

24 ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ

§ 24.1. Основні положення теорії Максвелла

До 1860 р. були вивчені чотири основні закони електромагнетизму:

1. Теорема Остроградського-Гаусса для електричного поля, яка встановлює точне співвідношення між потоком напруженості Φ_E електричного поля через замкнуту поверхню і сумарним зарядом $\sum Q_i$ всередині цієї поверхні:

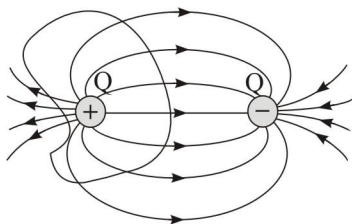


Рис. 24.1

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q_i}{\epsilon_0}, \quad (24.1)$$

тобто потік напруженості Φ_E електричного поля через замкнуту поверхню дорівнює повному заряду $\sum Q_i$, розміщеного всередині цієї поверхні, поділеного на ϵ_0 (див.

формулу (17.13)), або

$$\text{поле } E = \frac{\text{повне число ліній}}{\text{площа}} = \frac{d\Phi_E}{dS}. \quad (24.1, \text{ а})$$

2. Теорема Остроградського-Гауса для магнітного поля:

$$\Phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0. \quad (24.2)$$

Вона відображає той факт, що із замкнутого об'єму виходить стільки силових ліній індукції магнітного поля, скільки входить в нього. Це результат того, що магнітних зарядів не існує. Силові лінії індукції магнітного поля неперервні; у

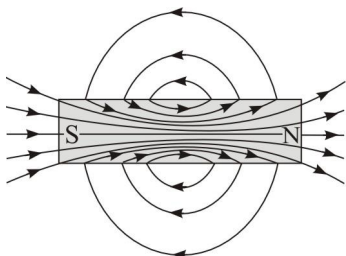


Рис. 24.2

магнітного стержня, наприклад, індукція магнітного поля \vec{B} існує як ззовні, так і в середині нього, і силові лінії магнітного поля \vec{B} утворюють замкнуті контури (рис. 24.2). Або

$$\text{поле } B = \frac{\text{повне число ліній}}{\text{площа}} = \frac{d\Phi_B}{dS}. \quad (24.2, \text{ а})$$

Ці два закони відносяться до статичних ситуацій. В термінах ліній поля вони зв'язують електричні і магнітні поля з їх нерухомими джерелами. Лінії електричного поля починаються на додатних зарядах і закінчуються на від'ємних. Оскільки магнітних зарядів не існує, то як уже відмічалось вище, лінії магнітного поля повинні бути неперервними.

3. Третій закон, відкритий Фарадеєм, це закон електромагнітної індукції

$$\mathcal{E}_i = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{або} \quad \mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (24.3)$$

Згідно закону електромагнітної індукції Фарадея (§ 21.3) зміна магнітного поля призводить до появи електричного поля (рис. 24.3). Максвелл висловив гіпотезу: оскільки справедливе вище сформульоване, то повинно бути справедливим і зворотне – **зміна електричного поля повинна супроводжуватися виникненням магнітного поля.**

4. Згідно четвертого закону, який був встановлений Ампером, замкнуті лінії магнітного поля створюються рухомими електричними зарядами, тобто електричним струмом (рис. 24.4):

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad \text{або} \quad \sum \vec{B} \cdot \Delta\vec{l} = \mu_0 I. \quad (24.4)$$

Ці чотири рівняння (24.1 – 24.4) разом були розглянуті Максвеллом, де він виявив елементи симетрії між електричними і магнітними полями. Але симетрія була не повна. Зокрема, як уже відмічалось, в природі не існує магнітних зарядів, а тому не існує магнітних струмів. В цих рівняннях є ще одна прогалина. Третє рівняння описує процеси, які відбуваються при зміні в часі магнітного поля. Але в рівняннях немає відповідного члена, який описував би процеси, які відбуваються при зміні в часі електричного поля. Про цю трудність і шляхи її подолання Максвеллом мова піде в наступному параграфі.

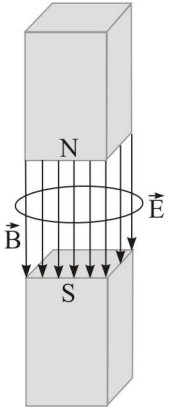


Рис. 24.3

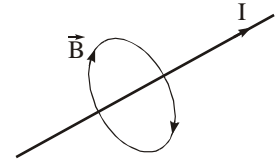


Рис. 24.4

§ 24.2. Струм зміщення

Трудність, про яку йшла мова в кінці § 24.1, виникає, коли електричне коло змінного струму містить конденсатор. Коли струм заряджає конденсатор, навколо підвідних провідників, по яких тече струм, існують силові лінії магнітного поля. Однак, в просторі між обкладками конденсатора струм провідності відсутній.

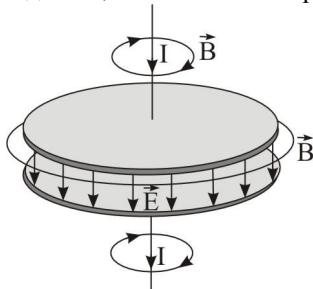


Рис. 24.5

Струм провідності на обкладці конденсатора обривається. Таким чином, струм провідності, який тече по провіднику, що з'єднує обкладки конденсатора, виявиться розірваним. Згідно закону Ампера в тому вигляді, як він сформульований, в просторі між обкладками конденсатора не повинно бути ніяких ліній магнітного поля. Така різка зміна магнітного поля була б протиприродна. Оскільки в процесі зарядки конденсатора електричне поле між його обкладками змінюється, Максвелл припустив, що це змінне електричне поле **еквівалентне** електричному струму, який він назвав **струмом зміщення** I_D .

Навколо струму зміщення (змінного електричного поля), як і навколо струму провідності, виникає магнітне поле (рис. 24.5). Враховуючи це, закон Ампера зараз можна записати у вигляді

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I + I_D). \quad (24.5)$$

Струм зміщення I_D можна виразити через змінне електричне поле між обкладками конденсатора. Якщо врахувати, що заряд Q на конденсаторі дорівнює $Q = CU$, де U – різниця потенціалів між обкладками конденсатора, C – його ємність, $U = Ed$, а $C = \epsilon_0 S / d$,

де E – напруженість електричного поля між обкладками конденсатора, d і S – відповідно відстань між обкладками і площа кожної із обкладок конденсатора, отримаємо:

$$Q = CU = \varepsilon_0 \frac{S}{d} Ed = \varepsilon_0 SE.$$

Якщо заряд на обкладках змінюється, то відповідно змінюється і напруженість поля. Продиференціювавши останній вираз, отримаємо:

$$\frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 S \frac{dE}{dt},$$

де dQ/dt – швидкість нагромадження або зменшення заряду на обкладці конденсатора. Інакше, це струм, що втікає в конденсатор або витікає з нього. Цей струм і є струмом зміщення I_D між обкладками:

$$I_D = \frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 S \frac{dE}{dt}, \quad (24.6)$$

або

$$I_D = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad (24.7)$$

де $\Phi_E = SE$ – **потік напруженості електричного поля**. Враховуючи (24.7), четверте рівняння ((24.4), закон Ампера) набуде такого закінченого вигляду:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (24.8)$$

Таким чином, змінне електричне поле в конденсаторі призводить до такого ж самого результату, що і струм у з'єднувальному провіднику. Лінії магнітного поля, які охоплюють зазор конденсатора, будуть такими ж, як і навколо підвідних провідників. Формула (24.8) отримана для часткового випадку, але вона справедлива і для загального випадку, хоч струм зміщення дуже малий. Поряд із поняттям струму провідності та струму зміщення Максвелл ввів в розгляд поняття **повного струму**, густина якого визначається як геометрична сума густини струму провідності і густини струму зміщення:

$$\vec{j} = \vec{j}_{np} + \vec{j}_{зм}. \quad (24.9)$$

Повний струм завжди є замкнутим, тому густина струму провідності і густина струму зміщення однакові, однакові і їх напрямки, а це означає, що повний струм біля поверхонь обкладок конденсатора не терпить змін (рис. 24.6).

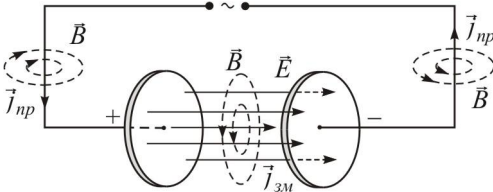


Рис. 24.6

Таким чином, можна вважати, що струм зміщення описує певні реальні властивості електромагнітного поля. **Згідно гіпотези Максвелла струм зміщення створює в просторі, що його оточує, магнітне поле таке ж, як і магнітне поле еквівалентного струму провідності** (рис. 24.6).

Однак струм зміщення еквівалентний струму провідності тільки у відношенні утворювати магнітне поле. У всіх інших відношеннях струм зміщення не може бути уподібнений струму провідності, наприклад, при проходженні струму зміщення не виділяється лентц-джоулева теплота.

§ 24.3. Електромагнітне поле

З наведеної в попередньому параграфі гіпотези Максвелла струм зміщення, як і струм провідності, утворює магнітне поле. Однак, струм зміщення виникає тільки тоді, коли є в наявності змінне в часі електричне поле. Таким чином, ми приходимо до висновку, що **будь-яке змінне в часі електричне поле зв'язано з наявністю магнітного поля.**

Експериментально існування магнітного поля струму зміщення було виявлено у 1903 р. російським фізиком О.О. Ейхенвальдом (1864 – 1944).

Електростатичне поле, тобто поле нерухомих і незмінних за величиною зарядів, діє тільки на електричні заряди і ніяких магнітних дій не виявляє. Однак, якщо заряди рухаються один відносно одного або змінюються за величиною, то змінюється і створюване ними електричне поле, і тоді виникають поряд з електричними і магнітні дії. Оскільки змінне електричне поле завжди має змінну похідну по часу, тобто створює змінний струм зміщення,

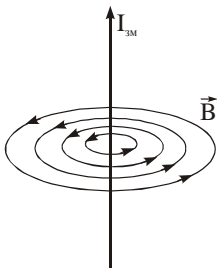


Рис. 24.7

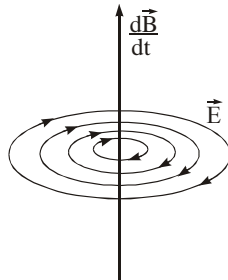


Рис. 24.8

яке виникає при цьому, також змінне в часі. Таким чином, простір, заповнений змінним електричним полем, одночасно заповнений і змінним магнітним полем. Дальші роздуми показують, що і змінне магнітне поле в свою чергу обумовлює утворення змінного електричного поля.

Таким чином, якщо змінне магнітне поле призводить до появи електричного поля, то електричне поле також буде змінюватися. Ця зміна електричного поля призведе

в свою чергу до появи змінного магнітного поля і т. д. Обидва змінні поля – електричне і магнітне – незмінно зв'язані одне з одним і утворюють **електромагнітне поле.**

Електромагнітне поле носить **вихровий (замкнутий) характер**. Поле певного вектора \vec{A} називають вихровим, якщо в ньому існують дві такі нескінченно близькі точки, в яких вектор \vec{A} має протилежні напрямки.

Розглянемо спершу вихровий характер магнітного поля. В магнітному полі струмів зміщення лінії магнітної напруженості мають такий же вигляд, що і поблизу аналогічних струмів провідності, тобто вони замкнуті і охоплюють лінії струму. Якщо в границі ми перейдемо до точок, розміщених нескінченно близько до лінії струму (рис. 24.7), то кривизна ліній магнітної напруженості буде нескінченно велика, і, значить, можна знайти дві нескінченно близькі точки, в яких напруженість магнітного поля має прямо протилежні напрямки.

Електричне поле, яке створюється змінним магнітним полем, також має вихровий характер. Нехай в деякій точці існує змінне магнітне поле, яке на рис. 24.8 зображено вектором $d\vec{B}/dt$. Якщо оточити $d\vec{B}/dt$ провідним контуром, площа якого розміщена перпендикулярно до $d\vec{B}/dt$, то в ньому виникне ЕРС індукції, напрямком якої визначається за правилом Ленца. Однак, виникнення ЕРС індукції зобов'язане існуванню електричного поля, напруженість \vec{E} якого в кожній точці співпадає з напрямком ЕРС. Значить, лінії напруженості \vec{E} електричного поля утворюють навколо вектора $d\vec{B}/dt$ концентричні кола. Для точок, нескінченно близьких до вектора $d\vec{B}/dt$, кривизна кіл буде нескінченно велика, і, значить, будуть існувати такі дві сусідні точки, в яких вектори напруженості електричного поля прямо протилежні. Таким чином, **електричне поле, яке створюється змінним магнітним полем, також має вихровий характер.** Його лінії

напруженості завжди замкнуті. Цим воно суттєво відрізняється від електростатичного поля нерухомих зарядів, лінії напруженості якого не замкнуті: вони починаються на додатних, а закінчуються на від'ємних зарядах. Магнітне поле завжди носить вихровий характер.

Електромагнітне поле матеріальне. Фізика знає дві форми матерії – **речовина** (тверда, рідка, газоподібна) і **поле** (гравітаційне, електромагнітне, ядерне). Матеріальність електромагнітного поля підтверджується тим, що воно є носієм і передатчиком енергії. Ця енергія завжди в наявності, оскільки, якщо відсмоктати насосом речовинну - матерію, то залишиться, за висловом Максвелла, найтонша матерія, яка здатна передавати електричні або світлові дії.

§ 24.4. Рівняння Максвелла

На основі вище викладеного зараз можна записати рівняння Максвелла, які описують електромагнітні явища в будь-якому середовищі. Вони є результатом узагальнення експериментальних і теоретичних результатів досліджень фізиків першої половини XIX ст. і, насамперед, досліджень М. Фарадея. Основні закони електродинаміки Максвелл сформулював у вигляді рівнянь, які подамо в найбільш простій і наочній інтегральній формі. Рівняння були записані Максвеллом у 1865 році. Їх чотири. У відсутності діелектриків і магнетиків рівняння Максвелла мають вигляд:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q_i}{\varepsilon_0}, \quad (24.10)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0, \quad (24.11)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (24.12)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (24.13)$$

Перші два рівняння Максвелла – це теорема Остроградського-Гаусса відповідно для електричного (ф-ла (17.13)) і магнітного (ф-ла (21.2)) полів. Третє – закон електромагнітної індукції Фарадея (формула (21.3)) і четверте – закон Ампера, узагальнений Максвеллом (формула (24.8)).

Фізичний зміст рівнянь Максвелла в наступному: 1) узагальнений закон Кулона (24.10) зв'язує електричне поле з його джерелом, електричними зарядами; 2) математичне вираження факту відсутності ізолюваних магнітних зарядів: силові лінії магнітного поля неперервні (замкнуті) (24.11); 3) зміна магнітного поля породжує електричне поле (24.12); 4) магнітне поле створюється струмом або змінним електричним полем.

Однак, наведені вище рівняння Максвелла не враховують будову речовини і взаємодію електромагнітного поля з частинками речовини. Оскільки вплив середовища на електромагнітне поле задається через електропровідність, діелектричну та магнітну проникності, до рівнянь (24.10 – 24.13) слід додати рівняння (17.64), (18.24) і (20.5), які називають матеріальними:

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (24.14)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (24.15)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (24.16)$$

Вони описують не тільки велике коло явищ електродинаміки, але й оптики, електро- і радіотехніки, астрофізики тощо. Теорія Максвелла не тільки пояснила відомі факти, але і передбачила нові важливі явища, зокрема припущення про магнітні поля струмів зміщення, яке згодом було блискуче підтверджено експериментально.

Рівняння Максвелла виражають основні закони електромагнетизму. Вони такі ж фундаментальні, як закони руху і закон всесвітнього тяжіння Ньютона в механіці.

Важливим наслідком теорії електромагнітного поля Максвелла є виникнення **електромагнітних хвиль**.

§ 24.5. Електромагнітні хвилі



Герц Генріх Рудольф (1857 – 1894) – німецький фізик. Народився в Гамбурзі. Вчився в Мюнхенському і Берлінському університетах.

Наукові роботи відносяться до електродинаміки. Експериментально підтвердив існування електромагнітних хвиль теоретично передбачених Максвеллом. У 1887 р. спостерігав зовнішній фотоефект, досліджував катодні промені. Вніс великий вклад в розвиток загальної теорії електромагнітних явищ в рухомих тілах.

Вище було показано, що змінне електричне поле породжує у вільному просторі магнітне поле, а змінне магнітне поле породжує електричне поле. Аналізуючи далі свої рівняння, Максвелл дійшов висновку, що результатом подібного зв'язку змінних полів буде поява хвилі, яка містить електричне і магнітне поля і здатна поширюватися у вільному просторі. Миттєве зображення електромагнітної хвилі показано на рис. 24.9. Вся ця картина з часом рухається вправо зі швидкістю v . Електромагнітні хвилі володіють такими важливими властивостями:

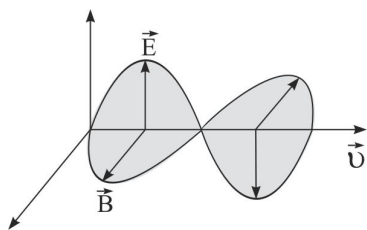


Рис. 24.9

1. Вектори змінного електричного \vec{E} і магнітного \vec{B} полів плоскої електромагнітної хвилі всюди взаємно перпендикулярні ($\vec{E} \perp \vec{B}$).

2. Напрямок поширення електромагнітної хвилі (напрямок вектора \vec{v}) визначається за правилом правого гвинта: хвиля поширюється в напрямку поступального руху гвинта, коли гвинт повертається в напрямку від вектора \vec{E} до вектора \vec{B} (рис. 24.9).

3. Електромагнітні хвилі є **поперечними хвилями**: вектори \vec{E} , \vec{B} і \vec{v} завжди взаємно перпендикулярні, тобто вектори \vec{E} і \vec{B} коливаються перпендикулярно до напрямку поширення (рис. 24.9).

4. Швидкість поширення всіх видів електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (24.17)$$

і в середовищі

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0\epsilon\mu}}, \quad (24.18)$$

де ϵ_0 і μ_0 – відповідно електрична і магнітна сталі, ϵ і μ – діелектрична і магнітна проникності середовища.

5. Електромагнітні хвилі переносять енергію і кількість руху (імпульс).

Експерименти, які підтвердили передбачення Максвелла, вперше були виконані молодим німецьким фізиком Генріхом Герцем в 1887 р., приблизно через 25 років після передбачень Максвелла, невдовзі після його смерті. Він сконструював прилад (вібратор Герца), який складався із двох стержнів з кульками на кінцях, розділених невеликим проміжком, в якому виникав іскровий розряд. Приймачем служив розрізаний навпіл диполь, довжина якого дорівнює половині довжини хвилі, розділений посередині маленьким повітряним проміжком (рис. 24.10). В такий спосіб Герц в перших своїх дослідах отримав електромагнітні хвилі з довжиною хвилі 1 м. Досліди Герца показали, що отримані ним хвилі у всіх відношеннях схожі зі світловими хвилями, відрізняючись від них лише більшою довжиною хвилі.

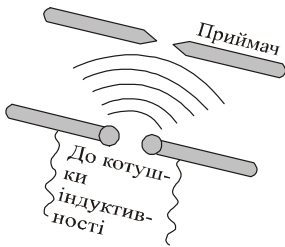


Рис. 24.10

Процеси, які відбуваються у вібраторі Герца і довкола нього можна описати так.

Електромагнітні хвилі виникають і поширюються завдяки прискореному руху електричних зарядів (здебільшого електронів) і тому, щоб отримати електромагнітні хвилі, необхідно створити прискорений рух електронів. Такий рух електрони здійснюють в коливальному контурі (§ 23.1).

Розглянемо диполь, який складається з двох довгих провідників (металічних стержнів), з кульками на кінцях. Такий диполь-вібратор називають **відкритим коливальним контуром**, в якому котушка замінена прямим провідником, розділеного повітряним проміжком між кульками. Якщо такий диполь під'єднати до генератора змінного струму (рис. 24.11), то електрони, які до цього були рівномірно розподілені по стержнях диполя, почнуть здійснювати швидкі коливання так, що в диполі виникне електричний струм дуже високої частоти. В результаті в просторі, що оточує диполь-вібратор, поки існує струм, будуть виникати змінні електричні і магнітні поля, тобто електромагнітні хвилі, які відділяючись від диполя-вібратора і як самостійні утворення поширюються в просторі. На рис. 24.12 показано послідовні картини електричного і магнітного полів, які поширюються від диполя-вібратора, з'єданого з джерелом змінного струму (генератором). Силі лінії електричного поля показані на рисунку суцільними лініями, вектор індукції \vec{B} магнітного поля позначений значком \otimes , коли він направлений перпендикулярно до площини сторінки книги (від читача) і \odot , коли він направлений перпендикулярно від площини сторінки книги (до читача).

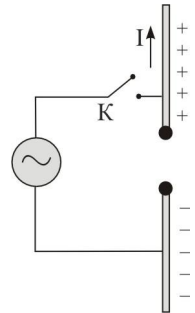


Рис. 24.11

Експериментуючи далі з електромагнітними хвилями, Герц спостерігав їх відбивання, інтерференцію, поляризацію. Він встановив, що швидкість поширення електромагнітних хвиль дорівнює швидкості світла. Досліди Герца зіграли величезну роль у визнанні теорії Максвелла і її утвердження. Услід за експериментом Герца були отримані електромагнітні хвилі з більшими частотами. Виявилось, що можна генерувати хвилі будь-якої частоти, якщо мати спосіб збудження електричних зарядів з відповідною частотою коливаль. Сьогодні добре відомо, що немає ніяких фізичних меж, які б обмежували частоту електромагнітних хвиль, проте потрібно мати необхідне джерело коливаль. За

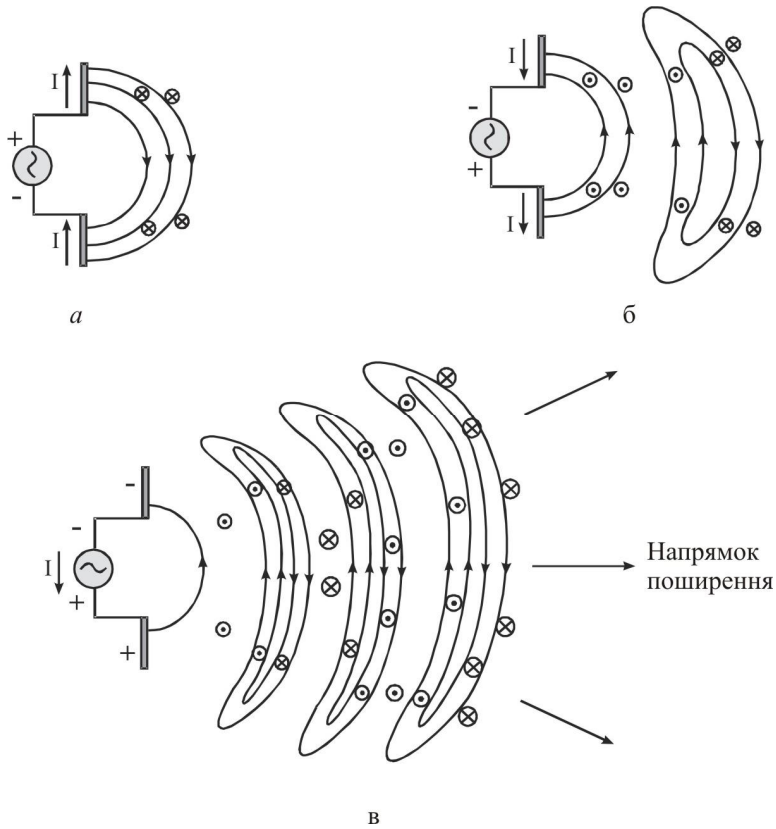


Рис. 24.12

допомогою електричних методів можна генерувати електромагнітні хвилі з частотами аж до 10^{12} Гц ($\lambda = 0,3$ м). Цей діапазон частот поділяється на **радіохвилі** і **ультракороткі хвилі** (таблиця 24.1). Радіохвилі використовують в радіомовленні, телебаченні, повітряному і морському зв'язку. Ультракоткі хвилі використовують в радіолокації і радіорелейному зв'язку.

Таблиця 24.1

Вид випромінювання	Діапазон частот, Гц	Діапазон довжин хвиль, м
Радіовипромінювання	$10^3 - 10^9$	$10^5 - 10^{-1}$
Ультракоткі хвилі	$10^9 - 10^{12}$	$10^{-1} - 10^{-4}$
Інфрачервоне випромінювання	$10^{12} - 10^{14}$	$10^{-4} - 10^{-6}$
Видиме світло	$10^{14} - 10^{15}$	$10^{-6} - 10^{-7}$
Ультрафіолетове випромінювання	$10^{15} - 10^{18}$	$10^{-7} - 10^{-9}$
Рентгенівські промені	$10^{18} - 10^{20}$	$10^{-9} - 10^{-11}$
Гамма-випромінювання	$10^{20} - 10^{22}$	$10^{-11} - 10^{-13}$

Для отримання електромагнітних хвиль з частотами, більших ультракороткохвильового діапазону, прямі електричні методи уже не годяться, і тут застосовуються методи на атомному рівні. Це інфрачервоне теплове випромінювання, видиме світло, ультрафіолетове і рентгенівське випромінювання. Межа частот, які можуть генеруватися на атомному рівні, лежить біля 10^{20} Гц. Випромінювання з частотами більше 10^{20} Гц (γ – випромінювання) генерується атомним ядром і при взаємодії частинок дуже високих енергій.

Електромагнітні хвилі всіх діапазонів за своїм характером схожі між собою, і відрізняються лише частотою. Саме частотою і визначається спосіб взаємодії електромагнітних хвиль з речовиною. Наприклад, око чутливе лише до видимого діапазону, а шкіра може відчувати інфрачервоне (теплове) випромінювання. Радіохвилі не проходять через тонку металічну пластинку, тоді як рентгенівські і γ –промені вільно проходять через неї.

Насамкінець, зауважимо, що Г. Герц, закінчивши свої дослідження з електромагнітними хвилями, записав, що не бачить можливості практичного використання електромагнітних випромінювань.

У 1895 р. російський інженер-дослідник А.С. Попов (1859–1906) винайшов радіо, а в 1896 р. італійський радіотехнік Г. Марконі (1874–1937)* сконструював прилад для бездротового телеграфу. Про застосування радіохвиль сьогодні не приходитьсь говорити: це радіозв'язок, радіомовлення, телебачення, радіолокація, включаючи і локацію планет сонячної системи, телемеханіка, включаючи і управління автоматичними космічними станціями, дослідження далеких космічних об'єктів.

* Г. Марконі за роботи по створенню бездротового телеграфу у 1909 р. присуджено Нобелівську премію з фізики.