

§ 27. ВІЛЬНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ КОЛИВАННЯ В ІДЕАЛЬНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ



Сучасне суспільство вже неможливо уявити без швидкого обміну інформацією, хоча лише кілька років тому більшість із нас обходилася без мобільного телефону та мобільного Інтернету. І не так вже й давно — понад століття тому — винайшли радіо, лише півстоліття минуло відтоді, як у наше життя ввійшло телебачення. Усі ці досягнення техніки ґрунтуються на передачі та прийманні радіосигналів. Сьогодні ви познайомитеся з фізичним пристроєм, який є обов'язковою частиною більшості радіопередавачів і радіоприймачів.



Чому і як відбуваються електромагнітні коливання у коливальному контурі

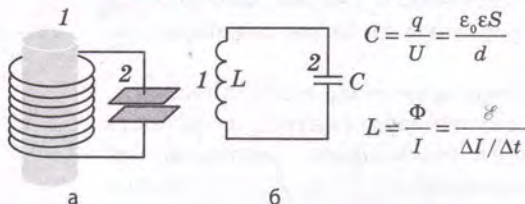


Рис. 27.1. Модель (а) та електрична схема (б) коливального контуру: 1 — котушка індуктивності; 2 — конденсатор

Коливальний контур — це фізичний пристрій, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності (рис. 27.1).

Коливальний контур є коливальною системою, тобто в ньому можуть виникати вільні електромагнітні коливання. Розглянемо механізм цих коливань.

Щоб у коливальному контурі виникли вільні коливання, системі необхідно передати енергію, наприклад зарядити конденсатор (рис. 27.2). З'єднаємо конденсатор із джерелом постійного струму з вихідною напругою U_{\max} . На обкладках конденсатора накопичиться певний електричний заряд q_{\max} , а між обкладками виникне електричне поле, енергія якого дорівнює:

$$W_{\text{ел. макс}} = \frac{CU_{\max}^2}{2} = \frac{q_{\max}^2}{2C}.$$

Якщо після зарядки конденсатор замкнути на котушку індуктивності (рис. 27.3, а), то під дією електричного поля конденсатора вільні заряджені частинки в контурі почнуть рухатися напрямлено. У контурі виникне електричний струм i , а конденсатор почне розряджатись (рис. 27.3, б).

Електричний струм завжди створює магнітне поле. Особливо сильним це поле є всередині котушки. Оскільки сила струму, що проходить через котушку, збільшується, то магнітна індукція створеного струмом магнітного поля теж збільшується. Змінне магнітне поле породжує вихрове електричне поле, яке в цьому випадку напрямлене протилежно струму, тому сила струму зростає поступово. Поступово зменшується й заряд q на обкладках конденсатора.

Таким чином, протягом першої чверті періоду енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля котушки. Повна енергія коливального контуру дорівнюватиме:

$$W = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2},$$

де q — заряд конденсатора в деякий момент часу; i — сила струму в котушці.

У той момент, коли конденсатор повністю розрядиться (рис. 27.3, в),

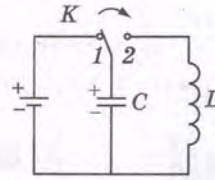


Рис. 27.2. Конденсатор заряджається, якщо ключ перебуває в положенні 1. Якщо ключ перевести в положення 2, коливальний контур замкнеться і в ньому виникнуть електромагнітні коливання

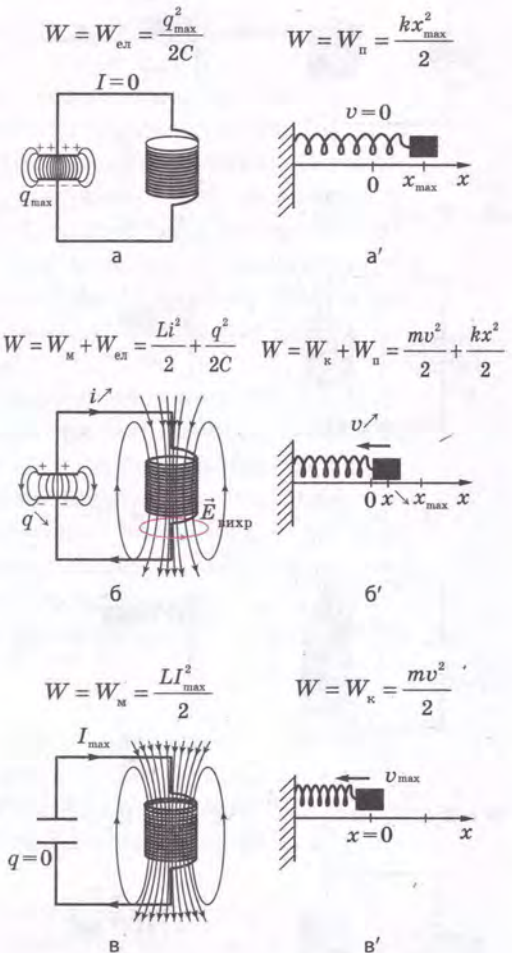
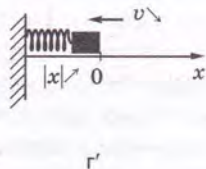
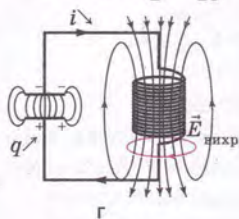


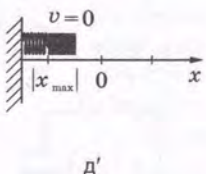
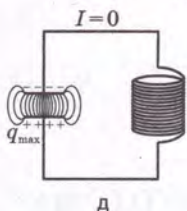
Рис. 27.3. Механізм вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі (а-з) і вільних механічних коливань тягарця на пружині (а'-з') [див. також с. 156]

$$W = W_m + W_{el} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C} \quad W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



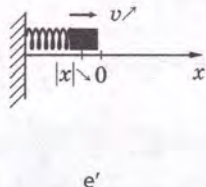
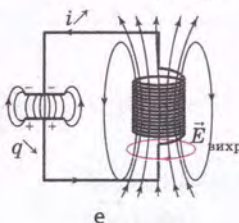
$$W = W_{el} = \frac{q_{max}^2}{2C}$$

$$W = W_k = \frac{mv^2}{2}$$



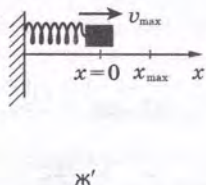
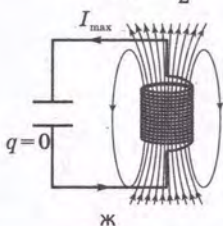
$$W = W_m + W_{el} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$$

$$W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



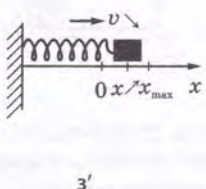
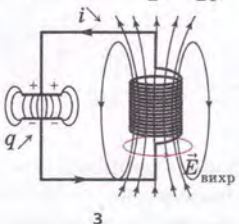
$$W = W_m = \frac{Li^2}{2}$$

$$W = W_k = \frac{mv^2}{2}$$



$$W = W_m + W_{el} = \frac{Li^2}{2} + \frac{q^2}{2C}$$

$$W = W_k + W_n = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2}$$



енергія електричного поля дорівнюватиме нулю ($W_{el} = 0$), сила струму досягне максимального значення I_{max} , а повна енергія коливального контуру дорівнюватиме:

$$W = W_{m, max} = \frac{LI_{max}^2}{2}$$

Незважаючи на те що заряд на обкладках конденсатора перетворився на нуль, струм одразу не припиниться й не змінить свого напрямку. Як тільки сила струму в котушці почне зменшуватися, зменшиться і магнітна індукція B магнітного поля, що пронизує котушку, тому виникає вихрове електричне поле, яке в цьому випадку підтримує струм. Заряджені частинки продовжують рух у тому самому напрямку, і конденсатор *перезаряджається* — заряд на його обкладках змінюється на протилежний (рис. 27.3, *г*).

Отже, протягом другої чверті періоду енергія магнітного поля котушки перетворюється на енергію електричного поля конденсатора.

Конденсатор перезаряджати-
меться, доки сила струму не досягне нуля ($i = 0$). Енергія магнітного поля котушки в цей момент теж дорівнюватиме нулю ($W_m = 0$), а енергія електричного поля конденсатора набуде максимального значення (рис. 27.3, *д*).

Наступну половину періоду характер зміни електричного заряду на обкладках конденсатора й характер зміни сили струму в контурі будуть такими самими, тільки у зворотному напрямку (рис. 27.3, *е-з*). Коли заряд на обкладках конденсатора досягне максимального значення (див. рис. 27.3, *а*), завершиться одне повне коливання.

Рис. 27.3. [Закінчення]

2 Що таке ідеальний коливальний контур

Якби не було втрат енергії, амплітуда коливань у коливальному контурі залишалася б незмінною, й коливання були б незатухаючими.

Фізична модель, що являє собою коливальний контур, у якому відсутні втрати енергії, називається **ідеальним коливальним контуром**, а коливання в ідеальному коливальному контурі — **власними коливаннями**.

Закон збереження енергії для ідеального коливального контуру можна записати так:

$$W_{\text{ел. max}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = W_{\text{м. max}} \quad \text{або} \quad \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}.$$

3 Аналогія між вільними електромагнітними і механічними коливаннями

Якщо порівняти вільні електромагнітні коливання в коливальному контурі (див. рис. 27.3, *a-z*) і механічні коливання тіла на пружині (див. рис. 27.3, *a'-z'*), то можна помітити, що коливання різної природи підпорядковуються схожим закономірностям: за відсутності опору або тертя коливання є незатухаючими; під час коливань відбувається періодичне перетворення енергії (енергія електричного поля \leftrightarrow енергія магнітного поля; потенціальна енергія \leftrightarrow кінетична енергія); періодично змінюються значення фізичних величин, що характеризують стан коливальної системи.

Зверніть увагу: *коливання схожі за закономірностями, а не за природою*. Наприклад, якщо однією з причин механічних коливань є інертність тіла, яка характеризується його масою, то однією з причин електромагнітних коливань є вихрове електричне поле, яке характеризується ЕРС самоіндукції. *Саме завдяки вихровому полю, а не інертності електрони продовжують рух у попередньому напрямку*. Маса й вільний пробіг електронів є настільки малими, що без ЕРС самоіндукції струм практично миттєво припинився б і конденсатор ніколи б не перезарядився.

4 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Ідеальний коливальний контур складається з конденсатора ємністю 0,4 мкФ і котушки індуктивністю 1,0 мГн. Конденсатор зарядили до напруги 100 В і замкнули на котушку. Визначте електричну енергію, передану конденсатору, та максимальну силу струму в котушці.

$W_{\text{ел. max}}$ — ?

I_{max} — ?

Дано:

$C = 0,4 \cdot 10^{-6}$ Ф

$L = 1,0 \cdot 10^{-3}$ Гн

$U_{\text{max}} = 100$ В

Аналіз фізичної проблеми, розв'язання. Скористаємося законом збереження енергії для ідеального коливального контуру: $W_{\text{ел. max}} = W_{\text{м. max}}$, (1)

$$\text{де } W_{\text{ел. max}} = \frac{CU_{\text{max}}^2}{2}, \text{ а } W_{\text{м. max}} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}. \quad (2)$$

З формул (1) і (2) маємо: $I_{\max} = \sqrt{\frac{2W_{\text{м. max}}}{L}} = \sqrt{\frac{2W_{\text{ел. max}}}{L}}$.

Визначимо значення шуканих величин:

$$[W_{\text{ел. max}}] = \Phi \cdot B^2 = \frac{\kappa_{\text{л}}}{B} \cdot B^2 = \kappa_{\text{л}} \cdot B = \kappa_{\text{л}} \cdot \frac{Дж}{\kappa_{\text{л}}} = Дж,$$

$$\{W_{\text{ел. max}}\} = \frac{0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2}{2} = 0,2 \cdot 10^{-2}, \quad W_{\text{ел. max}} = 2 \text{ мДж};$$

$$[I_{\max}] = \sqrt{\frac{Дж}{Гн}} = \sqrt{\frac{Дж}{B \cdot \frac{с}{A}}} = \sqrt{\frac{Дж \cdot A}{\kappa_{\text{л}} \cdot с}} = \sqrt{\frac{A \cdot \kappa_{\text{л}}}{с}} = \sqrt{\frac{A \cdot A \cdot с}{с}} = A,$$

$$\{I_{\max}\} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2}}{1,0 \cdot 10^{-3}}} = \sqrt{4} = 2, \quad I_{\max} = 2 \text{ А}.$$

Відповідь: енергія, передана конденсатору, $W_{\text{ел. max}} = 2 \text{ мДж}$; максимальна сила струму в котушці $I_{\max} = 2 \text{ А}$.



Підбиваємо підсумки

Коливальний контур — це фізичний пристрій, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора й котушки індуктивності.

Якщо обкладкам конденсатора коливального контуру передати електричний заряд, то в контурі виникнуть вільні електромагнітні коливання — періодична зміна заряду на обкладках конденсатора й сили струму в котушці. Аналогічно тому, як під час вільних механічних коливань відбувається перетворення потенціальної енергії пружини на кінетичну енергію тіла і навпаки, так і під час вільних електромагнітних коливань енергія електричного поля конденсатора перетворюється на енергію магнітного поля котушки і навпаки.

Фізична модель, що являє собою коливальний контур, у якому відсутні втрати енергії, називається ідеальним коливальним контуром. Вільні електромагнітні коливання в ідеальному коливальному контурі є незатухаючими. Закон збереження енергії для ідеального коливального контуру має вигляд:

$$W_{\text{ел. max}} = W_{\text{ел}} + W_{\text{м}} = W_{\text{м. max}} \quad \text{або} \quad \frac{q_{\text{max}}^2}{2C} = \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} = \frac{LI_{\text{max}}^2}{2}.$$



Контрольні запитання

1. Назвіть основні елементи коливального контуру. 2. Опишіть процес вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі. Значення яких фізичних величин змінюються під час цього процесу? 3. Чому після повного розрядження конденсатора струм через котушку не припиняється? 4. Які перетворення енергії відбуваються під час електромагнітних коливань у коливальному контурі? 5. Що таке ідеальний коливальний контур? 6. Запишіть закон збереження енергії для ідеального коливального контуру.



Вправа № 23

1. Ідеальний коливальний контур складається з конденсатора ємністю $1,0 \text{ мкФ}$ і котушки індуктивністю 10 мГн . Який максимальний заряд на обкладках конденсатора, якщо максимальна сила струму в котушці становить 100 мА ?

2. Максимальне (амплітудне) значення сили струму в коливальному контурі 1,2 мА, а амплітудне значення заряду на обкладках конденсатора 30 нКл. Визначте індуктивність котушки, якщо ємність конденсатора 200 пФ.
3. Конденсатор ємністю 2,0 мкФ зарядили до напруги 10 В і замкнули на котушку індуктивністю 600 мкГн. Знайдіть: а) максимальну енергію магнітного поля котушки; б) максимальну силу струму в котушці; в) силу струму в котушці в той момент, коли напруга на обкладках конденсатора зменшиться до 6,0 В.
- 4*. Установіть, які фізичні величини, що характеризують електромагнітні коливання в коливальному контурі, аналогічні наведеним фізичним величинам, що характеризують коливання тіла на пружині. Заповніть таблицю.

| Тіло на пружині | Коливальний контур | Тіло на пружині | Коливальний контур |
|-----------------------|--------------------|----------------------------|--------------------|
| Маса m | | Прискорення $a = v'(t)$ | |
| Жорсткість k | | Коефіцієнт тертя μ | |
| Сила F | | Потенціальна енергія W_n | |
| Зміщення x | | Кінетична енергія W_k | |
| Швидкість $v = x'(t)$ | | | |