дослід показує, що електричний опір *R* од­норідного провідника прямо пропорційний до його довжини *І* й обернено пропорційний до площі S поперечного перерізу:



### Питомий електричний опір

Коефіцієнту формулі (37.3) називають *питомим електричним опором.* Питомий опіррізних речовин різний і залежить від зовнішніх впливів на провідник. Напри­клад, питомий опір змінюється зі зміною температури речовини.

### Закон Ома для ділянки кола

З (37.2) випливає

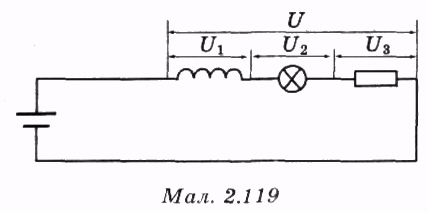


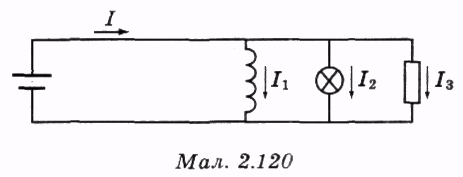
*Сила струму І прямо пропорційна до нап­руги U й обернено пропорційна до елект­ричного опору R ділянки кола.* Рівняння (37.4), що встановлює зв'язок між силою струму /, напругою *U* й електричним опором *R,* називають *законом Ома для ділянки кола.*

### Резистор

Для одержання потрібного значення сили струму в електричному колі постійного струму використовують прилади, які нази­вають *резисторами. Ї*х виготовляють із тонкого металевого дроту або графіту. Ос­новною характеристикою резистора є його електричний опір.

Елементи електричного кола можуть уми­катися послідовно або паралельно один до одного. На мал. 2.119 подано схему послі­довного вмикання електричної лампи, ко­тушки й резистора. На мал. 2.120 подано схему паралельного вмикання електричної лампи, котушки й резистора.





У процесі послідовного з'єднання через усі елементи електричного кола проходить од­наковий струм. Тому прилад для вимірю­вання сили струму, амперметр, завжди вмикається послідовно з тим елементом ко­ла, силу струму в якому треба виміряти. У процесі паралельного з'єднання на всіх елементах електричного кола напруга одна­кова. Тому прилад для вимірювання напру­ги, вольтметр, завжди вмикають паралель­но до елемента кола, на якому треба вимі­ряти напругу.

Під час послідовного з'єднання загальна напруга *U* дорівнює сумі напруг на послі­довно ввімкнених елементах, а сила струму І в усіх елементах однакова:



### Загальний опір послідовного кола

З (37.2) випливає, що *загальний опір R послідовного кола*

дорівнює сумі опорів послідовно ввімкне­них елементів кола:



### Загальний опір паралельного кола

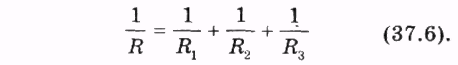
Під час паралельного з'єднання на всіх еле­ментах однакова прикладена напруга *U.* Сила струму в загальному колі при цьому дорівнює сумі значень сили струму в кож­ному з елементів:



Позначимо *R* загальний опір паралельного кола. Тоді за законом Ома для сили струму І в загальному колі одержимо:



З двох останніх рівнянь одержимо формулу для обчислення *загального опору R паралельного кола:*



### Робота струму

Під час проходження постійного струму І на ділянці кола з електричним опором *R* за інтервал часупереноситься електричний зарядщо дорівнює:



У процесі переміщення заряду *Aq* сили електричного поля виконують роботу *А*



Цю роботу називають *роботою струму.* Ро­боту струму вимірюють *у джоулях.* Резуль­татом роботи струму може бути, наприк­лад, нагрівання провідника з виділенням кількості теплоти *Q:*



З (37.7) випливає, що потужність струму *Р* дорівнює:



Потужність струму вимірюють у *ватах.*

### Внутрішній опір

Використовуючи як джерело постійного струму гальванічні елементи або акумуля­тори, легко виявити, що під час створення ними струму в зовнішньому колі відбу­вається нагрівання самих джерел струму. Отже, переміщення зарядів усередині дже­рела також супроводжується виконанням роботи струму. Кількість теплоти що

виділяється всередині джерела струму під час проходження струму І протягом часу  дорівнює:



де величину rназивають *внутрішнім, опо­ром джерела струму.*

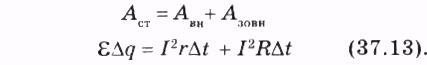
### Електрорушійна сила джерела струму

В електричному колі всі електричні заряди переміщуються по замкнених лініях. На зовнішній ділянці кола сили електричного поля виконують додатну роботу, на внутрішньому їхня робота має негативний знак, оскільки рух зарядів відбувається проти напряму дії електричних сил. У ре­зультаті під час переміщення заряду по будь-якій замкненій лінії робота сил елект­ростатичного поля дорівнює нулю. Проте й на внутрішній, і на зовнішній ділянках кола робота, що виконується еле­ктричним струмом, додатна і сума цих робіт не дорівнює нулю. Уся ця робота врешті-решт виконується за рахунок дії сторонніх сил, що створюють різницю потенціалів на виході джерела струму. Відношення роботи сторонніх сил  до величини переміщеного зарядуна­зивають *електрорушійною силою джерела струму* (ЕРС):

Виразимо роботу сторонніх силз пе­реміщення зарядупо замкненому колу через ЕРС:



Якщо до джерела струму з ЕРСі внут­рішнім опором г у зовнішньому колі під­ключене навантаження з електричним опо­ром *R,* то робота сторонніх силпід час переміщення електричного заряду  по всьому електричному колу до повернення в початкову точку дорівнює сумі роботи електричного струму на зовнішній і на внутрішній ділянці кола:



### Закон Ома для повного кола

Оскільки



з (37.13) випливає:

Рівняння (37.15) називають *законом Ома для повного кола.*

Сила струму *І* в електричному колі дорів­нює частці від ділення електрорушійної си­ли джерела струму  на суму електричних опорів *R* зовнішньої і rвнутрішньої діля­нок кола.

## [§38. Електричний струм у металах](" \l "Зміст)

Найкращими провідниками електричного струму є метали. Метали є провідниками і у твердому, і в рідкому станах. Під час прохо­дження електричного струму через металеві провідники їхня маса й хімічний склад не змінюються. Отже, атоми металів не перено­сять електричних зарядів. Дослідження природи електричного струму в металах по­казали, що перенесення електричних за­рядів у них здійснюють тільки електрони. Особливістю атомів усіх металів є мала кількість електронів на зовнішній елект­ронній оболонці. Коли атоми металів з'єднуються в кристал, зв'язок між атома­ми встановлюється шляхом об'єднання зовнішніх електронних оболонок. На­явність великої кількості вакантних місць на зовнішніх оболонках дозволяє електро­нам після об'єднання атомів у кристал вільно переходити від одного атома до іншого. У межах кристала валентні елект­рони металів можна розглядати як вільні заряджені частинки.

Експериментально виявлено, що питомий опір металів лінійно залежить від температури:

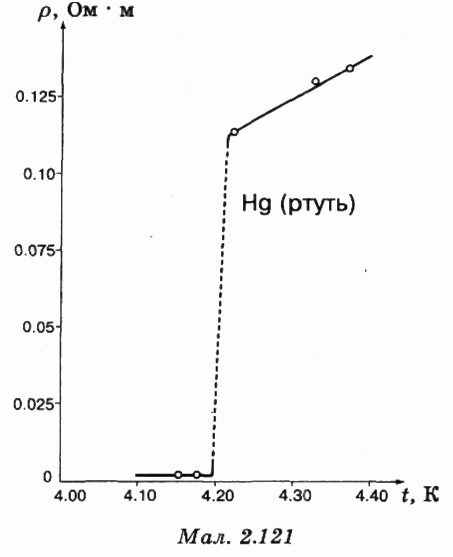


У рівнянні (38.І)— питомий електрич­ний опір при температурі — темпе­ратура провідника за шкалою Цельсія,— температурний коефіцієнт опору,— пито­мий електричний опір при температурі *t.*

Зростання питомого опору провідників з підвищенням температури пояснюють тим, що валентні електрони атомів металів мо­жуть вільно переходити з оболонки одного атома на оболонку іншого атома тільки на певних віддалях між центрами атомів, ко­ли їхні оболонки перекриваються. У ре­зультаті теплового руху атоми вкристалі коливаються відносно рівноважних поло­жень. Зміщення атомів від рівноважних положень порушує перекривання їхніх електронних оболонок і погіршує переходи електронів від атома до атома. Що більша температура кристала, то більша амплітуда теплових коливань атомів, більше пору­шень у розміщенні атомів у кристалі, більше перешкод для руху електронів. Коли температура металевого провідника наближається до абсолютного нуля, кількість дефектів у кристалічних ґратах, створюваних тепловим рухом атомів, на­ближається до нуля, тому й питомий опір провідника наближається до нуля.

### Надпровідність

Проте в деяких металів питомий електрич­ний опір падає до нуля при температурі вищій від абсолютного нуля. Це явище на­зивають *надпровідністю.* Наприклад, пито­мий опір ртуті дорівнює нулю, коли вона має температуру 4,2 К (мал. 2.121).



Під час створення електричного струму в кільці з надпровідника сила струму за­лишається незмінною необмежено довго, оскільки немає втрат на нагрівання про­відника.

Уже створено матеріали, що переходять у надпровідний стан при температурі 100 К



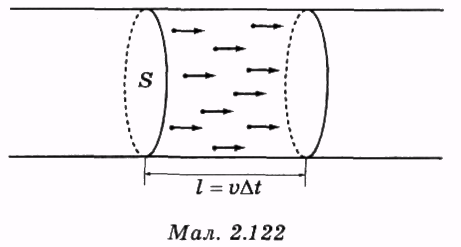
### Швидкість упорядкованого руху, електронів

Розглядаючи питання про природу елект­ричного струму в металах, треба розрізня­ти поняття швидкості поширення елект­ричного струму й швидкості упорядкова­ного руху заряджених частинок, які ство­рюють електричний струм. Оцінимо *швидкість упорядкованого руху* електронів під час виникнення електрично­го струму в провіднику. Будемо вважати, що кожен атом кристалічних ґрат віддає один валентний електрон у спільне во­лодіння всіх атомів кристала. Тоді концен­трація вільних електронів дорівнює кон­центрації *п* атомів у кристалі. Під час руху зі швидкістюупорядкованого руху через поперечний переріз провідника 5 за час пройдуть усі електрони, що містяться від цього перерізу до відстані (мал. 2.122). Їхнє загальне число дорів­нюєЦі електрони за часперенесуть електричний заряд  , що дорівнює



Сила струму І у провіднику дорівнює





З (38.3) середня швидкість упорядкованого руху електронів у металевому провіднику визначається формулою:

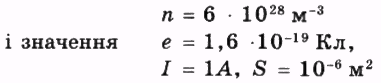


Оцінимо значення швидкості *v* для провід­ника з алюмінію площеюколи сила струму в ньому 1 А.

Знайдемо спочатку концентрацію *п* атомів Алюмінію у твердому стані. Для цього поділимо масу *т* алюмінію на масу одного атома Алюмініюі об'єм *V:*



Підставивши одержане значення



у (38.4), одержимо значення середньої швидкості  упорядкованого руху елек­тронів в алюмінієвому провіднику:



Якби з такою швидкістю поширювався електричний струм у провіднику, то елек­трична лампа, з'єднана з джерелом струму проводом завдовжки 1 метр загорялася б тільки через 104 секунд, тобто майже через З години після її підключення! Насправді в реальному житті спостерігаємо зовсім інше. Досліди показали, що під час використання будь-яких металевих провід­ників, електричний струм поширюється в них зі швидкістю, що дорівнює швидкості світла, близько 300 000 км/с. Тому, напри­клад, під час увімкнення ліхтарів вулично­го освітлення, не можна помітити оком запізнення засвічування ліхтарів, розміще­них далеко, порівняно з ліхтарями, роз­міщеними близько.

Поширення електричного струму в провід­никах зі швидкістю світла пояснюють тим, що в процесі з'єднання провідників із дже­релом різниці потенціалів у просторі навко­ло провідників поширюється електромаг­нітне поле, а потім це поле діє на вільні електрони й надає їм руху. Хоча швидкість упорядкованого руху електронів у провід­никах мала, усі електричні прилади спра­цьовують без будь-якого помітного запіз­нення, тому що завдяки великій швидкості поширення електромагнітного поля вздовж провідника вільні електричні заряди в ньо­му по всій довжині починають рухатися майже одночасно.

## [§39. Електричний струм у напівпровідниках](" \l "Зміст)

### Напівпровідники

У другій половині XX століття увагу фізи­ків привернули кристали, властивості яких помітно відрізнялися як від властивостей металів, так і від властивостей діелект­риків. Цей особливий тип кристалів назва­ли *напівпровідниками.* Напівпровідники проводять електричний струм, але значно гірше, ніж метали. Їхній питомий опір, на відміну від металів, з під­вищенням температури зменшується. Це зближує їх з діелектриками, у яких з під­вищенням температури питомий опір та­кож зменшується. Подальше вивчення вла­стивостей напівпровідників привело до ви­явлення в них низки чудових властивос­тей, які тепер використовують у різних напівпровідникових приладах. До напівпровідників належать кристали, у яких атоми пов'язані насиченими кова­лентними зв'язками. Прикладом напівпро­відникового кристала може бути кристал кремнію. Проте багато кристалів із кова­лентним зв'язком атомів є типовими діелектриками. Наприклад, алмаз має такі самі кристалічні ґрати, як і кремній, але його питомий опір при кімнатній темпера­турі в разів більший за питомий опір кремнію. Чим пояснити таку суттєву різницю властивостей цих кристалів? Почнемо з того, що й у тому, і в іншому кристалі ковалентні зв'язки між атомами насичені, тобто кожний з чотирьох валент­них електронів одного атома перебуває в спільному володінні двох атомів, які об'єд­нали свої валентні орбіти. Перебуваючи в спільному володінні двох атомів, жоден електрон не може вільно переміщуватися по кристалу, навіть якщо кристал перебу­ває в електричному полі. Кристали з кова­лентним зв'язком атомів повинні бути діелектриками і алмаз підтверджує пра­вильність такого очікування. Чому ж кристал кремнію проводить електричний струм?

Ковалентний зв'язок електронів з атомами в кристалах, як і кожен інший зв'язок, мо­же бути розірваний, якщо надати електро­ну достатню для цього енергію. **У** кристалі кремнію для розриву зв'язку з атомом ва­лентному електронові потрібна енергія близькоа в кристалі алмазу  При кімнатній температурі середня енергія тепло­вого руху атомів дорівнює близько Оскільки енергія тепло­вого руху між атомами розподіляється ви­падково, окремі атоми в кристалі кремнію час від часу набувають енергії, яка достат­ня для відривання електрона від атома. То­му в кристалі кремнію при кімнатній тем­пературі є невелика кількість вільних електронів. У процесі підвищення темпера­тури кількість звільнених за одиницю часу електронів збільшується. Це спричинюєть­ся до зменшення питомого опору кремнію. У кристалі алмазу енергія зв'язку валент­них електронів значно більша, ніж у крис­талі кремнію. Тому при кімнатній темпе­ратурі в ньому майже відсутні вільні елек­трони.

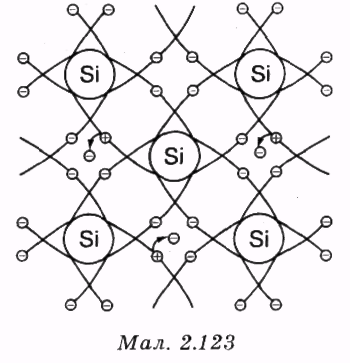
Умовно прийнято вважати ковалентні кри­стали з енергією зв'язку електронів не біль­шою, ніж 1,5-2 еВ — напівпровідниками, а з енергією зв'язку електронів більшою, ніж 2 еВ — діелектриками.

### «Дірка»

Під час розриву електроном зв'язку з атомом у напівпровідниковому кристалі в одного атома у валентній оболонці утво­рюється одне вільне місце (мал. 2.123). Це вільне місце одразу ж займає один із валентних електронів сусіднього атома, його місце займає інший валентний елек­трон і т.д.

Місце в кристалі з недостачею одного елек­трона вільно блукає по кристалу. Ця зміна місця з недостачею електрона під час спос­тереження ззовні має вигляд як пе­реміщення позитивно зарядженої частин­ки, хоч насправді позитивні йони крис­талічних ґрат при цьому не залишають своїх місць.

Для опису такого вільного руху електронів у кристалах використовують поняття "*дірки".* «Діркою» називають місце з недоста­чею одного електрона, яке переміщується в кристалі. Під час випадкової зустрічі електрона й «дірки» відбувається їхня ре­комбінація. Вакантне місце заміщується електроном, вільний електрон і «дірка» зникають.



Коли напівпровідниковий кристал розмі­щується в електричному полі, вільні елек­трони, рухаються від мінуса до плюса, а «дірки» — від плюса до мінуса.

### Власна провідність

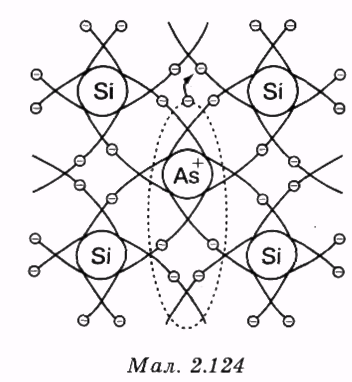
Напівпровідники, у яких електрони й «дірки» утворюються в процесі йонізації атомів, з яких побудований весь кристал, називають напівпровідниками з *власною провідністю.* У напівпровідниках з влас­ною провідністю концентрація вільних електронів дорівнює концентрації «дірок».

### Домішкова провідність

Для створення напівпровідникових при­ладів звичайно використовують кристали з *домішковою провідністю.* Такі кристали виготовляються за допомо­гою внесення в кристал із чотирьохвалентних атомів невеликої кількості домішок з атомів тривалентного або п'ятивалентного хімічного елемента.

### Електронна провідність. Напівпровідники n-типу

Якщо, наприклад, у кристал кремнію вне­сти невелику кількість атомів п'ятива­лентного Арсену, то кожний атом домішки встановлює ковалентні зв'язки з чотирма сусідніми атомами Силіцію. Для п'ятого валентного електрона атома Арсену немає місця в насичених валентних зв'язках і він змушений перейти на більш віддалену від атомного ядра електронну оболонку (мал. 2.124).



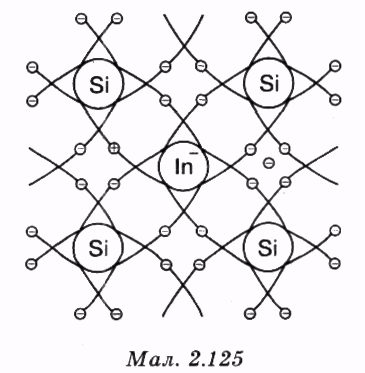
При цьому зв'язок його з ядром дуже по­слаблюється як через збільшення відстані до ядра, так і через екранувальну дію за­повненої валентної оболонки. Тому п'ятий валентний електрон атома домішки легко розриває зв'язок з атомом і стає вільним електроном. Позитивний йон Арсену, що за­лишився, не є «діркою», оскільки всі йо­го валентні зв'язки насичені й він не може забрати електрон в одного із сусідніх атомів. Тому в кристалах з домішками п'ятивалентних атомів електричний струм створюється переважно рухом вільних елек­тронів. Напівпровідники такого типу нази­вають напівпровідниками з *електронною провідністю* або *напівпровідниками п-типу (п* — від лат. negativus — негативний).

### Донорні домішки

Домішки, які забезечують утворення крис­тала з електронною провідністю, називають *донорними домішками* (від лат. donare — давати).

### Діркові напівпровідники. Напівпровідники р-типу

Якщо в кристал кремнію ввести невелику кількість атомів тривалентного Індію, то кожний атом Індію встановлює ковалент­ний зв'язок з трьома сусідніми атомами Силіцію. Для встановлення такого самого зв'язку з четвертим атомом Силіцію в ато­ма Індію немає валентного електрона, а ва­кантне місце для такого електрона є. Атом Індію просто захоплює валентний електрон в атома Силіцію й перетворюється на нега­тивний йон (мал. 2.125).



Атом Силіцію, що втратив один електрон, захоплює електрон у сусіднього атома Силіцію, — той у свого сусіда і т.д. - - по кристалу переміщується «дірка». Напівпровідники, у яких електричний струм створюється в основному рухом «дірок», називають *«дірковими» напівпро­відниками* або *провідниками р-типу (р* -від лат. positivus — позитивний).

### Акцепторні домішки

Домішки, що створюють діркову провід­ність у кристалі за рахунок захоплення ва­лентного електрона, називають *акцепторними домішками* (від лат. acceptor — той, хто приймає).

### Терморезистори. Фоторезистори

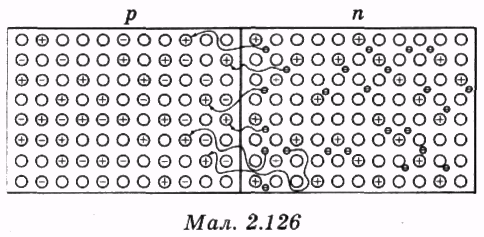
Концентрація електронів і «дірок» у до-мішкових напівпровідниках дуже зміню­ється під час зміни температури напів­провідникового кристала або під час його освітлення.

Напівпровідникові прилади, у яких вико­ристовується залежність електричного опо­ру напівпровідникових кристалів від тем­ператури, називають *терморезисторами,* від освітлення — *фоторезисторами.* Справжня революція в сучасній техніці зв'язку, обчислювальній техніці, техніці автоматичного керування відбулася завдя­ки винайденню напівпровідникового при­ладу *транзистора.*

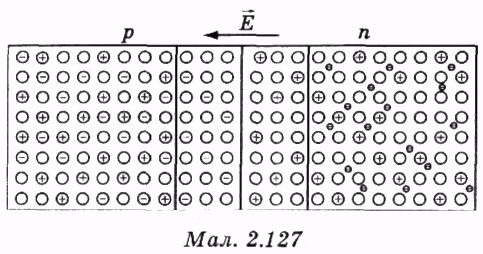
Щоб зрозуміти принцип дії транзистора, розглянемо спочатку, як працює прості­ший прилад — *напівпровідниковий діод.*

### Напівпровідниковий діод

Основною частиною напівпровідникового діода є напівпровідниковий кристал, у яко­му область з електронною провідністю пе­ребуває в контакті з областю із дірковою провідністю. Як тільки області з електрон­ною й дірковою провідностями контакту­ють одна з одною, починається дифузія електронів з кристала n-типу в кристал р-типу. У дірковому кристалі поблизу межі поділу електрони зустрічаються з «дірка­ми» й рекомбінують (мал. 2.126).



У результаті відходу частини вільних елек­тронів з кристала n-типу в ньому виникає область із нескомпенсованим електричним зарядом позитивних йонів. У кристалі р-типу в результаті рекомбінації частини «дірок» виникає область із нескомпенсова­ним електричним зарядом негативних йонів. Різниця потенціалів між цими двома областями досягає 0,3-0,6 В (мал. 2.127).



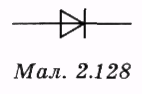
Електричне поле між цими двома областя­ми перешкоджає подальшим переходам електронів із n-напівпровідника в р-напівпровідник.

### Перехід *р-n* типу

Межу поділу провідників *р*-типу й *n*-типу називають *р-п переходом.* У процесі подачі напруги на *р-п* перехід по­зитивним знаком на *р*-напівпровідник і не­гативним знаком на *n*-напівпровідник зов­нішнє електричне поле буде направлене проти внутрішнього електричного поля *р-п* переходу. Якщо прикладена напруга вища за внутрішню напругу на *р-п* переході, то електрони можуть подолати *р-п* перехід і в колі діода тече електричний струм. Таке вмикання діода називають прямим вмикан­ням, і струм, що протікає, називають пря­мим струмом.

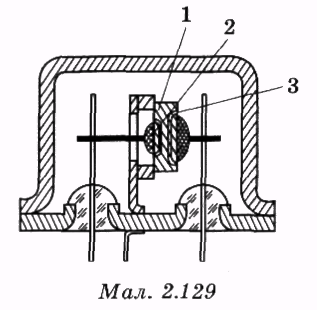
У процесі подачі зовнішньої напруги зна­ком мінус на р-напівпровідник і знаком плюс на n-напівпровідник електрони й «дірки» відтягуються зовнішнім елект­ричним полем від *р-п* переходу, між *р-* і n-напівпровідниковими областями крис­тала розширюється шар, позбавлений вільних носіїв заряду, тобто шар діелект­рика. Струм через діод практично не тече. Таке вмикання діода називають зворот­ним вмиканням і струм діода — зворот­ним струмом.

Зворотний струм напівпровідникового діо­да не дорівнює нулю, тому що в домішко-вому n-напівпровіднику завжди є певна кількість «дірок», а в р-напівпровіднику — електронів власної провідності. Для цих носіїв заряду під час зворотного вмикання діода *р-п* перехід виявляється відкритим. Таким чином, *р-п* перехід має властивість односторонньої провідності. Він пропускає електричний струм при одній полярності вмикання напруги й не пропускає струм при протилежній полярності вмикання. Властивість односторонньої провідності діода використовують для випрямлення змінного струму. Умовне позначення діода показано на мал. 2.128.

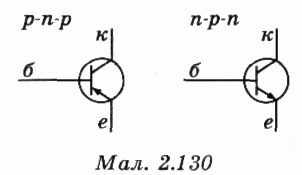


### Транзистор

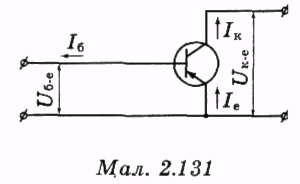
*Транзистор* є напівпровідниковим прила­дом, у якому дві області напівпровіднико­вого кристала р-типу поділені тонким ша­ром кристала n-типу (або дві області крис­тала n-типу поділені шаром кристала р-ти­пу). На межах поділу кристалів з різним типом провідності наявні два *р-п* переходи. Область кристала між двома *р-п* перехода­ми називають *базою* 1, а зовнішні частини кристала називають *емітером* 2 і *колекто­ром* 3 (мал. 2.129).



Умовні позначення транзисторів *р-п-р* і *п-р-п* типу подано на мал. 2.130.



Найуживанішою схемою вмикання транзи­стора в електричне коло є схема вмикання зі спільним емітером (мал. 2.131).



Під час вмикання транзистора *р-п-р* типу за схемою зі спільним емітером напруга від джерела постійного струму подається знаком плюс на емітер, знаком мінус на колектор. При такому вмиканні колектор­ний *р-п* перехід закритий і струм у колі емітер-колектор майже дорівнює нулю. У процесі подачі невеликої напруги на *р-п* перехід база-емітер знаком мінус на базу емітерний перехід відкривається і з еміте­ра в базу входять «дірки», створюючи струм емітераЧастина «дірок» у базі рекомбінує з електронами бази, у результаті чого виникає невеликий струм бази Оскільки товщина бази дуже мала, більшість «дірок» досягає колекторного *р-п* переходу. Для «дірок» цей перехід відкри­тий і вони безперешкодно проходять у ко­лектор, створюючи колекторний струм Під час змін напруги на *р-п* переході емітер-база змінюються всі види струму:

 , але відношення між ними залиша­ються незмінними:





Тому транзистор можна розглядати як при­лад, що здійснює поділ струму емітерана струми колектораі базиу постійному відношенні. Цю властивість транзистора використовують для посилення електрич­них сигналів, для керування великими струмами і напругами за допомогою малих струмів і напруг. Відношення струму ко­лекторадо струму базиу транзисторів може досягати значень до 100 - 500. Отже, змінюючи слабкий струм бази, можна одер­жати в колі колектора в сотні разів більші зміни струму.

У наш час транзистори є одним з основних «будівельних матеріалів» електричних кіл радіоприймачів, телевізорів, різноманітних приладів автоматичного керування. Один мікропроцесор комп'ютера на кристалі кремнію з площею, яка менша за один квадратний сантиметр, містить кілька со­тень тисяч транзисторів мікроскопічних розмірів.

## [§40. Електричний струм в електролітах](" \l "Зміст)

### Електроліти

Провідниками електричного струму є не тільки метали й напівпровідники. Елек­тричний струм проводять розчини багатьох речовин у воді. Як показує дослід, чиста вода не проводить електричний струм, тобто в ній немає вільних носіїв електрич­них зарядів. Електричний струм не прово­дять кристали кухонної солі, натрій хлори­ду. Проте розчин натрій хлориду є гарним провідником електричного струму. Розчи­ни солей, кислот і основ, здатні проводити електричний струм, називають *елект­ролітами.*

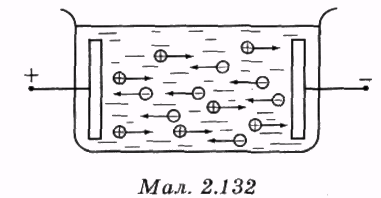
Проходження електричного струму через електроліти обов'язково супроводжується виділенням речовини у твердому або газо­подібному стані на поверхні електродів. Виділення речовини на електродах пока­зує, що в електролітах електричні заряди переносять заряджені атоми речовини — *йони.*

### Закон електролізу. Електрохімічний еквівалент речовини

М. Фарадей, спираючись на висновки екс­периментів з різними електролітами, уста­новив, що в процесі електролізу маса *т* ре­човини, що виділилася на електроді, про­порційна до зарядуякий пройшов через електроліт, або до сили струму *І* і часу проходження струму:



Рівняння (40.1) називають *законом елек­тролізу,* коефіцієнт *k,* що залежить від ре­човини, яка виділилася, називають *елек­трохімічним еквівалентом речовини.* Провідність рідких електролітів поясню­ють тим, що під час розчинення у воді ней­тральні молекули солей, кислот і основ розпадаються на негативні й позитивні йони. В електричному полі йони почина­ють рухатися й створюють електричний струм (мал. 2.132).



Існують не тільки рідкі, але й тверді елек­троліти. Прикладом твердого електроліту може бути скло. У складі скла наявні по­зитивні й негативні йони. У твердому стані скло не проводить електричний струм, оскільки йони не можуть рухатися у твер­дому тілі. Коли скло нагрівається, йони мають змогу переміщатися під дією елек­тричного поля і скло стає провідником. Явище електролізу застосовують на прак­тиці для одержання багатьох металів з розчину солей. За допомогою електролізу для захисту від окислення або для прикра­шання покривають різні предмети й деталі машин тонким шаром таких металів, як хром, нікель, срібло, золото.

## [§41. Електричний струм у газах](" \l "Зміст)

Якщо всі атоми речовини в газоподібному стані нейтральні, то такий газ не проводить електричного струму. Газ може стати провідником електричного струму, якщо в результаті якогось процесу частина його атомів йонізується та з'являться позитивні і негативні йони.

### Термічна йонізація

Один з можливих способів йонізації атомів газу — *термічна йонізація.* Термічною йонізацією називають процес йонізації атомів газу за рахунок кінетичної енергії їхнього теплового руху в результаті взаєм­них зіткнень. Для термічної йонізації кінетична енергія теплового руху атома повинна перевищувати енергію зв'язку електрона.

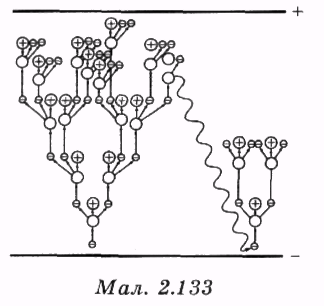
Значення температури, при якій почи­нається термічна йонізація газу, для різ­них газів різні, оскільки різні значення енергії зв'язку електронів у різних атомах. Проте для всіх газів ці значення досить ви­сокі, не менше, ніж декілька тисяч кельвінів.

### Плазма

Якщо температура газу дуже висока, то більшість атомів газу стають йонізованими, газ перетворюється на суміш позитивних йонів і електронів. Газ у йонізованому ста­ні називають *плазмою.* Плазма є гарним провідником електричного струму. Водень у сонячній атмосфері при темпера­турі 6 000 К перебуває в плазмовому стані. У плазмовому стані перебуває газ і в над­рах звичайних зірок.

### Йонізація електронним ударом

За низької температури газ може стати провідником електричного струму, якщо напруженість електричного поля в газі пе­ревищить певне порогове значення. По ро­гове значення напруженості електричного поля *Е* визначається умовою, що один вільний електрон під дією електричного по­ля набуває на довжині вільного пробігу кінетичної енергії, необхідної для йонізації атома. Далі два електрони знову розганя­ються електричним полем та йонізують два атоми, потім чотири електрони розганя­ються електричним полем і т.д. — процес наростає лавиноподібно (мал. 2.133). Цей процес утворення вільних електронів і позитивних йонів називають *йонізацією елек­тронним ударом.* У кінцевому результаті всі електрони, що виникли під час цього процесу, досягнуть позитивного електрода, позитивні йони прийдуть до негативного електрода.



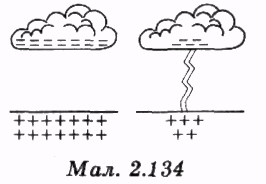
### Самостійний електричний розряд

Якщо фотони або позитивні йони під час зіткнення з катодом звільняють нові елек­трони, лавиноподібний розвиток процесу йонізації газу триває безперервно. Такий процес називають *самостійним електрич­ним розрядом.*

У процесі самостійного електричного розря­ду відбувається не тільки йонізація, але й збудження атомів газу. Цю властивість електричного розряду використовують для створення газорозрядних джерел світла (лампи «денного світла»), світлових реклам.

### Блискавка

Одним з видів самостійного електричного розряду є електричний розряд між грозо­вою хмарою і землею — *блискавка.* Сила струму в блискавці може досягати 20 000 ампер, проте струм блискавки проходить за дуже короткий час, приблизно за Електричний розряд блискавки швидко припиняється тому, що всі нагромаджені в хмарі електричні заряди при великій силі струму переходять на землю за короткий час (мал. 2.134).



### Дуговий розряд

Електричний розряд з великою силою струму, під час якого відбувається нагрівання катода до такої високої темпе­ратури, що відбувається термоелектронна емісія електронів з нього, називають *дуго­вим розрядом.* Дуговий розряд використо­вують у печах для виплавлення й для зва­рювання металів.

## [§42. Електричний струм у вакуумі](" \l "Зміст)

Електричний струм може проходити не тільки у твердих тілах, рідинах і газах, але й у вакуумі. Умови для проходження елек­тричного струму у вакуумі найпростіші -необхідні лише вільні носії електричного заряду й електричне поле.

### Електровакуумні прилади

Прилади, дія яких ґрунтується на викори­станні електричного струму у вакуумі, на­зивають *електровакуумними приладами.*

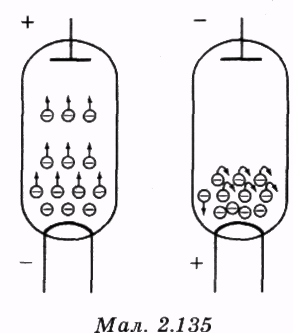
### Катод. Анод. Термоелектронна емісія

Найпростіший електровакуумний прилад — вакуумний діод. Вакуумний діод склада­ється зі скляного балона, з якого викачане повітря, і двох електродів усередині цього балона. Один електрод називають *катодом*, інший — *анодом.*

Катод являє собою тонку металеву спіраль, кінці якої прикріплені на двох металевих стрижнях, кінці стрижнів виведені на­зовні. На ці два стрижні подається напруга і через катод проходить електричний струм. Катод нагрівається цим струмом до такої високої температури, що з його по­верхні вилітають вільні електрони. Це яви­ще називають *термоелектронною емісією.* Анод являє собою металеву пластину, розміщену навпроти катода. Анод також має вивід через скляну стінку діода для підключення до джерела напруги.

### Одностороння провідність

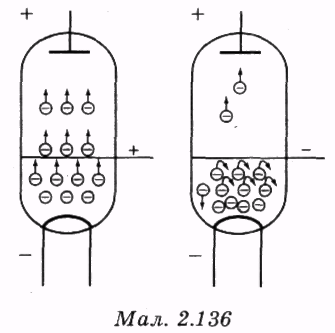
Основна властивість діода, яку використо­вують на практиці, це його *одностороння провідність.* У процесі вмикання діода в електричне коло плюсом на анод і мінусом на катод, електрони, які випромінює ка­тод, прискорюються прикладеним електричним полем і створюють електричний струм у вакуумі (мал. 2.135).



Під час подачі на катод позитивного знака напруги, а на анод негативного знака, випромінені катодом електрони не можуть досягнути анода, оскільки електричне поле діє на них у протилежному напрямі. Інших вільних носіїв електричного заряду у ваку­умі немає, немає й електричного струму че­рез діод. Односторонню провідність діода використовують на практиці для випрям­лення змінного струму.

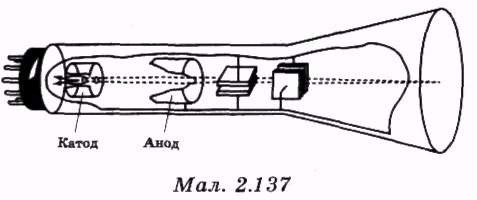
### Вакуумний тріод

Електровакуумний прилад, у якому між катодом і анодом уміщується третій елект­род, називають *вакуумним тріодом.* Третій електрод, який називають сіткою, дозволяє керувати потоком електронів, що летять від катода до анода. Подача позитивного (відносно катода) знака напруги на сітку полегшує вихід електронів з катода і збільшує силу струму через тріод. Негатив­ний знак напруги на сітці «замикає» тріод, перешкоджає проходженню електронів від катода до анода (мал. 2.136).



### Електронно-променева трубка

Електронно-променева трубка електрон­ного осцилографа, телевізора, дисплея комп'ютера влаштована приблизно таким самим чином, як і вакуумний тріод. Особливістю її будови є використання ано­да з невеликим отвором у центрі. Між ка­тодом і анодом у телевізійній трубці при­кладають високу напругу (мал. 2.137).



### Екран. Електронний промінь

Електрони під дією електричного поля на шляху від катода до анода набувають вели­кої швидкості. Досягнувши анода, значна кількість з них пролітає через отвір в аноді й рухається далі за інерцією, поки не зіткнеться з *екраном.* Вузький пучок елек­тронів, які вилітають з отвору в аноді, на­зивають *електронним променем.* Удари швидких електронів викликають світіння кристалів, якими вкрита внутрішня по­верхня екрана трубки. Діючи електрични­ми або магнітними полями, можна керува­ти рухом електронного променя, змушуючи його «малювати» будь-які зображення, пи­сати будь-якою мовою.

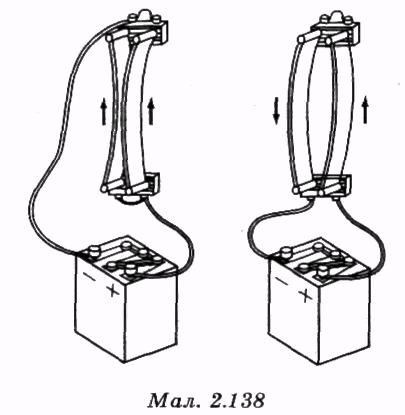
## [§43. Магнітна взаємодія струмів](" \l "Зміст)

Під час опису взаємодії електричних за­рядів за допомогою закону Кулона (34.2) було зроблене одне важливе застереження: закон Кулона описує взаємодію *нерухомих* зарядів.

Що означає це застереження? Що заряди перестають притягатися або відштовхува­тись під час руху? Як може залежати взаємодія електричних зарядів від стану спокою або руху, якщо рух тіл відносний?

### Електродинамічна взаємодія

Обмеженість області застосування закону Кулона для опису взаємодії електричних зарядів експериментально виявив французький фізик А. Ампер у 1820 році. Ам­пер установив, що під час проходження електричного струму через два паралель­них провідники в одному напрямі між провідниками виникає сила притягання, під час протилежного напряму струмів провідники відштовхуються (мал. 2.138). Явище взаємодії струмів називають *елект­родинамічною взаємодією****.***

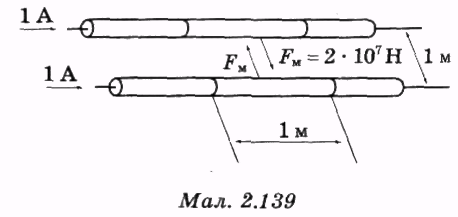


### Магнітна взаємодія

Провідник, по якому проходить електрич­ний струм, залишається в цілому нейтраль­ним, оскільки сумарний негативний заряд електронів дорівнює за абсолютною вели­чиною зарядові позитивних йонів. Отже, сила кулонівської взаємодії між провідни­ками дорівнює нулю. Той факт, що провідники зі струмом здатні притягувати­ся або відштовхуватися, свідчить, що під час руху зарядів їхня взаємодія повністю не описується законом Кулона. Взаємодію електричних зарядів, що виникає додатко­во до кулонівської взаємодії під час їхньо­го руху, назвали *магнітною взаємодією.* Магнітна взаємодія рухомих електричних зарядів виявилася найуніверсальнішим явищем, яке постійно супроводжує будь-який електричний струм у будь-якому сере­довищі. Тому для визначення сили струму вибрали явище магнітної взаємодії струмів.

### Ампер

*Одиниця сили струму в Міжнародній сис­темі — ампер (А)* — це сила незмінювано­го струму, який, проходячи по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини й нескінченно мало­го кругового перерізу, розміщених на відстані 1 метр один від одного у вакуумі, викликав би між цими провідниками силу магнітної взаємодії, що дорівнює на кожний метр довжини (мал. 2.139).



### Магнітне поле

Для опису магнітної взаємодії електричних зарядів уводять поняття *магнітного поля* так само, як для опису електростатичної взаємодії було введене поняття електрично­го поля.

Кожний рухомий заряд створює навколо се­бе магнітне поле. Магнітне поле діє на будь-який інший рухомий електричний заряд.

### Сила Лоренца

Дослідження закономірностей дії магнітно­го поля на рухомі електричні заряди пока­зало, що сила, яка діє на рухомий елект­ричний заряд з боку магнітного поля, пропорційна до заряду *q,* до швидкості його руху й залежить від напряму вектора швидкості. Напрям векторашвидкості руху заряду, при якому сила, яка діє з бо­ку магнітного поля, дорівнює нулю, бе­руть за напрям силових ліній магнітного поля. На частинку з електричним зарядом *q,* яка рухається зі швидкістю *v* під кутом  до силової лінії магнітного поля, діє з бо­ку магнітного поля силащо дорівнює:



Цю силу називають *силою Лоренца.* Вектор індукції магнітного поля

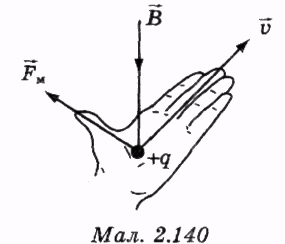
Векторну величину у (43.1) називають *вектором індукції, магнітного поля.* Вектор індукції магнітного поля є силовою харак­теристикою магнітного поля в даній точці поля. Напрям вектора індукції збігається з прямою, під час руху вздовж якої елект­ричні заряди не зазнають ніякої дії з боку магнітного поля.

### Тесла

*Одиницю індукції магнітного поля в Міжнарод­ній системі одиниць називають тесла (Тл).* У магнітному полі з індукцією 1 тесла на точковий електричний заряд 1 кулон, що рухається зі швидкістю 1 метр за секунду перпендикулярно до вектора магнітної індукції, діє з боку магнітного поля сила 1 ньютон. З формули (43.1)випливає:



Напрям вектора сили Лоренца визна­чається правилом лівої руки. Поставимо ліву руку таким чином, щоб вектор індукціївходив у неї перпендикулярно до долоні (мал. 2.140). Розпрямимо чотири пальці руки й направимо вздовж вектора швидкості  руху позитивного заряду *q.* Тоді відігнутий під прямим кутом у пло­щині долоні великий палець укаже напрям вектора сили Лоренца. Для негативного заряду напрям вектора буде протилежний.



### Сила Ампера

Визначимо силу  яка діє з боку од­норідного магнітного поля з індукцією на прямолінійний провідник зі струмом *І* завдовжки *І* під час розміщення провідни­ка під кутомдо вектора індукції

Якщо швидкість упорядкованого руху за­рядів у провіднику *v,* то за час через провідникпроходить електричнийзаряд

Підставивши знайдене значення електрич­ного заряду *q* у формулу (43.1), одержимо:



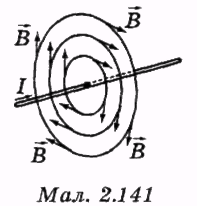


Силу, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, називають *силою Ампера.* Сила Ампера, що діє на прямий провід­ник у магнітному полі, дорівнює добуткові сили струму *І* у провіднику на модуль індукції *В* магнітного поля, довжину / провідника й синус кутаміж провідни­ком і вектороміндукції. З рівняння (43.2) випливає, що одиницю вимірювання індукції магнітного поля *тес­ла* можна визначити як індукцію такого однорідного поля, у якому на прямий провідник зі струмом 1 ампер завдовжки 1 метр, розміщений перпендикулярно до вектораіндукціїдіє сила Ампераяка дорівнює 1 ньютону:

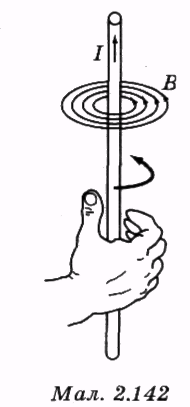


### Лінія магнітної індукції

Лінію, дотична до якої в будь-якій точці збігається з вектором індукціїмагнітно­го поля, називають *лінією магнітної індукції.* Досліди показали, що лінії маг­нітної індукції навколо прямого провідни­ка зі струмом є колами з центром на осі провідника. Площини цих кіл перпендику­лярні до провідника (мал. 2.141).



Напрями векторів індукції, напрямлених по дотичній до цих ліній, визначаються за таким правилом: якщо дивитися вздовж провідника за напрямом струму, тобто вздовж руху позитивних зарядів, то векто­ри магнітної індукції напрямлені по дотич­них до ліній індукції у напрямі за годинни­ковою стрілкою. Інший спосіб визначення напряму магнітного поля прямого струму пояснює мал. 2.142.



Дослід показує, що індукція *В* магнітного поля на відстані *R* від нескінченно довгого прямого провідника зі струмом / дорівнює:



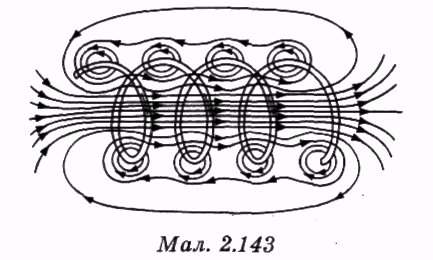


### Однорідне магнітне поле

Якщо в кожній точці певного простору век­тор магнітної індукції має однаковий напрям і модуль, магнітне поле в цьому просторі називають *однорідним магнітним полем.* Приблизно однорідне магнітне поле створюється електричним струмом усере­дині довгої циліндричної котушки соленоїда (мал. 2.143).

Розглянемо рух частинки масою *т* і елект­ричним зарядом *q* в однорідному магнітно­му полі з індукцією  Якщо вектор швидкості частинки напрямлений перпен­дикулярно до вектораіндукції магнітно­го поля, на частинку діє сила Лоренца

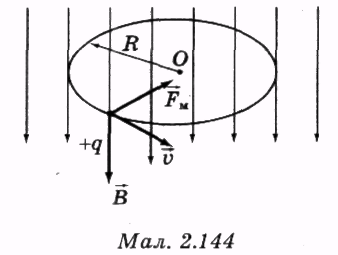




Вектор силинапрямлений перпендику­лярно до вектора  швидкості частинки, тому й вектор  прискорення частинки перпендикулярний до вектора швидкості:



Якщо рух відбувається у вакуумі й немає інших сил, заряджена частинка в однорідному магнітному полі при взаємній пер­пендикулярності векторіврухається по колу з постійною за модулем швидкістю  (мал. 2.144).



Радіус *R* кола можна знайти, визначивши доцентрове прискорення *а* на основі кіне­матики й прирівнявши його до значення з рівняння (43.5):



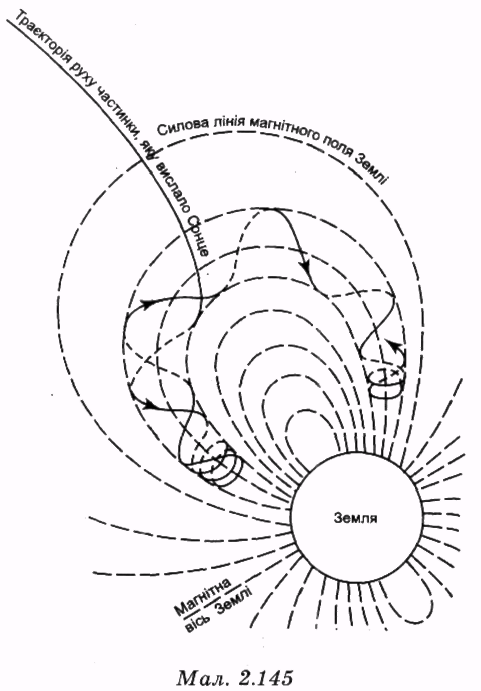


Рух частинок по колу в магнітному полі здійснюється в прискорювачах заряджених частинок. Період *Т* обертання частинки по колу дорівнює:



З рівнянь (43.6) і (43.7) випливає, що радіус *R* кола під час руху частинки в магнітному полі залежить від її швидкості *v,* а період *Т* обертання від швидкості не за­лежить.

Під час руху зарядженої частинки під ку­том до вектора  магнітної індукції її траєкторія стає спіраллю навколо ліній магнітної індукції. По таких траєкторіях рухаються електрони й протони, викинуті Сонцем, під час їхнього вторгнення в магнітне поле Землі (мал. 2.145). Підсумовуючи розгляд взаємодії рухомих електричних зарядів, необхідно звернути увагу на те, що магнітна взаємодія не є заміною кулонівської взаємодії нерухомих зарядів, а є доповненням до кулонівської взаємодії.



Це означає, що повна сила  електро­магнітної взаємодії рухомих електричних зарядів є векторною сумою сил кулонів­ської взаємодіїі магнітної взаємодії



## [§44. Речовина в магнітному полі](" \l "Зміст)

Електронні оболонки атомів можна умовно розглядати як такі, що складаються з коло­вих електричних струмів, утворених рухо­мими електронами. Колові електричні струми в атомах повинні створювати власні магнітні поля. На електричні струми має впливати зовнішнє магнітне поле, у резуль­таті чого можна очікувати або посилення магнітного поля під час співспрямованості атомних магнітних полів із зовнішнім магнітним полем, або їхнього послаблення, коли їхня напрямленість протилежна.

Гіпотеза про існування магнітних полів у атомах і можливість зміни магнітного поля в речовині повністю відповідає дійсності. Дослід показує, що речовини за дією на них зовнішнього магнітного поля можна поділити на три основні групи: діамагнети­ки, парамагнетики і феромагнетики.

### Діамагнетики

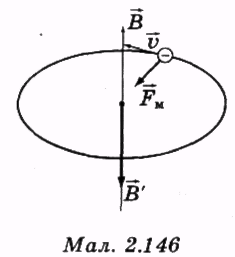
*Діамагнетиками* називають речовини, у яких зовнішнє магнітне поле послаб­люється. Це означає, що магнітні поля атомів таких речовин у зовнішньому магнітному полі напрямлені протилежно до зовнішнього магнітного поля.

### Магнітна проникність

Відношення індукції *В* магнітного поля в речовині до індукціїу вакуумі назива­ють магнітною проникністю і позначають літерою

Зміна магнітного поля навіть у найсильніших діамагнетиках становить лише соті частки відсотка. Наприклад, вісмут має магнітну проникність Щоб зрозуміти природу діамагнетизму, розглянемо рух вільного електрона, який влітає зі швидкістюв однорідне магніт­не поле перпендикулярно до вектора магнітного поля.

Під дією сили Лоренца електрон рухати­меться по колу, напрям його обертання визначається напрямом вектора сили Ло­ренца (мал. 2.146). Коловий струм, що з'явився, створює своє магнітне поле. Це магнітне поле  напрямлене протилежно до магнітного поляОтже, будь-яка речо­вина, що містить заряджені частинки, які вільно рухаються, повинна мати діамаг­нітні властивості.

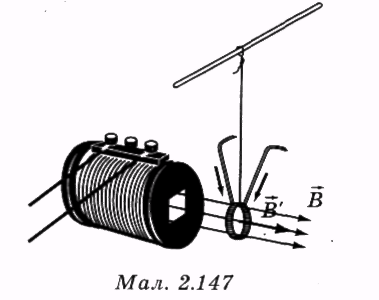


Хоч в атомах речовини електрони не віль­ні, зміна їхнього руху всередині атомів під дією зовнішнього магнітного поля вияв­ляється еквівалентною коловому руху вільних електронів. Тому будь-яка речови­на в магнітному полі обов'язково має діамагнітні властивості.

Проте діамагнітні ефекти дуже слабкі і їх виявляють тільки в речовин, атоми або мо­лекули яких не мають власних магнітних полів.

Якщо магнітні поля, створені всередині атомів електронами в результаті їхнього обертання навколо атомних ядер, не ком­пенсують одне одного і атом має магнітне поле, що не дорівнює нулю, то спос­терігаємо інше явище.

Дослід показує, що виток зі струмом під час розміщення в магнітному полі під дією сили Ампера повертається таким чином, що його магнітне полевиявляється на­прямленим так само, як зовнішнє поле (мал. 2.147).



### Парамагнетики

Речовини, у яких зовнішнє магнітне поле посилюється в результаті додавання з магнітними полями електронних оболонок атомів речовини через орієнтацію атомних магнітних полів у напрямі зовнішнього магнітного поля, називають *парамагнети­ками.* Парамагнетики дуже слабко посилю­ють зовнішнє магнітне поле. Магнітна про­никність парамагнетиків відрізняється від одиниці лише на частки відсотка. Напри­клад, магнітна проникність платини дорівнює 1,000 36. Через дуже малі значен­ня магнітної проникності парамагнетиків і діамагнетиків їхній вплив на зовнішнє по­ле або вплив зовнішнього поля на пара­магнітні або діамагнітні тіла дуже важко виявити. Тому у звичайній щоденній прак­тиці, у техніці парамагнітні й діамагнітні речовини розглядають як немагнітні, тобто речовини, які не змінюють магнітне поле й не відчувають дії з боку магнітного поля.

### Феромагнетики

Зовсім інші магнітні властивості мають ре­човини, які називають *феромагнетиками.* Феромагнетиками називають речовини, які значно посилюють зовнішнє магнітне поле. Магнітна проникність феромагнітних ма­теріалів може досягати значень у декілька сотень тисяч, тобто феромагнітні матеріали здатні посилювати зовнішнє магнітне поле в сотні тисяч разів.

Феромагнітні властивості мають залізо, нікель, кобальт і деякі сплави. Природа внутрішньоатомних магнітних полів, здатних орієнтуватися й упорядко­вуватися під дією зовнішнього магнітного поля, у феромагнетиків пов'язана не з ру­хом електронів навколо атомних ядер, а з внутрішніми магнітними полями самих електронів.

Дослідження властивостей елементарних частинок показало, що всі частинки, які мають електричні заряди, мають і власні магнітні поля. Заряджені частинки подібні до колових електричних струмів. Усі еле­ментарні частинки одного виду мають абсо­лютно однакові магнітні поля. Власне магнітне поле електрона значно сильніше від магнітного поля, яке створює електрон у процесі його руху навколо ядра. Тому фе­ромагнетики, у яких зовнішнє поле поси­люється завдяки складанню власних маг­нітних полів електронів, мають значно більшу магнітну проникність, ніж парамаг­нетики.

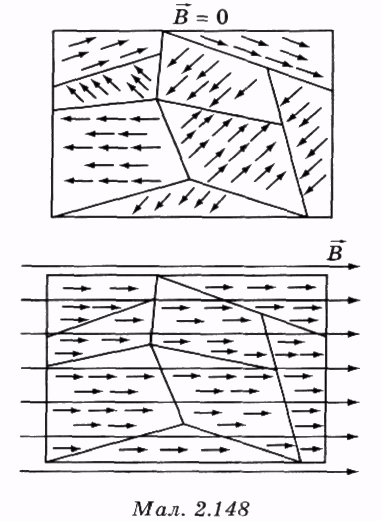
Щоб глибше зрозуміти природу феромагне­тизму, з'ясуємо ще одне питання. Якщо феромагнітні властивості зумовлені ДІЄЮ власних магнітних полів електронів, то чо­му ж цих властивостей не мають усі речо­вини? Адже електрони входять до складу всіх атомів.

Більшість речовин не мають феромагнітних властивостей, оскільки під час заповнення електронних оболонок атомів електрони розміщуються таким чином, що їхні магнітні поля напрямлені протилежно й

компенсують одне одне. Під час такого розміщення електронів їхня потенціальна енергія взаємодії мінімальна. Якщо атоми мають непарне число елек­тронів на оболонках, то магнітні поля неспарених електронів взаємно компенсують­ся під час з'єднання в молекули або під час об'єднання атомів у кристал.

### Домени

Атоми Феруму, Нікелю й Кобальту в крис­талах розміщуються таким чином, що власні магнітні поля неспарених електронів стають напрямленими паралельно одне до одного і всередині кристала утворюються мікроскопічні намагнічені області — *доме­ни.* У різних доменів орієнтація магнітного поля різна, їхнє сумарне магнітне поле дорівнює нулю. Під час розміщення в зовнішньому магнітному полі внутрішні магнітні поля доменів орієнтуються за на­прямом зовнішнього поля, феромагнетик намагнічується (мал. 2.148).

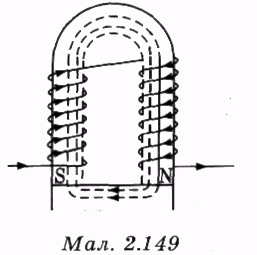


### Температура Кюрі

Упорядковане розміщення магнітних полів електронів у доменах феромагнетиків при досить високій температурі руйнується без­ладними тепловими коливаннями атомів у вузлах кристалічних ґрат. Температуру, вище від якої феромагнітна речовина втра­чає свої феромагнітні властивості, називають *температурою Кюрі.* Залізо, наприк­лад, утрачає властивості феромагнетика при температурінікель — при температурі

Феромагнітні матеріали можна умовно поділити на два типи — магніто-м'які і магніто-жорсткі матеріали. Магніто-м'якими називають такі феромагнітні матеріали, у яких після припинення дії зовнішнього магнітного поля власне магнітне поле май­же повністю зникає, речовина розмаг­нічується. З магніто-м'яких матеріалів ви­готовляють осердя трансформаторів, елек­тромагнітів.

Електромагніт складається з котушки й сталевого осердя (мал. 2.149). Під час про­ходження електричного струму через ко­тушку магнітне поле, створюване струмом у котушці, посилюється в десятки або сотні тисяч разів за рахунок виникнення магнітного поля осердя. Електромагніти використовують у різноманітних електрич­них машинах, електродвигунах і електро­генераторах.



Магніто-жорсткі матеріали використову­ють для виготовлення постійних магнітів, магнітних стрічок і дисків для магнітного запису та зберігання інформації.

## [§45. Електричний двигун постійного струму](" \l "Зміст)

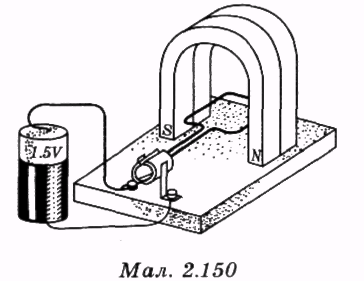
Для задоволення енергетичних потреб су­часного людського суспільства необхідно не тільки знайти джерела енергії, але й доста­вити енергію до місця споживання у формі, зручній для споживання. Найзручнішою для споживання формою енергії є елект­рична енергія, яка легко перетворюється на будь-які інші види енергії. Для транс­портування енергії в будь-яке місце на Землі досить мати лише два металеві

провідники. Електрична енергія не дає ніяких відходів.

Тому будують теплові й гідроелектро­станції для перетворення хімічної або ме­ханічної енергії на електричну. Після доставки електроенергії до місця її споживання виникає протилежне завдан­ня — перетворення електроенергії на інші види енергії: теплову, світлову, механічну.

### Електричні двигуни постійного струму

Для перетворення електричної енергії постійного струму на механічну енергію ви­користовують *електричні двигуни постій­ного струму.* Будову двигуна постійного струму пояснює модель на мал. 2.150.



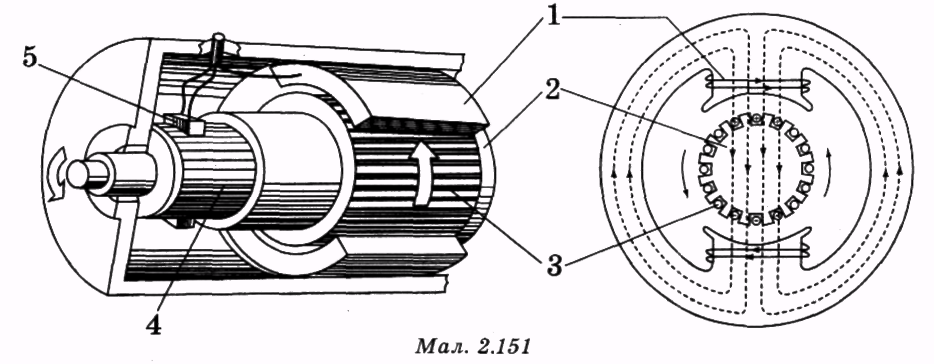
Дія електродвигуна постійного струму ґрунтується на використанні явища дії магнітного поля на провідник зі струмом.

### Індуктор. Якір. Електрична обмотка. Колектор. Електричні щітки

В електродвигуні (мал. 2.151) між двома полюсами електромагніта 1, який назива­ють *індуктором,* розміщений сталевий циліндр — *якір* 2, здатний вільно обертати­ся навколо своєї осі. У сталевому циліндрі є прорізи, у які вміщені проводи *електрич­них обмоток* 3. Кожна електрична обмотка ізольована від циліндра, а її кінці з'єднані з двома мідними пластинами, розміщеними одна проти одної, на одному торці якоря. Кінці кожної обмотки підводяться до своєї пари мідних пластин, усі мідні пластини ізольовані одна від одної й утворюють циліндричний *колектор* 4. З двох проти­лежних сторін до колектора притискаються графітні *електричні щітки* 5. Для запуску електродвигуна пропускають постійний електричний струм через обмот­ку електромагніта й підводять постійну на­пругу до щіток. Щітки з'єднуються з виво­дами тієї обмотки, площина якої збігається з вектором індукції магнітного поля елект­ромагніта.

У процесі проходження струму через цю обмотку на проводи обмотки, розміщені перпендикулярно до вектора  індукції магнітного поля,діє сила Ампера

Струм у протилежних боках обмотки має протилежний напрям, тому й сили Ампера, прикладеш до двох боків Обмотки напрям­лені протилежно. Спільна дія цих двох сил викликає поворот якоря. Під час невелико­го повороту якоря контакт щіток колекто­ра з першою обмоткою розривається, і щіт­ки з'єднуються з кінцями наступної обмот­ки, площина якої в даний момент збіга­ється з вектороміндукції. Сили Ампера знову повертають якір і т.д. У кожний мо­мент до щіток підключається нова обмотка й обертання якоря триває. Електродвигуни постійного струму надають руху колесам електропоїздів, трамваїв, тролейбусів.



## [§46. Електромагнітна індукція](" \l "Зміст)

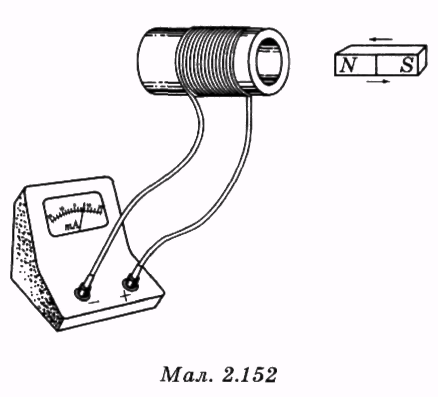
### Електромагнітна індукція

Після відкриття магнітної взаємодії стру­мів, здатності електричних струмів створю­вати магнітні поля багато вчених намага­лося здійснити зворотний процес — створи­ти електричний струм якоюсь дією магніт­ного поля. У розв'язанні цього завдання першим досягнув успіху М. Фарадей. У 1831 році він виявив, що в процесі зміни магнітного поля всередині котушки з про­відника в котушці виникає електричний струм. Це явище назвали *електромагніт­ною індукцією.*

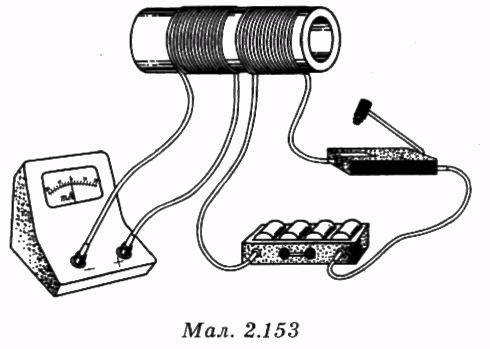
### Індукційний струм

Електричний струм, що виникає в резуль­таті електромагнітної індукції, назвали *індукційним струмом.*

Досліди показали, що індукційний струм у котушці можна одержати різними способа­ми: можна вставляти магніт у котушку або висовувати його з котушки, можна надіва­ти котушку на магніт або знімати її з магніта (мал. 2.152). Індукційний струм може виникати й за відсутності якого-не-будь механічного руху.



Досить розмістити дві котушки поряд і одну з них з'єднати із джерелом струму. Якщо магнітне поле першої котушки пронизує другу котушку перпендикулярно до площини її витків, то під час будь-яких змін струму в першій котушці виникає індукційний струм у другій котушці (мал. 2.153).



### Електрорушійна сила індукції. ЕРС індукції

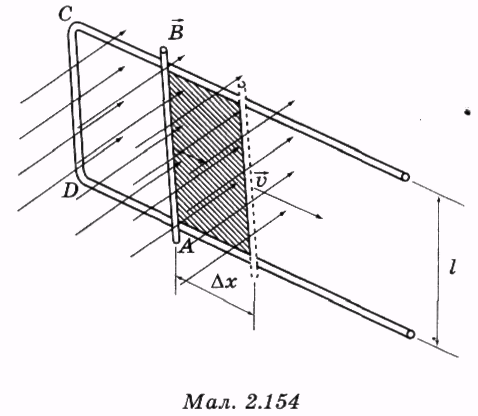
Поява індукційного струму в замкненому електричному колі котушки під час будь-яких змін магнітного поля означає, що в процесі змін магнітного поля в проводі котушки на електричні заряди діють сили неелектростатичної природи, оскільки робота електростатичних сил у будь-якому замкненому контурі дорівнює нулю. Роботу цих сторонніх сил характеризують *елект­рорушійною силою індукції* або *ЕРС індук­ції.*

### Правило Ленца

Дослід показує, що напрям індукційного струму завжди визначається загальним правилом, яке називають *правилом Ленца:* індукційний струм має такий напрям, що створене ним магнітне поле виявляє компенсувальну дію на зміну магнітного поля, яка викликає даний індукційний струм, перешкоджає змінам магнітного поля, які відбуваються.

Це означає, наприклад, що під час унесен­ня магніту в котушку й зростання індукції магнітного поля індукційний струм, що ви­никає всередині її, створює магнітне поле з протилежним напрямом вектора індукції і це перешкоджає зростанню магнітного по­ля в котушці. Це також означає, що індукційний струм, який виник, дією свого магнітного поля перешкоджає всуванню магніту в котушку, тобто для створення індукційного струму зовнішнім силам не­обхідно здійснити роботу. Таким чином, правило Ленца є виявом дії закону збере­ження й перетворення енергії. Енергія

індукційного електричного струму не може виникнути з нічого. Вона може виникнути лише в результаті перетворення якогось іншого виду енергії в однаковій кількості. Для того, щоб знайти значення ЕРС індукціїрозглянемо такий приклад. В однорідному магнітному полі розміщені два металеві стрижні, їхні два кінці з'єднано. Стрижні паралельні один до одного й ле­жать у площині, перпендикулярній до век­тораіндукції. Відстань між стрижнями дорівнює *І.* На стрижні, перпендикулярно до них, поклали прямий провідник (мал. 2.154).



Коли цей провідник рівномірно рухається зі швидкістю *v* зліва направо, на кожний електрон у провіднику з боку магнітного поля діє сила Лоренца, напрямлена вздовж провідника:



У результаті дії сили Лоренца всі вільні електрони в рухомому провіднику почина­ють рухатися і в замкненому електричному колі, що складається з рухомого провідни­ка *АВ,* стрижня *ВС,* замикаючого нерухо­мого провідника *CD* і другого стрижня *DA*, виникає індукційний струм. Робота сили Лоренца в процесі переміщення одного електрона від точки *В* до точки *А* дорівнює:



На ділянках *ВС, CD* і *DA* робота сили Лоренца дорівнює нулю, оскільки на цих ділянках напрям переміщення електронів у провіднику перпендикулярний до вектора сили Лоренца.

### Контур

Отже, повна робота *А* сили Лоренца на всьому контурі *ABCDA* дорівнює її роботі  на ділянці *АВ:*



Робота електростатичних сил у процесі пе­реміщення електрона по замкненому кон­туру дорівнює нулю, отже, єдиним джере­лом сторонніх сил, що створюють індук­ційний струм у контурі в цьому випадку, є сила Лоренца. Оскільки ЕРС дорівнює від­ношенню роботи сторонніх сил по пе­реміщенню заряду в замкненому колі до ве­личини цього заряду, ЕРС індукції  в цьо­му випадку дорівнює:

Якщо позначимовідстань, яку пройшов провідник за малий інтервал часу то одержимо:



Підставивши (46.5) в (46.4), одержимо для обчислення ЕРС індукціїтакий вираз:



де— зміна площі, що охоплює контур, у якому виникає індукційний струм.

### Магнітний потік

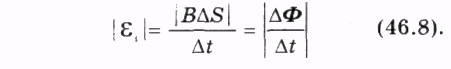
Добуток модуля індукції *В* магнітного поля на площу S поверхні, яка перпендикуляр­на до вектораіндукції, називають *маг­нітним потоком.* Магнітний потік позна­чають літерою *Ф. Одиницю магнітного по­току в Міжнародній системі одиниць на­зивають вебер (Вб).*

Потік 1 вебер створює однорідне магнітне поле з магнітною індукцією 1 тесла через поверхню площею 1 квадратний метр, що розміщена перпендикулярно до вектора індукції:



### Закон електромагнітної індукції

Підставивши (46.7) в (46.6), одержимо но­вий вираз для визначення модуля ЕРС індукції:



Вираз (46.8) називають *законом електро­магнітної індукції.*

Модуль ЕРС індукції в замкненому контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену конту­ром.

Для зазначення дії правила Ленца в законі електромагнітної індукції ставлять знак мінус:

У котушці, що складається з *п* послідовно з'єднаних витків, для швидкості зміни магнітного потоку в кожному витку, яка дорівнює ЕРС індукції *Еі* дорівнює:



Закон електромагнітної індукції за форму­лою (46.9) виконується не тільки для ви­падку руху провідника в магнітному полі або магніту відносно провідника, але й під час будь-якої зміни магнітного потоку че­рез замкнений контур.

Природа сторонніх сил, що створюють ЕРС індукції під час руху провідника в маг­нітному полі, була пояснена раніше, роль сторонньої сили в цьому випадку виконує сила Лоренца.

Причина виникнення індукційного струму в нерухомому контурі в процесі зміни магнітного потоку через нього вимагає з'ясування.

У процесі зміни магнітного потоку в неру­хомому контурі виникає електричний струм, отже, у провіднику на електрони діє якась сила. Оскільки на нерухомі заряди магнітне поле не діє, цю дію здійснює елек­тричне поле.

Проте це поле не електростатичне. Його ро­бота в замкненому контурі відрізняється від нуля, оскільки індукційний струм здійснює відмінну від нуля роботу.

Вихрове електричне поле

Електричне поле, яке виникає під час зміни магнітного поля, назвали *вихровим електричним полем.* Робота сил вихрового електричного поля є роботою сторонніх сил під час виникнення ЕРС індукції в резуль­таті зміни магнітного поля. З'ясувавши особливості кожного з трьох полів: електростатичного, магнітного й вихрового електричного, необхідно звернути увагу на те, що всі ці поля не є особливими окремими матеріальними утвореннями, а лише трьома різними способами опису од­ного матеріального об'єкта — електро­магнітного поля.

Поділ одного електромагнітного поля на різні складові можна пояснити частково історично, усталеністю колишніх наукових поглядів, частково міркуваннями зручно­сті, простоти опису явищ. Але цей поділ умовний. Досить, наприклад, подумки пе­ренестися із системи відліку, у якій елект­ричний заряд рухається в магнітному полі, у систему відліку, пов'язану з електричним зарядом, як із світу «зникає» сила Лорен­ца, що діяла на електричний заряд, і «ви­никає» вихрове електричне поле, яке діє на той самий заряд таким самим чином.

## [§47. Самоіндукція](" \l "Зміст)

Магнітний потік *Ф* через контур прямо пропорційний до індукції *В* магнітного поля і площі *S,* яку охоплює провідник зі струмом І.

Як було встановлено з досліду, індукція *В* магнітного поля в кожній точці простору навколо провідника зі струмом пропор­ційна до сили струму І в провіднику (43.3). Отже, магнітний потік *Ф* через даний контур (S = *const)* прямо пропорційний до сили струму *І* в контурі:



### Індуктивність

Коефіцієнт пропорційності *L* між силою струму І і магнітним потоком через контур називають *індуктивністю контура.* Індук­тивність залежить від площі, яку охоплює контур, форми контура, властивостей сере­довища, у якому перебуває контур.

### Генрі

*Одиницю індуктивності в Міжнародній системі одиниць називають генрі (Гн).* З (47.1) випливає:



Контур, у якому електричний струм силою 1 ампер створює магнітний потік 1 вебер, має індуктивність 1 генрі.

Установивши зв'язок між силою струму І і магнітним потоком *Ф,* створюваним цим струмом у контурі, розглянемо далі явище електромагнітної індукції. Постійний струм І, що проходить через контур з індуктивністю *L,* створює в контурі магніт­ний потік *Ф,* що дорівнює:



Що станеться з цим контуром після вимк­нення струму?

Відповідь здається зрозумілою: струм при­пиниться, магнітне поле зникне. Проте зникнення магнітного поля є його зміна від початкового значення  до нуля.

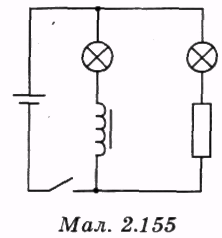
Відповідно до закону електромагнітної індукції зміна магнітного потоку через кон­тур повинна викликати появу ЕРС індукції, яка дорівнює:



### Самоіндукція

Явище виникнення ЕРС індукції, виклика­ної змінами сили струму в самому контурі, називають *самоіндукцією.* З виразу (47.2) можна дати ще одне визна­чення одиниці індуктивності генрі: індук­тивність 1 генрі має такий контур, у якому зі зміною сили струму на 1 ампер за 1 се­кунду виникає ЕРС самоіндукції 1 вольт. За правилом Ленца ЕРС самоіндукції зі зменшенням сили струму в контурі діє в напрямі підтримки сили струму незмін­ною, зі збільшенням сили струму в контурі ЕРС самоіндукції перешкоджає збільшен­ню струму.

Для виявлення явища самоіндукції можна використати електричне коло, зображене електричною схемою на мал. 2.155.



У цьому колі паралельно ввімкнено резис­тор і котушку з залізним осердям, по­слідовно із резистором і котушкою ввімкне­но електричні лампи. Електричний опір резистора дорівнює електричному опору ко­тушки з постійним струмом, тому під час паралельного підключення їх до джерела струму лампи повинні горіти однаково яск­раво.

Що ж показує дослід? Під час замикання кола лампа в колі котушки загоряється пізніше, ніж лампа в колі резистора. Це треба пояснити тим, що котушка з залізним осердям має велику індуктив­ність, ЕРС самоіндукції перешкоджає зрос­танню струму під час увімкнення. Під час відключення джерела струму спа­лахують обидві лампи. Струм у колі котуш­ки й резистора створює ЕРС самоіндукції, яка виникає зі зменшенням сили струму в котушці.

Останній дослід показує, що магнітне поле струму не тільки здатне діяти на рухомі за­ряди, але й має певний запас енергії. Саме за рахунок енергії магнітного поля виникає струм у колі, коли відключити його від джерела.

Визначимо енергію магнітного поля, ство­реного струмом І у контурі індуктивністю *L.* Для цього уявімо, що сила струму в кон­турі лінійно спадає від значення І до нуля за час *t.* Середнє значення сили струму в контурі за час *t* дорівнюватиме:



при цьому в колі пройде сумарний елект­ричний заряд *q,* який дорівнює:

**

Знайдемо роботу *А,* виконану ЕРС самоін­дукції за цей час:

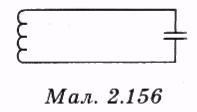


Робота ЕРС самоіндукції здійснюється за рахунок енергії магнітного поля контуру, отже, вона дорівнює енергіїмагнітного поля:

## [§48. Електромагнітні коливання](" \l "Зміст)

### Електричний коливальний контур

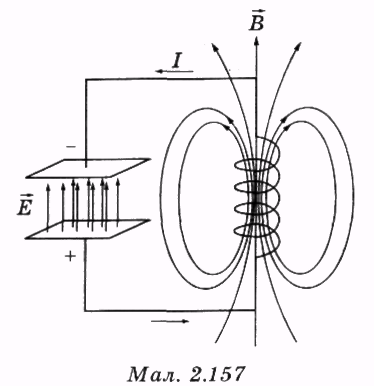
Як зазначалося в §36 і §47, енергія елект­ричного поля системи нерухомих електрич­них зарядів і енергія магнітного поля електричного струму можуть перетворюватися на інші види енергії, наприклад на енергію теплового руху атомів речовини, механічну енергію. Особливий вид взаємних перетво­рень енергії електричного і магнітного полів можна спостерігати в *електричному коливальному контурі.* Коливальним контуром називають елект­ричне коло із з'єднаних у замкнене коло електричного конденсатора й котушки (мал. 2.156). Під час з'єднання кінців ко­тушки з обкладками зарядженого конден­сатора виникає електричний струм у ко­тушці і конденсатор розряджається. Роз­рядка конденсатора не здійснюється миттєво навіть у тому разі, якщо електрич­ний опір проводу котушки дорівнює нулю. Миттєвому зростанню сили струму пере­шкоджає ЕРС самоіндукції, що виникає в котушці.



Поступово зростаючи, сила струму в ко­тушці досягає максимального значення в той момент, коли конденсатор повністю розряджається. Після розрядки конденса­тора струм у колі не припиняється мит­тєво, оскільки ЕРС самоіндукції в котушці перешкоджає такому припиненню й ство­рює струм самоіндукції в тому самому на­прямі, у якому він проходив під дією елек­тричного поля зарядженого конденсатора. Цей струм знову заряджає конденсатор, але знаки зарядів на його обкладках при цьому виявляються протилежними до по­чаткових знаків. До того моменту, коли напруга між обкладками конденсатора до­сягає початкового значення, сила струму в колі дорівнює нулю. Конденсатор знову по­чинає розряджатися через котушку і т.д, процес періодично повторюється.

### Вільні електромагнітні коливання

Такі періодично повторювані зміни сили струму в котушці й напруги на конденса­торі, які здійснюються без споживання енергії від зовнішніх джерел, називають *вільними електромагнітними коливаннями.* Під час вільних електромагнітних коли­вань в електричному контурі енергія електричного поля конденсатора і енергія магнітного поля котушки періодично пере­творюються одна на одну (мал. 2.157).



З'ясуємо, як змінюються з часом напруга  на конденсаторі електричного коливаль­ного контура й сила струму *і* в котушці. Напругана конденсаторі в будь-який момент часу дорівнює:



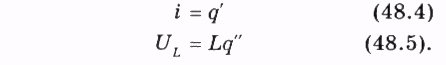
де *q* — заряд на обкладці конденсатора, С — електроємність конденсатора. Якщо електричний опір котушки дорівнює нулю, напругана ній у будь-який мо­мент часу дорівнює ЕРС самоіндукції з про­тилежним знаком:



Під час переходу до нескінченно малих інтервалів часуі змін сили струму  та заряду  із виразу

(48.2) одержимо:

Оскількиколимаємо:



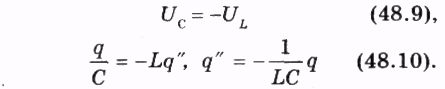
Напругана котушці ідеального коли­вального контуру в будь-який момент часу дорівнює добуткові індуктивності *L* котуш­ки на другу похідну заряду *q.* Робота під час переміщення заряду *q* між обкладками конденсатора  дорівнює 

Між кінцями котушки 

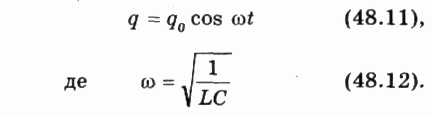
Повна робота *А* електростатичних сил під час переміщення замкненим контуром до­рівнює нулю:



Із (48.8) випливає, що напругана кон­денсаторі в будь-який момент часу рівна за модулем і протилежна за знаком до напру­ги на котушці



Рівнянню (48.10) задовольняє функція



Із (48.1) і (48.11) випливає, що напруга на конденсаторі змінюється з часом за за­коном:

де— циклічна частота коливань. Із (48.4) і (48.11) випливає, що сила стру­му і в котушці змінюється з часом за зако­ном:



### Гармонічні коливання

Зміни фізичних величин з часом, що відбу­ваються за законом синуса або косинуса, називають *гармонічними коливаннями.* В електричному коливальному контурі від­буваються вільні гармонічні коливання си­ли струму й напруги.

Період *Т* гармонічних коливань в елек­тричному коливальному контурі пов'яза­ний із циклічною частотоювиразом:



тому із (48.12) одержимо:



### Формула Томсона

Формулу (48.15), що встановлює зв'язок періоду *Т* вільних коливань в електрично­му контурі з індуктивністю *L* котушки й електроємністю *С* конденсатора, називають *формулою Томсона.*

## [§49. Генератори незгасаючих електромагнітних коливань](" \l "Зміст)

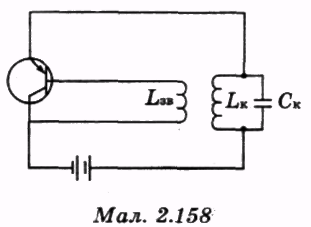
У будь-якому реальному електричному ко­ливальному контурі відбуваються втрати енергії на нагрівання проводів і діелектри­ка в конденсаторі, тому амплітуда коли­вань напруги й сили струму в контурі з ча­сом поступово спадає до нуля. Для підтри­мання незгасаючих коливань у контурі не­обхідно періодично поновлювати втрати енергії шляхом підзарядження конденсато­ра до початкового значення напруги. Період такого підзарядження має бути точ­но узгоджений з періодом власних коли­вань у контурі.

### Автоколивальний генератор

Цю задачу розв'язують за допомогою *авто­коливального генератора* незгасаючих електромагнітних коливань.

Керувальний елемент. Котушка зворотного зв'язку

Приклад електричної схеми автоколива­льного генератора подано на мал. 2.158. У цьому генераторі коливальний контур із ко­тушкиі конденсатораз'єднується із джерелом постійного струму через емітер-ний і колекторний виводи транзистора. Транзистор є *керувальним елементом.* Його *р-п* перехід емітер-база з'єднаний з котуш­коюіндуктивно пов'язаної з котушкою  коливального контура. Котушкунази­вають *котушкою зворотного зв'язку.* За відсутності напруги на емітерному *р-п* переході струм через транзистор не прохо­дить, конденсатор коливального контуру відключений від джерела постійного стру­му. Коли виникають електромагнітні коли­вання в коливальному контурі між кінця­ми котушки як і у вторинній обмотці трансформатора,виникає змінна напруга.



Два рази за період коливань напруга на *р-п* переході емітер-база транзистора змі­нює свій знак, транзистор половину періоду коливань відкритий, половину періоду — закритий.

### Позитивний зворотний зв'язок

Якщо кінці котушки зв'язку з транзисто­ром з'єднані правильно, транзистор відкри­вається в ту половину періоду коливань, коли знаки заряду на обкладках конденса­тора збігаються зі знаками зарядів на по­люсах джерела струму. Такий тип зв'язку називають *позитивним зворотним зв'яз­ком.* При цьому в кожний період відбу­вається підзарядження конденсатора від джерела постійного струму і електро­магнітні коливання тривають з постійною амплітудою.

Цей приклад дозволяє виокремити основні складові частини будь-якого автоколиваль­ного генератора: коливальний контур, дже­рело енергії для підтримки незгасаючих коливань, керувальний елемент, пов'яза­ний з коливальним контуром позитивним зворотним зв'язком.

Інший можливий спосіб одержання незга­саючих електромагнітних коливань в елек­тричному колі — створення в колі вимуше­них електромагнітних коливань.

### Вимушені електромагнітні коливання

В електричному колі, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора, котуш­ки й резистора, незгасаючі електромагнітні коливання виникають у тому разі, якщо між початком і кінцем кола прикладено змінну напругу постійної амплітуди. Електромагнітні коливання такого виду на­зивають *вимушеними електромагнітними коливаннями.*

### Змінний струм

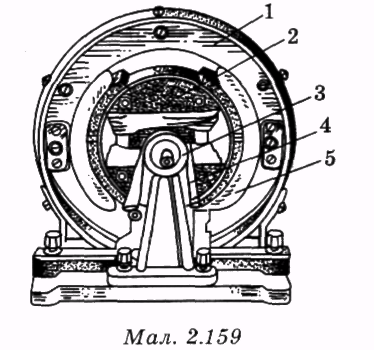
У побуті й на роботі, на фабриках і заводах широко застосовують електроенергію. Елек­трична енергія від електростанцій до спо­живачів передається проводами електрич­них мереж. Під час підключення елект­роламп, двигунів, печей та інших приладів в електричному колі виникають вимушені електромагнітні коливання, оскільки нап­руга між проводами електричних мереж змінюється за гармонічним законом з часто­тою 50 Гц. У процесі збудження вимушених електромагнітних коливань в електричних колах проходить *змінний струм.* Для створення в електричному колі виму­шених електромагнітних коливань та одер­жання змінного струму потрібне джерело змінної напруги постійної амплітуди.

### Генератор змінного струму

Таким джерелом змінної напруги на елект­ростанції є *генератор змінного струму.*

### Статор. Ротор. Контактні кільця. Щітки. Обмотка

Генератор змінного струму (мал. 2.159) складається з нерухомого *статора* 1 і *ро­тора* 2, який обертається всередині нього. Ротор — це електромагніт зі сталевим осер­дям циліндричної форми. Постійний струм в обмотці електромагніта підводиться через два *контактні кільця* 3, до яких притис­каються ковзні контакти — *щітки* 4. Ста­тор має сталеве осердя і вкладену в пази осердя *обмотку* 5. Створюване електро­магнітом магнітне поле обертається з куто­вою швидкістюобертання ротора й збуд­жує в обмотці статора ЕРС індукції, що змінюється з частотою

****

Якщо індукція магнітного поля, створюва­ного електромагнітом, дорівнює *В,* а пло­ща, охоплювана одним витком обмотки статора, дорівнює *S,* то в будь-який момент часу *t* значення магнітного потоку через один виток обмотки статора дорівнює:

де  - кут між площиною витка обмотки в статорі й вектороміндукції магнітного поля ротора. Під час обертання ротора з ку­товою швидкістюкутзмінюється з ча­сом за законом:



З виразів (49.1) і (49.2) випливає, що під час обертання ротора з кутовою швидкістю  магнітний потік в обмотці статора змі­нюється з частотоюза гармонічним зако­ном:

Зміни магнітного потоку *Ф* породжують в одному витку обмотки статора ЕРС індукції е*,* що також змінюється за гармонічним за­коном:



В обмотці з *п* витків ЕРС індукції в *п* разів більша:



### Теплові електростанції

Змінний електричний струм, створюваний ЕРС генератора, виконує роботу. Для виконання цієї роботи генератор споживає енергію від інших джерел енергії. Спожи­вання енергії генератором відбувається в процесі обертання ротора. На теплових електростанціях ротори генераторів оберта­ють парові турбіни. Парові турбіни викори­стовують роботу нагрітої водяної пари, що розширюється, а нагрівання пари відбу­вається за рахунок енергії спалюваного па­лива.

### Гідроелектростанції

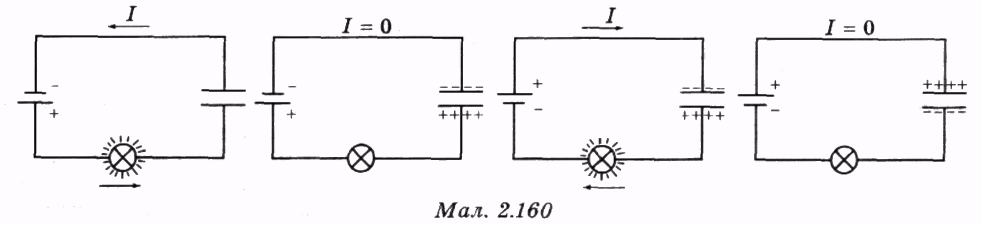
На гідроелектростанціях ротори електрич­них генераторів обертають гідравлічні турбіни, що споживають кінетичну енергію рухомих потоків води.

## [§50. Змінний електричний струм](" \l "Зміст)

Для аналізу процесів в електричних колах постійного струму досить було використати чотири фізичних поняття: напруга, си­ла струму, електричний опір, електро­рушійна сила. У колах змінного струму процеси складніші, і цих чотирьох понять замало для розуміння процесів, які відбу­ваються.

Перша суттєва відмінність змінного струму від постійного полягає в тому, що він може проходити через конденсатор, хоч між обкладками конденсатора є діелектрик. Щоб зрозуміти механізм проходження змінного струму через конденсатор, можна зробити дослід з послідовно з'єднаними джерелом постійного струму, конденсатором і елект­ричною лампою. Під час замикання такого кола лампа спалахує на короткий час, потім струм у колі припиняється й лампа не світиться. Короткочасний струм у колі проходить у процесі заряджання конденса­тора. Якщо тепер змінити полярність під­ключення джерела до кола з конденсатора і лампи, то знову можна буде спостерігати короткочасний спалах лампи під час розря­джання конденсатора та його заряджання з протилежною полярністю знаків зарядів на обкладках (мал. 2.160). Якщо процес зміни знаків прикладеної напруги здійснювати з певною частотою v, процеси заряджання і розряджання кон­денсатора здійснюватимуться з такою са­мою частотою. Якщо значення частоти v ве­ликі, зміни яскравості світіння лампи ста­ють непомітні.

Саме такі процеси відбуваються під час увімкнення конденсатора в електричне ко­ло змінного струму. Електрони не прохо­дять через діелектрик між обкладками кон­денсатора під час подачі на нього змінної напруги, але струми заряджання і розря­джання конденсатора гарантують прохо­дження змінного електричного струму в усіх елементах кола, увімкнених послідов­но з конденсатором.



### Ємнісний опір конденсатора

Визначимо амплітуду  коливань сили струму під час подачі на обкладки конден­сатора змінної напруги з амплітудою що змінюється за гармонічним законом:



де *и* - миттєве значення напруги,

 — амплітудне значення напруги.

Напруга на конденсаторі *U* пов'язана з йо­го електроємністю:



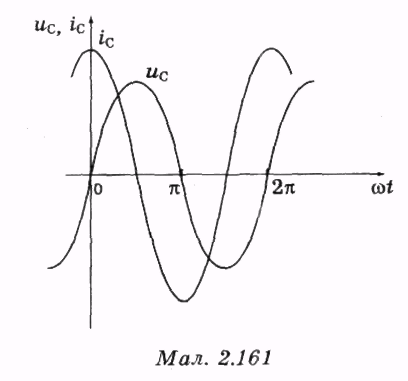
Оскільки сила струму дорівнюєто



З (50.3) випливає, що під час коливання напруги *U* на обкладках конденсатора за гармонічним законом (50.1) з амплітудою  в колі відбуваються гармонічні коли­вання сили струму і з амплітудоющо дорівнює:

Коливання напруги на конденсаторі відста­ють за фазою від коливань сили струму в

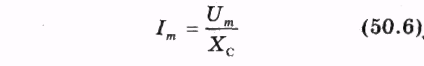
колі на(мал. 2.161).



Для використання того самого способу встановлення зв'язку між напругою й си­лою струму, який застосували для ділянки кола постійного струму (закон Ома для ді­лянки кола), уводимо нове поняття: *ємніс­ний опір конденсатора.* Ємнісним опором  конденсатора електроємністю С на змінному струмі частотою  називають фізичну величину, обернену добуткові циклічної частоти  на електроємність С:



З (50.4) і (50.5) випливає:



Як видно з (50.5), ємнісний опір конденса­тора залежить від частотизмінної напру­ги та електроємності С. Зі збільшенням час­тоти ємнісний опір конденсатора змен­шується.

### Індуктивний опір котушки

Другу суттєву відмінність змінного струму від постійного можна спостерігати під час увімкнення котушки в коло змінного стру­му. Під час увімкнення в коло змінного струму котушки з електричним опором *R* проводу її обмотки амплітуда коливань си­ли струмув ній виявляється значно меншою за значення очікуваного на

основі закону Ома для ділянки кола постійного струму:



Причину зменшення сили струму в ко­тушці на змінному струмі порівняно із си­лою струму з тим самим значенням постійної напруги пояснюють дією ЕРС са­моіндукції.

Знайдемо зв'язок між амплітудами коли­вань сили струмув котушці й напруги  на ній. На котушці, електричним опо­ром *R* проводу якої можна знехтувати, у будь-який момент часу *t* напруга *и* дорів­нює ЕРС самоіндукціїузятій з проти­лежним знаком:



Якщо сила струму і в котушці змінюється за гармонічним закономто



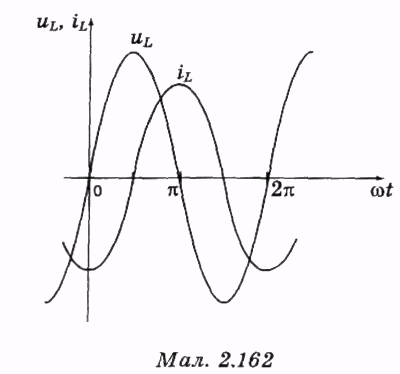
З (50.8) випливає, що амплітуда коливань напругина котушці дорівнює:

Вираз (50.8)показує, що коливання напру­ги на котушці випереджають за фазою ко­ливання сили струму на(мал. 2.162).

Так само як і для конденсатора, для ко­тушки вводимо нове поняття: *індуктивний опір котушки.*

Індуктивним опором котушки  індуктивністю *L* на змінному струмі частотою називають добуток індуктивності *L* на циклічну частоту





Індуктивний опірпрямо пропорційний до індуктивності *L* і частоти  змінного струму. З (50.9) і (50.10) випливає:

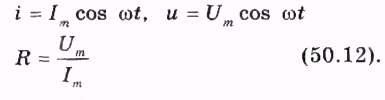


Оскільки на ідеальному конденсаторі й на ідеальній котушці між коливаннями сили струму й напруги є зсув фази на

потужність струму, що дорівнює добуткові сили струму на напругу, одну половину періоду має позитивний знак, а другу поло­вину — негативний знак. У результаті пов­на потужність струму за цілий період і на ідеальному конденсаторі, і на ідеальній ко­тушці дорівнює нулю. У середньому за період ідеальні конденсатор і котушка в колі змінного струму не поглинають і не виділяють енергію.

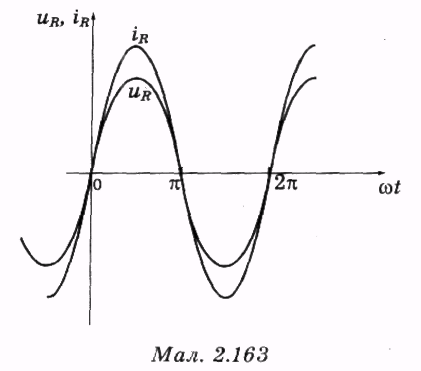
### Миттєве значення потужності змінного струму

Якщо елемент електричного кола змінного струму має електричний опір *R* і його елек­троємність С та індуктивність *L* надто малі, то коливання сили струму й напруги на та­кому елементі кола збігаються за фазою (мал. 2.163).



На такому елементі *миттєве значення по­тужності змінного струму* дорівнює:





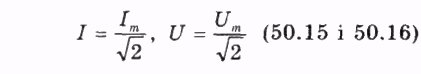
### Середнє значення потужності змінного струму

Для того, щоб визначити *середнє значення потужності змінного струму Р* треба знай­ти середнє значення функції  за період коливання. Це значення дорівнює 0,5, тому



### Діючі значення сили струму і напруги

Теплова дія змінного струму визначається середнім значенням потужності змінного струму. Для використання формул, які збігаються за формою з формулами для кіл постійного струму, використовують понят­тя *діючих значень сили струму І і напруги U змінного струму:*



З використанням діючих значень сили струму й напруги середня потужність змін­ного струму, якщо фази коливань струму й напруги збігаються, дорівнює

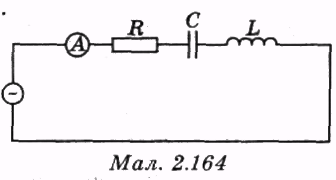


Значення напруги 220 вольт, яке викорис­товують у міських електромережах, це дію­че значення напруги.

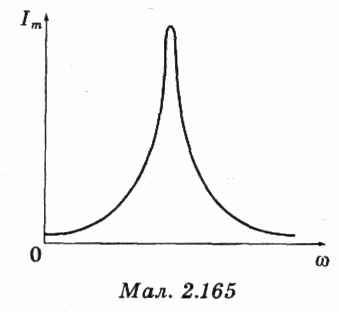
Амплітуда коливань напруги в разів більша:



Ще однією особливістю електричних кіл змінного струму є можливість явища резо­нансу.

Складемо електричне коло з послідовно з'єднаних резистора, котушки й конденса­тора. З'єднаємо це коло з виходом генера­тора змінної гармонічної напруги (мал. 2.164)

Підтримуючи амплітуду коливань напруги на виході генератора постійною, будемо змінювати частоту електричних коли­вань, які він генерує, і вимірювати амплі­туду коливань сили струму вимушених еле­ктромагнітних коливань у колі. Результати такого досліду подані за допомогою графіка на мал. 2.165.

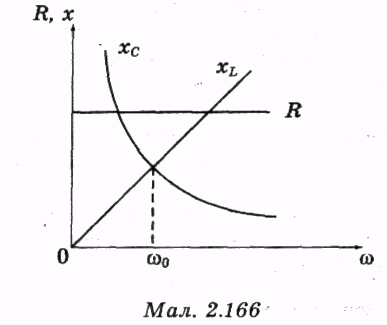


Цей графік показує, що амплітуда коли­вань сили струму в колі спочатку зростає зі збільшенням частоти, досягає максималь­ного значення, а потім швидко спадає. Та­ку залежність амплітуди коливань сили струму від частоти пояснюють тим, що ко­ливання напруги на конденсаторі відстають від коливань сили струму на а на ко­тушці випереджають на

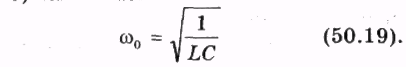
Резонансна частота

Під час послідовного вмикання коливання сили струму в котушці й конденсаторі відбуваються з однаковою фазою, тому різниця фаз коливань напруги на котушці й конденсаторі дорівнюєтобто напруга на котушці весь час протилежна за знаком до напруги на конденсаторі. З підвищенням частоти ємнісний опір конденсатора спа­дає, а індуктивний опір котушки зростає. Частоту  при якій ці опори однакові, на­зивають резонансною частотою (мал. 2.166).





З (50.18) випливає:



Порівняння виразів (48.12) і (50.19) пока­зує, що резонансна частотавимушених електромагнітних коливань у послідовному електричному *R-L-C* колі збігається з час­тотою вільних електромагнітних коливань  контурі з тими самими значеннями індуктивності *L* і електроємності *С.* Під час резонансу в послідовному  колі з умови (50.18) і протилежності знаків напруги на котушці й конденсаторі випли­ває: 

У цьому випадку повна напруга *U* дорівнює напрузіна резисторі й сила струмув колі дорівнює:



## [§51. Трансформатор](" \l "Зміст)

У процесі передачі проводами електричної енергії потужністю *Р* від електростанції до споживача частина цієї потужності марно витрачається на нагрівання проводів лінії електропередач. Потужністьщо втрачається в проводах, дорівнює:

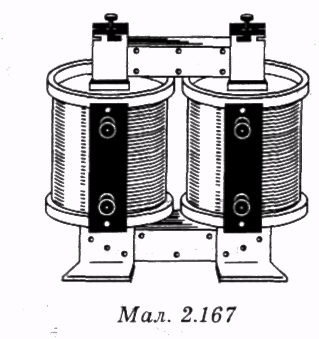


де I — сила струму в лінії електропередач, *R* — електричний опір проводів лінії. Оскільки втрати енергії в лінії електропе­редач пропорційні до квадрата сили стру­му, то для зниження марних утрат не­обхідно зменшувати значення сили струму в лінії наскільки це можливо. За умови од­накового значення потужності, яка пере­дається, зменшення сили струму в лінії можливе за рахунок підвищення однако­вою мірою напруги між проводами лінії. Межу підвищення напруги в лініях елект­ропередач визначає явище електричного розряду, що виникає між проводами в повітрі при високих значеннях напруги. Найуживаніші під час передачі електро­енергії на великі відстані значення напру­ги 400-500 кВ.

### Трансформатор

Напруги на виході електрогенераторів і напруги, зручні для споживачів електро­енергії, значно нижчі за ці значення. Тому виникає практичне завдання підвищення напруги для передачі електричної енергії на великі відстані й зниження напруги для використання електроенергії. Це завдання розв'язують за допомогою *трансформаторів.*

Робота трансформатора ґрунтується на ви­користанні явища електромагнітної індук­ції. Складовими частинами найпростішого трансформатора є дві котушки й замкнене осердя, яке проходить крізь обидві котуш­ки (мал. 2.167).



Якщо подають на першу котушку змінну напругу *u1,*у ній виникає змінний струм *і.* Змінний струм створює в сталевому осерді змінний магнітний потік. Цей магнітний потік пронизує обидві котушки і в кожно­му витку кожної з двох котушок виникає однакова EРС індукції e*.* Якщо в першій котушці  витків, а в другій *п2,* то повне значення ЕРС індукції в першій котушці дорівнює: 

а в другій 

Відношення ЕРС індукції в першій і другій котушках у будь-який момент часу дорів­нює: 

### Первинна котушка. Вторинна котушка

Котушку, на виводи якої подається змінна напруга від якогось джерела, називають *первинною котушкою.* Котушку, у якій збуджується ЕРС індукції, називають *вто­ринною котушкою.*

Для первинної котушки ЕРС— це ЕРС самоіндукції. Якщо опір проводу обмотки первинної котушки набагато менший по­рівняно з її індуктивним опором, то ЕРС самоіндукції в будь-який момент часу дорівнює прикладеній змінній напрузі



За відсутності навантаження у вторинній обмотці — у режимі холостого ходу — на­пругаміж її кінцями в будь-який мо­ментчасу дорівнює ЕРС індукції

З (51.2), (51.3) і (51.4) випливає:



Відношення напруги на первинній об­мотці трансформатора до напругина йо­го вторинній обмотці в режимі холостого ходу дорівнює відношенню числа витків у первинній котушці до числа витків у вторинній котушці. Відношення числа витків у первинній ко­тушці до числа витків у вторинній котушці називають *коефіцієнтом трансформації k:* 

Якщо то трансформатор знижує напругу, яка на нього подається. Якщо *k <* 1, то трансформатор підвищує напругу, якана нього подається. Позитивною властивістю трансформаторів є їхній високий коефіцієнт корисної дії, що досягає значення 98-99,5%. У процесі перетворення змінного струму за допомогою трансформатора потужність струму не змінюється.

Якщо напруга на виході трансформатора зростає в *k* разів, то сила струму у вто­ринній обмотці зменшується в *k* разів порівняно з силою струму в первинній об­мотці. Під час зниження напруги в *k* разів сила струму зростає в *k* разів.

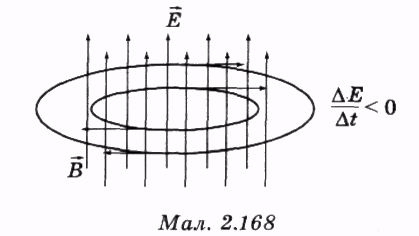
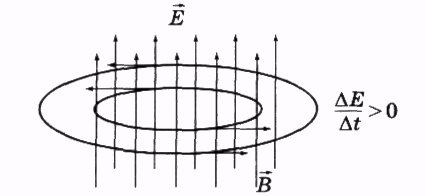
## [§52. Електромагнітні хвилі](" \l "Зміст)

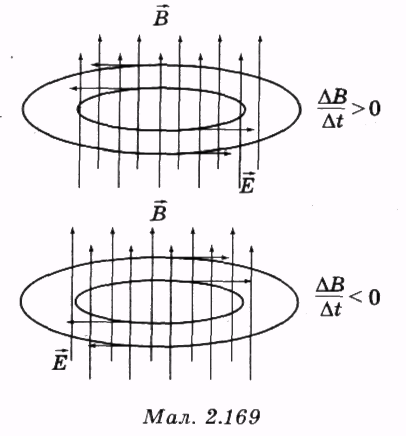
Явище електромагнітної індукції М. Фара­дей пояснив виникненням вихрового елек­тричного поля під час будь-яких змін магнітного поля.

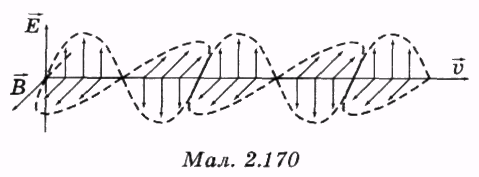
### Електромагнітна хвиля

Дж. К. Максвелл у 1864 році припустив, що будь-які зміни електричного поля, у свою чергу, повинні супроводжуватися ви­никненням вихрового магнітного поля. Якщо це припущення слушне, то процес зміни електромагнітного поля, що почався одного разу, має тривати необмежено за всіма напрямами в просторі в результаті взаємного породження магнітного поля електричним полем і електричного поля магнітним полем.

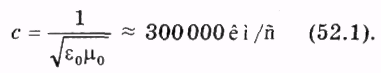
Такий процес поширення в просторі змінних електричних і магнітних полів на­зивають *електромагнітною хвилею.* На мал. 2.168 зображено зв'язок між на­прямом вектора напруженостізмінного електричного поля й векторіввихрового магнітного поля, породженого цим полем. На мал. 2.169 зображено зв'язок між на­прямом вектораіндукції змінного маг­нітного поля й векторіввихрового елек­тричного поля, породженого цим полем. Згідно з гіпотезою Максвелла електро­магнітна хвиля є поперечною хвилею. Вектори магнітної індукції і напруже­ності електричного полявзаємно перпен­дикулярні й перпендикулярні до напряму поширення хвилі (мал. 2.170).







Для поширення електромагнітної хвилі не треба якогось середовища, швидкість с електромагнітної хвилі у вакуумі дорівнює:



Електромагнітні хвилі не можуть поширю­ватися в провідному середовищі, оскільки через наявність вільних електричних за­рядів електричне поле всередині провідни­ків завжди дорівнює нулю.

У діелектриках електромагнітні хвилі мо­жуть поширюватися, проте швидкість їхнього поширення виявляється меншою, ніж у вакуумі



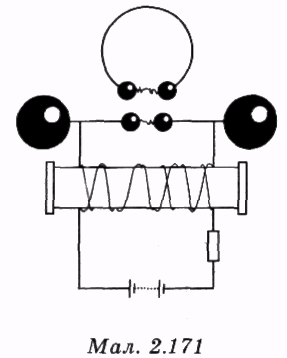
де— діелектрична та магнітна проникність речовини.

Обчислена на основі гіпотези Максвелла швидкість електромагнітної хвилі збіглася із спостережуваною в дослідах швидкістю світла. Цей збіг дозволив припустити, що видиме світло є одним із видів електро­магнітних хвиль.

Окреслимо основну умову виникнення електромагнітних хвиль. Як показали досліди з виявлення електромагнітної індукції, вихрове електричне поле виникає \* зі зміною магнітного потоку Ф. Магнітний потік змінюється зі зміною сили струму, що породжує цей потік. Зміна сили струму в провіднику відбувається в результаті зміни швидкості упорядкованого руху еле­ктричних зарядів, тобто внаслідок приско­рення. Таким чином, вихрове електричне поле врешті-решт виникає в результаті прискореного руху електронів. Ця умова є загальною умовою виникнення електро­магнітних хвиль.

*Електромагнітні хвилі виникають у про­цесі прискореного руху електричних за­рядів.*

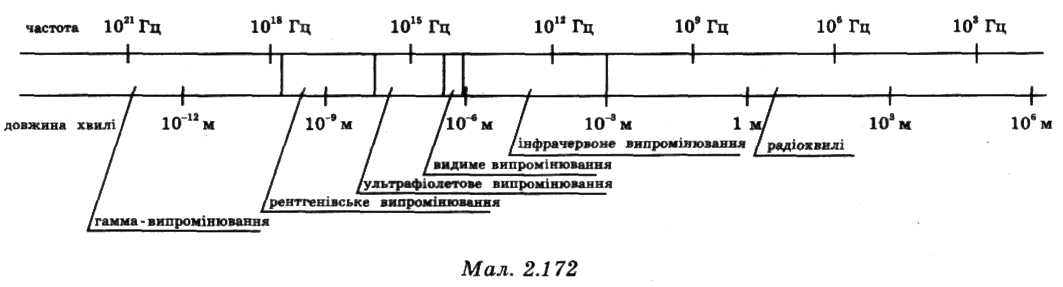
Для перетворення гіпотези Максвелла про існування електромагнітних хвиль на фізичну теорію було необхідне експеримен­тальне підтвердження основних її поло­жень. Повне експериментальне підтвер­дження гіпотези Максвелла дали досліди Генріха Герца 1887 року. Герц використав установку, що складалася із джерела високої напруги й двох елект­родів у вигляді стрижнів з кулями на кінцях (мал. 2.171). На відстані декількох метрів від розрядного проміжку він розмістив розімкнену металеву рамку з двома кулями на кінцях. У процесі подачі напруги між кулями ви­никає короткочасний електричний розряд — іскра. Одночасно в проміжку рамки та­кож виникала іскра. Герц установив, що в процесі розряду відбуваються електричні коливання, у яких електроди — стрижні з кулями на кінцях — виконують роль елементів елект­ричного коливного контуру. При цьому електрони здійснюють гармонічні коливан­ня вздовж стрижнів. У результаті приско­реного руху електронів виникають електро­магнітні хвилі. Досягаючи металевої рам­ки, електромагнітна хвиля збуджує в ній як в електричному контурі вимушені елек­тричні коливання. Якщо власна частота ко­ливного контуру збігається з частотою електромагнітної хвилі, можна спостеріга­ти електричний резонанс. Напруга в кон­турі досягає такого великого значення, що між його кінцями відбувається електрич­ний розряд.



Визначивши частоту коливань v у контурі і довжину електромагнітної хвилі, Герц одержав значення швидкості *v* електро­магнітної хвилі на основі результатів екс­перименту:

Одержане під час експерименту значення швидкості електромагнітних хвиль збігло­ся зі значенням, передбаченим на основі гіпотези Максвелла. *Гіпотеза* Максвелла про існування електромагнітних хвиль пе­ретворилася на *теорію електромагнітних хвиль.*

### Спектр електромагнітних випромінювань

Оскільки електромагнітні хвилі випро­мінюються за будь-якого прискореного ру­ху електричних зарядів, *спектр електро­магнітних випромінювань,* який можна спостерігати в природі і створюваний у техніці, дуже великий (мал. 2.172).

### Радіохвилі

Електромагнітні випромінювання з довжи­ною хвиль від декількох міліметрів до декількох кілометрів називають *радіохви­лями.*

У природі радіохвилі випромінюються під час грозових розрядів. Приходять радіохвилі від зірок, туманностей і навіть міжзоряного простору, що має температуру близько З К.

Радіохвилі випромінюються антенами радіо- і телевізійних передавачів, радіоло­каторів під час збудження в них електро­магнітних коливань.

### Інфрачервоне випромінювання

Випромінювання в діапазоні довжин хвиль приблизно від одного міліметра до метра називають *інфрачервоним випро­мінюванням.*

Будь-які тіла під час нагрівання внаслідок теплового руху заряджених частинок усе­редині них утворюють електромагнітне ви­промінювання. Якщо температури близькі до абсолютного нуля, це випромінювання лежить в області радіохвиль. Якщо темпе­ратури від 10 К і до -3 000 К, основна частина електромагнітного випромінюван­ня лежить в області інфрачервоного ви­промінювання.

Інфрачервоне випромінювання органи чут­тів людини сприймають як тепло, що йде від гарячих предметів. Інфрачервоне ви­промінювання застосовують у техніці для нагрівання й сушіння матеріалів та ви­робів.

### Видиме випромінювання

Якщо температура вища за - 3 000 К і до -10 000 К, випромінювання нагрітих тіл відбувається переважно в області *видимого випромінювання.* Це температури повер­хонь Сонця і зірок. Видиме світло має дов­жину хвиль від

### Ультрафіолетове випромінювання

Якщо температура речовини вища, макси­мум випромінювання припадає на *ультра­фіолетове випромінювання.* Ультрафіолетовим випромінюванням нази­вають електромагнітні хвилі від

 Ультрафіолетове випромінювання має велику біологічну активність. Зокрема, під дією ультрафіолетового випромінюван­ня гинуть хвороботворні бактерії і віруси. Цю його властивість використовують у ме­дицині, у багатьох технологічних процесах для стерилізації інструментів, матеріалів, ліків і продуктів.

Через біологічну активність ультрафіолето­ве випромінювання може бути шкідливе для людини. Установлено, що ультрафіоле­тове випромінювання у складі сонячного світла при великих дозах опромінення — літня засмага — може бути шкідливе для здоров'я людини.

### Рентгенівське випромінювання або рентгенівські промені

Електромагнітні випромінювання, що ви­никають під час гальмування швидких електронів у речовині, називають *рент­генівським випромінюванням* або *рент­генівськими променями.* Рентгенівські промені займають діапазон довжин хвиль від

### Гамма-випромінювання

Електромагнітне випромінювання з довжи­ною хвилі меншою, ніжяке випускають атомні ядра або елементарні частин­ки під час їхніх перетворень, називають *гамма-випромінюванням.* Області довжин хвиль від рентгенівського випромінювання й гамма-випромінювання перекриваються. Ці два випромінювання в цій області відрізняють­ся тільки походженням. Рентгенівські й гамма-промені мають вели­ку проникну здатність крізь речовину. Цю їхню властивість широко використовують у медицині для діагностики різних захворю­вань внутрішніх органів людини. Оскільки різні органи організму людини мають різну густину, вони по-різному поглинають рент­генівське випромінювання. Видиме зобра­ження виникає на екрані, покритому крис­талами, які випускають видиме світло під дією рентгенівського випромінювання, або його одержують на фотоплівці. Рентгенівське випромінювання має сильну біологічну дію і у великих дозах може ду­же зашкодити живому організмові. Проте пригнічувальну дію рентгенівських про­менів на живі клітини можна використову­вати для пригнічення розвитку злоякісних пухлин.

Усі види електромагнітних випроміню­вань мають спільну властивість: усі вони є поперечними електромагнітними хвиля­ми, усі вони проявляють свою хвильову природу в явищах інтерференції, ди­фракції і поляризації. Усі вони виникають у процесі прискореного руху заряджених частинок.

Попри однакову електромагнітну природу електромагнітні випромінювання виявля­ють і відмінності. Основна відмінність між довгохвильовими й короткохвильовими електромагнітними випромінюваннями — збільшення прояву корпускулярних влас­тивостей випромінювань із зменшенням до­вжини хвилі. Квантові, корпускулярні вла­стивості найменше виявляються в діапа­зоні радіохвиль і найбільше в діапазоні гамма-випромінювань. Тому гамма-випро­мінювання розглядають звичайно як потік частинок — гамма-квантів. Оскільки електричне й магнітне поля ма­ють енергію, поширення електромагнітної хвилі супроводжується перенесенням енер­гії в просторі.

### Потік випромінювання

Відношення енергії *Е* електромагнітного випромінювання, що випромінюється або поглинається тілом, до часу *t* називають *по­током випромінювання* або *потужністю випромінювання.*

Потужність випромінювання *Ф* вимірюють у ватах: 

### Поверхнева густина потоку випромінювання

Відношення потоку електромагнітного ви­промінювання *Ф* до площі поверхні *S,* на яку падає це випромінювання, називають *поверхневою густиною потоку випроміню­вання.* Поверхневу густину потоку випромінювання вимірюють у ватах на квад­ратний метр: 

Для точкового джерела електромагнітного випромінювання з потоком випромінюван­ня *Ф* поверхнева густина потоку випромі­нювання на відстані *R* дорівнює:



## [§53. Принципи радіозв'язку](" \l "Зміст)

### Радіозв'язок

Незабаром після відкриття електромагніт­них хвиль було знайдено способи їхнього практичного застосування. У 1885 році російський фізик О. С. Попов уперше про­демонстрував можливість використання електромагнітних хвиль для передачі ін­формації без використання проводів. Цей спосіб назвали *радіозв'язком.*

### Радіопередавач. Радіоприймач

Для здійснення радіозв'язку необхідні *радіопередавач* і *радіоприймач.*

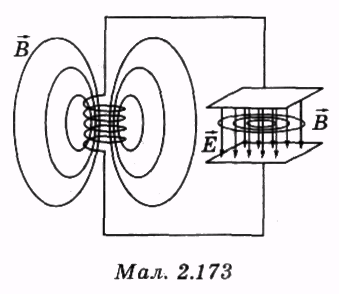
### Автоколивальний генератор. Антена

Радіопередавач складається з *автоколи­вального генератора* й передавальної *ан­тени.*

Окреслимо призначення та принцип дії но­вого елемента — антени. Якщо в автоколивальному генераторі відбуваються електричні коливання, то в ко­тушці й проводах контуру електрони руха­ються з прискоренням.

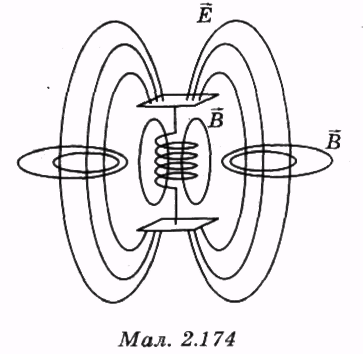
### Закритий коливальний контур

Виходячи із загальних умов, можна очіку­вати виникнення електромагнітних хвиль. Проте на практиці випромінювання елект­ромагнітних хвиль від звичайного ко­ливального контуру майже не спостеріга­ються. Тому такий коливальний контур на­зивають *закритим коливальним конту­ром.* Наочно відсутність випромінювання електромагнітних хвиль закритим конту­ром можна пояснити таким чином. Під час виникнення електричних коливань у за­критому контурі періодично виникає вих­рове магнітне поле між обкладками кон­денсатора. Але це поле виникає у вигляді замкнених силових ліній, що охоплюють лінії напруженості електричного поля між обкладками конденсатора. Під час будь-яких змін напруженості електричного поля всередині конденсатора магнітне поле «прив'язане» до нього й не може вийти в навколишній простір (мал. 2.173).

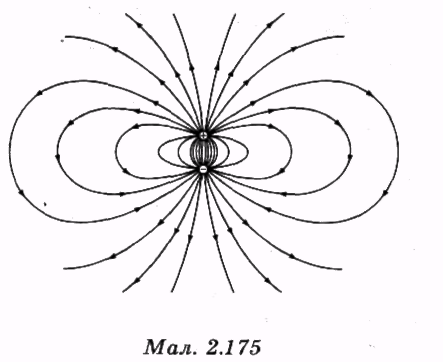


### Відкритий коливальний контур

Для випромінювання електромагнітних хвиль потрібен *відкритий коливальний контур.* Роль відкритого коливального контуру виконує антена. Антену можна уя­вити собі як відкритий коливальний кон­тур з такою самою власною частотою, як у коливальному контурі автогенератора, але пластини конденсатора цього відкритого контуру розведені на протилежні боки ко­тушки. У цьому випадку лінії напруже­ності електричного поля розподілені в про­сторі таким чином, як це зображено на мал. 2.174.

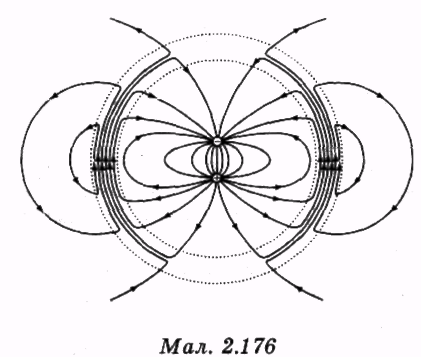


Відкритий коливальний контур1 антени на­строюється в резонанс з контуром автогене­ратора й у ньому збуджуються вимушені електричні коливання. На практиці антена являє собою два довгі металеві проводи або два стрижні, у яких збуджується змінний струм. Змінний струм в антені передавача зручно зобразити як періодичний коливальний рух двох точкових електричних зарядів протилежного знака від середини антени до її кінців і назад. Під час віддалення різно­йменних зарядів із спільної точки елект­ричне поле змінюється, зміни електрично­го поля поширюються в навколишньому просторі зі швидкістю с = 300 000 км/с і породжують вихрове магнітне поле (мал. 2.175).

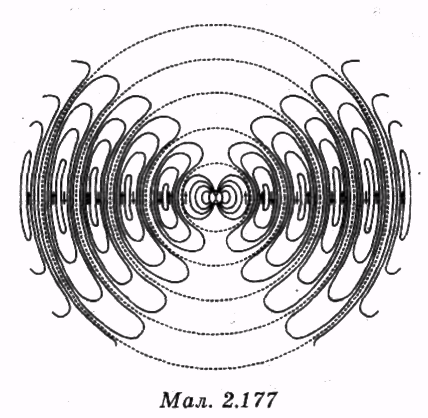


Після досягнення кінців антени заряди ру­хаються у зворотному напрямі, до середи­ни антени, а електричне та магнітне поля й далі поширюються в просторі з постій­ною швидкістю *с.* У момент зустрічі зарядів у середині антени кінці силових ліній електричного поля змикаються і формування вихрового електричного поля, не пов'яза­ного з електричними зарядами, завер­шується.

Розподіл ліній напруженості електричного поля на початку руху зарядів у протилеж­ному напрямі від середини антени зображе­но на мал. 2.176.



Розподіл електричного поля в електро­магнітній хвилі, випромінюваній антеною радіопередавача, зображено на мал. 2.177.



### Приймальна антена. Настроювання

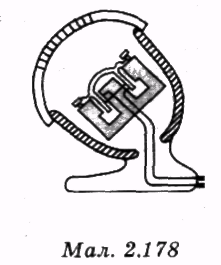
Для виявлення електромагнітної хвилі потрібна *приймальна антена,* пов'язана з контуром з власною частотою вільних ко­ливань, яка збігається з частотою електро­магнітної хвилі, що приймається. Для *на­строювання* контуру приймача на частоту приймальної хвилі, що приймається, в ньо­му звичайно використовують конденсатор змінної ємності.

Електромагнітна хвиля, що досягла анте­ни, збуджує в ній вимушені електро­магнітні коливання й через неї в коливаль­ному контурі приймача. Якщо власна час­тота контуру та частота електромагнітної хвилі збігаються, то можна спостерігати електричний резонанс, контур найефек­тивніше використовує енергію електро­магнітної хвилі.

### Мікрофон

Для передачі звукових сигналів за допомо­гою радіохвиль спочатку необхідно пере­творити звукові коливання на електричні. Таке перетворення здійснюється за допомо­гою *мікрофона.*

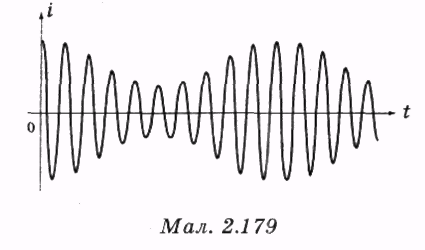
Електродинамічний мікрофон складається з постійного магніту, котушки з тонкого проводу й тонкої пружної діафрагми. Ко­тушка приклеєна до діафрагми й міститься у магнітному полі постійного магніту (мал. 2.178).



Звукові хвилі викликають вимушені коли­вання діафрагми мікрофона, разом з діаф­рагмою з тією самою частотою коливається котушка. Під час коливань у магнітному полі постійного магніту в котушці виникає індукційний змінний струм. Частота тако­го струму дорівнює частоті звукових коли­вань, а його амплітуда узгоджується з амплітудою звукових коливань.

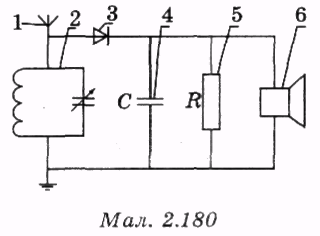
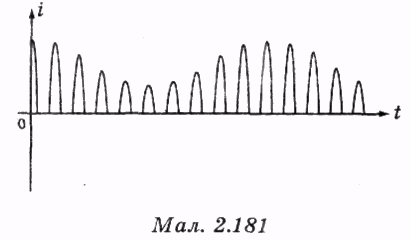
### Амплітудна модуляція

Посилаючи електричний сигнал від мікро­фона через підсилювач на генератор радіопередавача, можна здійснити *амплі­тудну модуляцію* електромагнітних коли­вань. Під час цього в антені радіопередава­ча амплітуда високочастотних коливань змінюється зі звуковою частотою. Такі ко­ливання називають амплітудно-модульова­ними (мал. 2.179).

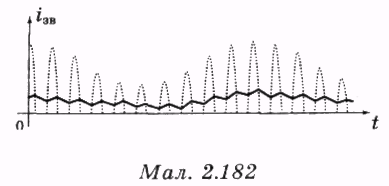


### Детектор

Схему найпростішого детекторного прий­мача зображено на мал. 2.180. В антені 1 приймача електромагнітні хвилі від усіх можливих джерел збуджують електро­магнітні коливання. Змінюючи елект­роємність конденсатора в коливальному контурі 2, можна настроїти приймач на потрібну хвилю. Діод 3 служить *детекто­ром.* Він пропускає струм тільки в одному напрямі, здійснюючи детектування амплі­тудно-модульованого змінного струму. У результаті в колі діода електричний струм проходить у вигляді імпульсів струму одна­кової полярності, але різної амплітуди. Амплітуда імпульсів змінюється зі звуко­вою частотою (мал. 2.181).

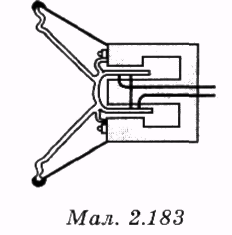


Для перетворення послідовності імпульсів струму на змінний струм звукової частоти використовують електричний фільтр з кон­денсатора 4 і резистора 5. У процесі від­повідного підбору значень електроємності конденсатора й електричного опору резис­тора конденсатор заряджається кожним імпульсом струму, але не встигає повністю розрядитися через резистор R за половину періоду високочастотних коливань — інтервал часу між двома імпульсами. Тому напруга на конденсаторі змінюється зі зву­ковою частотою (мал. 2.182).



### Динамік

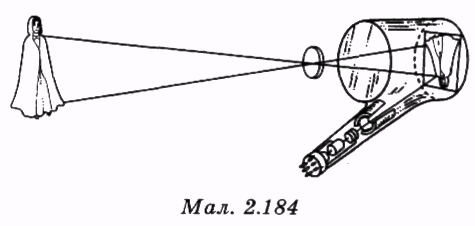
Для перетворення електричних коливань звукової частоти на звукові хвилі викорис­товують *динамік* 6. Його будова аналогічна будові електродинамічного мікрофона, тільки котушку виготовляють з товстішого проводу, розрахованого на більші значення сили струму, і діафрагма має суттєво більші розміри (мал. 2.183).



Під час пропускання змінного струму зву­кової частоти через котушку динаміка на неї діють сили Ампера з боку магнітного поля постійного магніту. Під дією цих сил котушка коливається з частотою коливань змінного струму й викликає коливання пов'язаної з нею діафрагми. Коливання діафрагми викликають періодичні підви­щення та зниження тиску повітря й поро­джують звукові хвилі.

### Телевізійний приймач

Аналогічно радіопередавачу та радіоприйма­чеві працює телевізійний передавач і *теле­візійний приймач* — *телевізор.* Проте при цьому здійснюється передача не тільки зву­кових сигналів, але й передача зображень. Щоб зрозуміти загальний принцип пере­дачі зображень на відстань розглянемо та­кий приклад. Вам потрібно терміново повідомити в інше місто, який вигляд має емблема тільки що організованої партії, а у вашому розпорядженні немає ніяких сучас­них засобів зв'язку, окрім телефону. Якщо ви досить кмітливі й винахідливі, то цього цілком вистачить. Ви малюєте емблему на аркуші міліметрового паперу й одержуєте розкладання зображення на малі елементи, що його утворюють. Відповідно до вашого завдання ви вибираєте розміри одного еле­мента, число елементів в одному рядку роз­кладання й необхідну кількість рядків. Після цього ви телефонуєте людині, яка терміново хоче одержати зображення емб­леми, і кажете їй ось що. «Поклади перед собою аркуш міліметрового паперу. Приготуй три фломастери: черво­ний, зелений і синій. А тепер починай ста­вити крапки по порядку на кожній міліме­тровій клітці в першому горизонтальному рядку. Починаємо: червоний, червоний, синій зелений. Перший рядок закін­чився. Починаємо другий рядок. Синій, синій, ...» і т.д. до кінця останнього рядка розкладання. Завдання розв'язане. Аналогічно воно розв'язується в процесі передачі й приймання телевізійних зобра­жень. Об'єктив створює зображення на спеціальному екрані передавальної те­левізійної камери (мал. 2.184).



Під дією світла з поверхні екрана вирива­ються електрони, поверхня екрана набуває позитивного заряду. Заряди різних ділянок екрана різні, картина розподілу зарядів по поверхні екрана відповідає картині світло­вого зображення.

Завдання зчитування інформації про одер­жане зображення на екрані розв'язує елек­тронний промінь. Електронний промінь пробігає екраном передавальної трубки 625 разів за 1/25 секунди, спускаючись з кож­ним рядком усе нижче по кадру зображен­ня. Під час кожного пробігання променя екраном передавальної трубки сила струму в колі екрана змінюється відповідно до на­громадженого на кожному елементі екрана позитивного заряду. Ці зміни струму вико­ристовують для модуляції сигналу, що по­силає телевізійний передавач. У телевізійному приймачі під час надхо­дження сигналу від передавача електрон­ний промінь під дією керувальних магніт­них полів починає рухатися по першому з 625 рядків телевізійного кадру. Інтен­сивність електронного променя і, відповід­но яскравість точок на екрані телевізора, у процесі переміщення променя вздовж ряд­ка регулюється сигналом, одержаним від телевізійного передавача. Так рядок за рядком будується все зображення кадру (мал. 2.185).



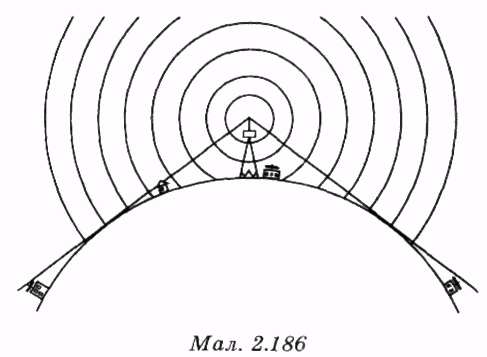
Для одержання кольорового телевізійного зображення використовують три переда­вальні трубки з червоним, зеленим і синім світлофільтрами. Сигнали, що надходять від них, у кольоровому телевізорі керують трьома електронно-променевими гармата­ми. Кожний з трьох електронних променів створює своє зображення — червоне, зеле­не, синє. Ці зображення одержують окремо тому, що кожний з трьох променів потрап­ляє в тільки для нього призначені ділянки — комірки, покриті кристалами різного ти­пу, які світяться під ударами електронів відповідно червоним, зеленим, синім коль­ором. Ці комірки можна побачити на ек­рані ввімкненого телевізора за допомогою звичайної лупи. Усього на екрані кольоро­вого телевізора є 500000 таких комірок для кожного з трьох кольорів. Суміш трьох ко­льорів у різних пропорціях здатна відтво­рювати для людського ока всі відтінки ко­льорів, які ми бачимо. Телевізійні передачі здійснюються на час­тоті від 50 МГц до 230 МГц.

### Радіолокатор.

Властивість відбивання електромагнітних хвиль використовують на практиці для визначення місцеположення кораблів і літаків, ракет і космічних кораблів. Прилади, які посилають радіохвилі в зада­ному напрямі та які приймають відбитий сигнал, називають *радіолокаторами.* Від­стань / до літака можна визначити, вимі­рявши час *t* між моментом відправлення й повернення відбитого сигналу:



Радіозв'язок на Землі має свої особливості в кожному діапазоні електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі не проникають у провідні тіла, тому вони не проникають і крізь провідні тіла, що трапляються на їхньому шляху. Оскільки Земля є провід­ним тілом, за межі прямої видимості пере­давальної антени електромагнітні хвилі, які вона посилає, не повинні проникати. Так відбувається й у випадку телевізійних передавачів і УКХ-радіопередавачів. Для збільшення дальності приймання будують високі передавальні антени й використову­ють транслятори, які ловлять і знову пере­дають сигнал далі (мал. 2.186).



Радіозв'язок на довгих хвилях можливий далеко за межами прямої видимості. Цей ефект для довгих хвиль завдовжки при­близно кілометр зумовлений явищем ди­фракції радіохвиль, тобто відхиленням їхнього поширення від прямолінійного напряму біля межі перешкоди. Ефект ди­фракції спадає зі зменшенням довжини хвилі й тому не помітний в інших діапазо­нах радіохвиль.

### Йоносфера

На коротких хвилях завдовжки декілька десятків метрів зв'язок виявився можли­вим на дуже далеких відстанях. Ця особ­ливість коротких хвиль зумовлена впливом *йоносфери* — шару атмосфери на висоті приблизно від 50 кілометрів і вище. Йоно­сфера йонізується ультрафіолетовим і рент­генівським випромінюванням Сонця, кон­центрація вільних електронів у ній на ви­соті 250-400 км досягає 5 106 в кубічному сантиметрі. У результаті йоносфера має властивість провідності й може відбивати електромагнітні хвилі. Найбільше відби­вання можна спостерігати в діапазоні ко­ротких хвиль. Унаслідок кількох відбивань від йоносфери й поверхні Землі короткі хвилі можуть досягати будь-якої точки на поверхні Землі (мал. 2.187).

**»**

## [§54. Елементи теорії відносності](" \l "Зміст)

### Принцип відносності Галілея

Розглядаючи механічні явища з різних си­стем відліку, Г. Галілей дійшов висновку, що *в будь-яких рухомих рівномірно одна відносно одної інерціальних системах відліку всі механічні явища відбуваються однаково за однакових початкових умов.* Це твердження називають *принципом відносності Галілея.*

З відкриттям електромагнітних хвиль і встановленням електромагнітної природи світла виникла проблема застосування принципу відносності до електромагнітних явищ. Відповідно до законів електродинаміки в теорії Максвелла швидкість поширення електромагнітних хвиль має бути постій­ною, незалежною від швидкості руху дже­рела хвиль і спостерігача. Відповідь на питання, чи залежить на­справді швидкість світла від вибору систе­ми відліку, можна було одержати тільки з досліду.

### Спеціальна теорія відносності

Досліди Майкельсона та інших дослідників показали, що швидкість світла у вакуумі не залежить від швидкості руху спостеріга­ча, вона постійна й однакова в усіх інерціальних системах відліку. Факт постійності швидкості світла в різних сис­темах відліку суперечить класичному зако­нові додавання швидкостей. Вихід з цієї суперечності знайшов Альберт Ейнштейн 1905 року шляхом створення теорії, яку назвали *спеціальною теорією відносності.* В основу цієї теорії Ейнштейн поклав два постулати, що були узагальненням фактів, отриманих з дослідів.

1. Принцип відносності — *будь-які фізичні процеси відбуваються однаково в різних інерціальних системах відліку (за одна­кових початкових умов).*
2. Принцип постійності швидкості світла— *швидкість світла у вакуумі не зале­жить від швидкості руху джерела й спо­стерігача.*

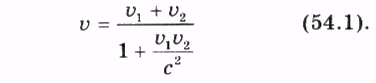
Принцип відносності, поширений на всі фізичні явища, зокрема й на електро­магнітні явища, називають *принципом відносності Ейнштейна.*

### Релятивістські явища

Визнання постулатів теорії відносності спричинює зміну уявлень про властивості простору й часу, що прийняті в класичній фізиці. Явища, які описує теорія віднос­ності, але які суперечать класичній фізиці, називають *релятивістськими явищами* або *релятивістськими ефектами.*

### Релятивістський закон додавання швидкостей

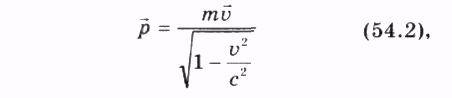
Суперечність між постулатом про постій­ність швидкості світла та класичним зако­ном додавання швидкостей теорія віднос­ності розв'язала встановленням релятивістського закону додавання швидкостей. Розгляд залежності координат тіла й часу від вибору системи відліку в рамках теорії відносності показав, що швидкість *v* тіла в нерухомій системі відліку пов'язана з його швидкістюв рухомій системі відліку та швидкістюруху системи відліку таким виразом:



Цей закон додавання швидкостей назива­ють релятивістським законом додавання швидкостей. Символом *с* у ньому позначе­но швидкість світла у вакуумі. З релятивістського закону додавання швид­костей випливає, що швидкість *v* руху тіла в нерухомій системі відліку завжди менша за суму швидкостейтіла в рухомій сис­темі відліку та швидкостіруху системи відліку. Проте за умовирелятивістський закон додавання швидкостей (54.1) з високим ступенем точності збіга­ється з класичним законом додавання швидкостей (7.1). Для опису руху тіл зі швидкостями, які близькі до швидкості світла, — елементарних частинок, атомних ядер — класичний закон додавання швид­костей у принципі неприйнятний. З релятивістського закону додавання швид­костей випливає, що швидкість світла у ва­куумі однакова в усіх системах відліку.

### Релятивістський імпульс

З теорії відносності випливало, що вектор­на сума добутків мас тіл на їхні швидкості в замкненій системі не є величиною, що зберігається, отже, класичний закон збере­ження імпульсу не має виконуватися, як­що швидкості тіл близькі до швидкості світла. Величиною, що зберігається, у замкненій системі при будь-яких швидкос­тяхруху тіл відповідно до теорії віднос­ності повинна бути векторна сума величини



де *т* — маса тіла, *v* — швидкість руху тіла, с — швидкість світла у вакуумі. Величинуяка визначається виразом (54.2), називають *релятивістським імпульсом.*

Під час експериментів з дослідження взаємодій елементарних частинок, атомів і атомних ядер, що рухаються зі швидкостя­ми, близькими до швидкості світла, перед­бачення теорії відносності про збереження релятивістського імпульсу під час будь-яких взаємодій повністю підтвердилося. *Закон збереження релятивістського ім­пульсу* є фундаментальним законом приро­ди. Якщо значення швидкостей тіл значно менші за швидкість світла у вакуумі, реля­тивістський імпульс тіла мало відрізня­ється від класичного імпульсу. Тому кла­сичний закон збереження імпульсу з вели­ким ступенем точності виконується за умо­виВін є окремим випадком універ­сального закону природи — закону збере­ження релятивістського імпульсу.

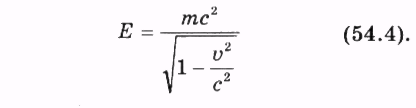
### Власна енергія тіла

Одним із найважливіших наслідків теорії відносності був висновок про існування *власної енергії тіл.* Згідно з цим висновком усяке тіло масою *т* у стані спокою має власну енергіющо дорівнює добуткові маси *т* тіла на квадрат швидкості світла у вакуумі:



### Повна енергія тіла. Релятивістська енергія тіла

*Повну енергію Е* тіла в стані руху назива­ють *релятивістською енергією тіла.* Реля­тивістська енергія *Е* тіла залежить від ма­си *т* тіла й швидкості *v* його руху:



### Кінетична енергія

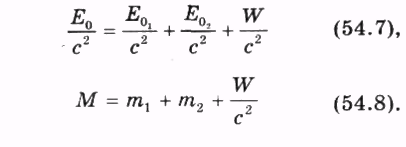
Різницю між релятивістською енергією *Е* рухомого тіла та його власною енергією називають кінетичною енергієютіла:

З теоріївідносності випливає, що маса сис­теми взаємодіючих тіл не дорівнює сумі мас тіл, які входять до системи. Для двох тіл масою  що взаємодіють одне з одним і перебувають у спокої, потенціальна енергія взаємодії дорівнює *W,* власні енергії тіл 

Власна енергіясистеми цих двох тіл дорівнює:



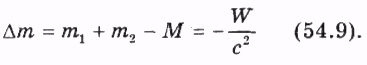
Поділивши ліву й праву частини рівняння (54.6) на квадрат швидкості світла, одер­жимо:



### Дефект мас

Вираз (54.8) показує, що маса *М* системи взаємодіючих тіл не дорівнює сумі мас 

 тіл, які входять до системи. Різницю  суми мас вільних тіл і маси системи взаємодіючих тіл називають *дефек­том мас:*

**

Дефект мас має позитивне значення, якщо енергія взаємодії тіл *W* має негативний знак *(W <* 0, діють сили притягання). Як­що енергія взаємодії тіл має позитивний знак *(W >* 0, діють сили відштовхування), то дефект мас має негативне значення.

### Зміна повної енергії системи

*Зміна повної енергії системи *під час будь-яких взаємодій тіл усередині системи дорівнює добуткові дефекту мас на квадрат швидкості світла с у вакуумі:



Гіпотеза Ейнштейна про існування власної енергії тіл і взаємозв'язок маси та енергії повністю підтверджена численними експе­риментами й практикою успішної роботи ядерних енергетичних установок, приско­рювачів заряджених частинок, усі розра­хунки яких виконують на основі викорис­тання релятивістських законів.