

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут”

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

**ВИВЧЕННЯ ВІЛЬНИХ КОЛИВАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ
КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи
з розділу “КОЛИВАННЯ”

Затверджено Методичною радою НТУУ „КПІ”

Київ
НТУУ”КПІ”
2008

Загальна фізика. Вивчення вимушених коливань в електричному коливальному контурі: Метод. вказівки до виконання лаборатор. роботи з курсу „Загальна фізика” В.П. Бригинець, О.О. Гусева, І.В. Лінчевський, Н.О. Якуніна. - К.: НТУУ „КПІ”, 2008.- 12 с.

Гриф надано Методичною радою НТУУ „КПІ”
(Протокол № від 2008 р.)

Навчальне видання

Загальна фізика

**Вивчення вимушених коливань в електричному
коливальному контурі**

Методичні вказівки

до виконання лабораторної роботи з розділу “КОЛИВАННЯ”
курсу „Загальна фізика”

Укладачі:

Бригинець Валентин Петрович, к.ф.-м.н, доцент

Гусева Ольга Олександрівна, к.ф.-м.н, доцент

Лінчевський Ігор Валентинович, к.т.н, доцент

Якуніна Наталія Олександрівна, к.ф.-м.н, доцент

Відповідальний редактор В.М. Локтєв, д-р ф.-м.н, акад.

Рецензент

Юрачковській П.П., к. ф.-м.н., доцент

ВИМУШЕНІ КОЛИВАННЯ В ПОСЛІДОВНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Мета роботи: експериментальне дослідження частотної залежності напруги на конденсаторі при вимушених коливаннях у послідовному коливальному контурі. Визначення резонансної частоти, смуги пропускання та добротності контура.

Теоретичні відомості

Вимушені коливання в послідовному контурі. Коливання, що відбуваються внаслідок періодичного зовнішнього впливу на будь-яку фізичну систему, називаються вимушеними. Особливий інтерес являють вимушені коливання осциляторів, тобто, систем, у яких можливі вільні коливання. Прикладом електромагнітного осцилятора є послідовний коливальний контур, – електричне коло, що складається з котушки індуктивності L , конденсатора ємності C і резистора з опором R . Для створення вимушених коливань у контур включають джерело (генератор) змінної ЕРС $E(t)$. У даній роботі досліджується послідовний контур, схема якого показана на (рис. 1). Під дією генератора в контурі виникають і підтримуються вимушені електромагнітні коливання, тобто, періодичні зміни напруги на елементах контура та струму в ньому.

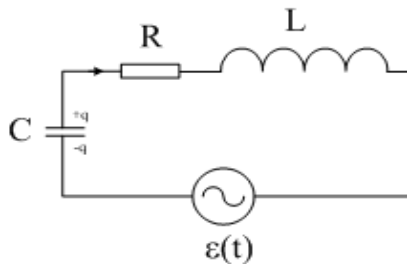


Рис. 1.

Найпростішим і найважливішим у теорії видом коливань є гармонічні вимушені коливання, що створюються генератором з ЕРС

$$E(t) = E_0 \cos \omega t \quad (1)$$

За законом Ома для ділянки кола квазістаціонарного електричного струму (струму, величина якого в даний момент однакова у всіх елементах кола) можна записати:

$$U_R + U_C = E + E_s \Rightarrow IR + \varphi_2 - \varphi_1 = -L \frac{dI}{dt} + E(t), \quad (2)$$

де $U_C = \varphi_2 - \varphi_1 = q/C$ – різниця потенціалів (напруга) на обкладках

конденсатора, $U_R = IR$ – напруга на опорі R , $E_s = -L(dI/dt)$ – ЕРС самоіндукції в котушці, $E(t)$ – ЕРС генератора (1), внутрішній опір якого вважається малим у порівнянні з R .

Виразимо величини U_C та I через заряд конденсатора q : $U_C = q/C$, $I = dq/dt$, тоді $E_s = -L(d^2I/dt^2)$. Зробивши такі підстановки в (2), і, поділивши на L , одержимо диференціальне рівняння вимушених електричних коливань у контурі:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dq}{dt} + \frac{1}{LC}q = \frac{E_0}{L} \cos \omega t,$$

або

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{E_0}{L} \cos \omega t \quad (3),$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – власна частота контура, тобто, частота вільних коливань у цьому контурі за умови $R = 0$, і $\beta = R/2L$ – коефіцієнт загасання контура.

Рівняння (3) являє собою неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами. З математики відомо, що його загальний розв'язок складається із загального розв'язку $q^o(t)$ відповідного однорідного рівняння та будь-якого частинного розв'язку $q(t)$ повного рівняння. Однорідна частина (3) має вигляд

$$\frac{d^2q^o}{dt^2} + 2\beta \frac{dq^o}{dt} + \omega_0^2 q^o = 0$$

і відповідає вільним загасаючим коливанням у контурі, амплітуда яких змінюється за законом $A(t) = q_0 e^{-\beta t}$ ([1], § 12.2, або [2], § 11.2.). Такі коливання виникають у момент включення генератора й відіграють суттєву роль тільки протягом невеликого проміжку часу $\sim 1/\beta$, після якого в контурі встановлюються стаціонарні гармонічні коливання з частотою генератора ω і сталою амплітудою. Тому частинний розв'язок рівняння (3), що відповідає незагасаючим вимушеним коливанням заряду конденсатора контура можна подати у вигляді:

$$q(t) = q_0 \cos(\omega t - \varphi_0), \quad (4)$$

де q_0 – амплітуда, а φ_0 – зсув фаз між коливаннями заряду конденсатора та ЕРС генератора.

Після підстановки (4) у (3) можна отримати ([1], § 12.3, або [2], § 11.3.) такі вирази q_0 і φ_0 :

$$q_0 = \frac{E_0}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad (5)$$

$$\varphi_0 = -\arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (6)$$

На практиці режим контура визначають не зарядом конденсатора, а напругою на різних елементах і силою струму в контурі. Зокрема, з урахуванням (4), рівняння вимушених коливань напруги на конденсаторі $U_C = q/C$ має вигляд:

$$U_C = U_{C0} \cos(\omega t - \varphi_0),$$

де амплітуда напруги

$$U_{C0} = \frac{E_0}{LC\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} = \frac{E_0\omega_0^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}} \quad (7)$$

Продиференціювавши (4) по t , знайдемо рівняння вимушених коливань сили струму $I = dq/dt$ у контурі:

$$I = -\omega q_0 \sin(\omega t - \varphi_0) = I_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (8)$$

де амплітуда струму I_0 і зсув фаз φ між вимушеними коливаннями струму та ЕРС генератора визначаються виразами:

$$I_0 = \frac{E_0\omega}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}, \quad (9)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

Амплітудні характеристики контура. Резонанс. Характерною особливістю вимушених коливань є залежність (причому не монотонна) їх амплітуди від частоти, що впливає з виразів (7) і (9), які називаються амплітудними характеристиками контура. Справді, якщо частоту ω поступово збільшувати, починаючи з нуля, то величина $\omega_0^2 - \omega^2$ у знаменнику цих виразів спочатку зменшується, потім проходить через 0 і далі необмежено зростає. Відповідно, амплітуда вимушених коливань спочатку зростає, потім сягає максимуму, й далі асимптотично прямує до нуля. Отже, в коливальному контурі можливий *резонанс* – зростання амплітуди вимушених коливань до максимальної величини при наближенні частоти коливань до певного

значення $\omega_{\text{рез}}$, яке називають *резонансною частотою*.

Резонансну частоту напруги на конденсаторі ω_u можна знайти, дослідивши вираз (7) на екстремум. Для цього в (7) треба продиференціювати по ω підкорінний вираз і прирівняти похідну до нуля. Результат виходить такий:

$$\omega_u = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (11)$$

Отже, резонансна частота напруги на конденсаторі менша, ніж власна частота контура, причому, тим менша, чим більше загасання β . Аналогічно, диференціюванням по ω виразу (9), знаходиться резонансна частота сили струму ω_i , яка виявляється рівною власній частоті контура:

$$\omega_i = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (12)$$

З огляду на явище резонансу, амплітудні характеристики, зокрема, $U_{C0} = U_{C0}(\omega)$ та $I_0 = I_0(\omega)$, інакше називають резонансними характеристиками, а їх графіки – резонансними кривими. На рис.2 показано вид резонансних кривих напруги на конденсаторі контура для трьох різних значень загасання, а на рис.3 – аналогічні резонансні криві сили струму в послідовному контурі.

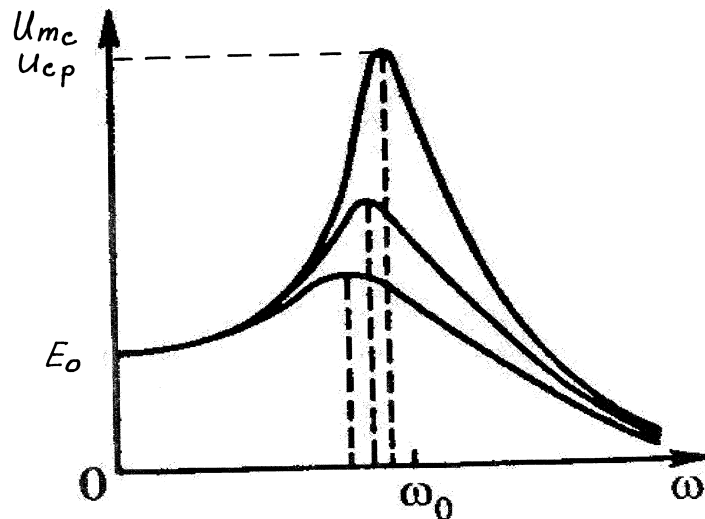


Рис.2

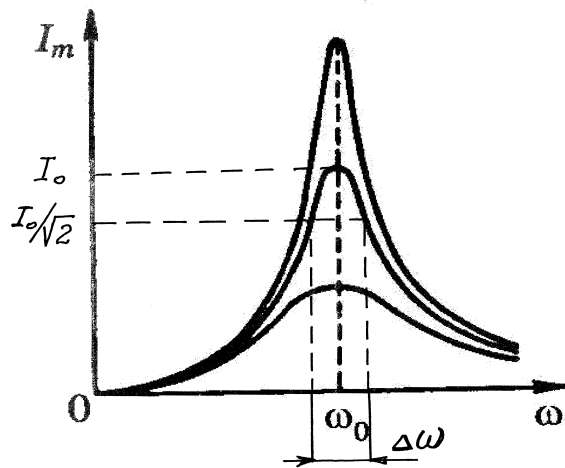


Рис.3

Характерно, що резонансні криві тим вужчі й вищі (тим гостріший резонанс), чим менше загасання контура. Це цілком природньо, оскільки при зменшенні загасання зменшуються втрати енергії коливань.

Існує зв'язок між резонансними кривими й іншою характеристикою контура – його добротністю Q (про добротність див. [1], § 11.2.). При слабкому загасанні ($\beta \ll \omega_0$) добротність виражається через параметри контура формулою

$$Q = \frac{\omega_0}{2\beta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (13)$$

Якщо в (7) замість ω підставити значення (11), то вийде такий вираз для резонансної амплітуди напруги U_m на конденсаторі:

$$U_p = \frac{E_0 \omega_0^2}{\beta \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}.$$

При слабкому загасанні величина β^2 під коренем є нехтовною, і

$$U_p = E_0 \frac{\omega_0}{2\beta} = E_0 Q. \text{ Отже, добротність контура}$$

$$Q = \frac{U_m}{E_0}. \quad (13a)$$

Таким чином, на конденсаторі послідовного контура відбувається підсилення напруги, а добротність виступає в якості коефіцієнта підсилення. На цьому базується вся техніка приймання радіосигналів. У кожному радіоприймачі є вхідні контури, в яких можна на свій розсуд установлювати резонансну частоту і, тим самим, різко підсилювати сигнал тільки від обраної станції (налаштовуватися на дану станцію).

Якщо в (9) замість ω підставити вираз (12), отримаємо резонансну

амплітуду струму I_m :

$$I_p = \frac{E_0}{2\beta L} = \frac{E_0}{R}. \quad (14)$$

З параметрів резонансної кривої струму теж можна визначити добротність контура Q при слабкому загасанні. Можна показати, що в цьому випадку вона визначається, як

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1}. \quad (15)$$

Величина $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ називається шириною резонансної кривої або *смугою пропускання контура*; частоти ω_1 і ω_2 відповідають амплітуді струму $I_0 = I_p/\sqrt{2}$, рис. 3. (резонансна крива, на якій відмічено рівень $I_p/\sqrt{2}$ і частоти ω_1 і ω_2) При такій амплітуді струму на опорі R виділяється половина резонансної потужності.

Опис лабораторної установки

Для вивчення вимушених коливань у контурі використовується установка, зображена на Рис.4

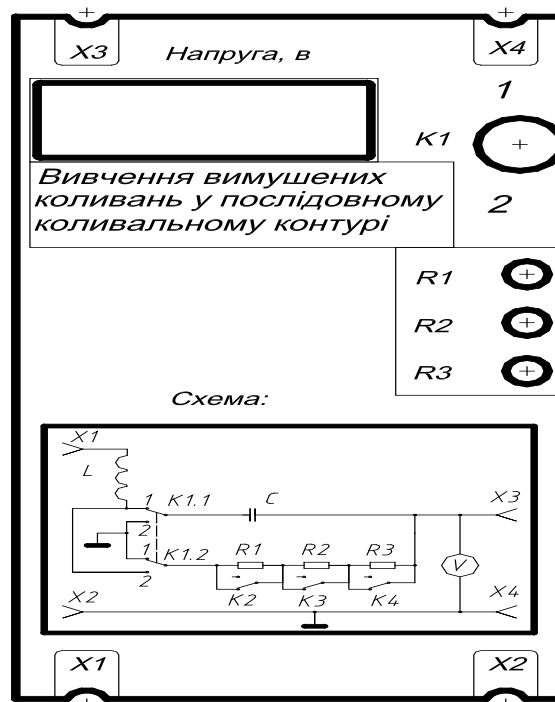


Рис. 4

За допомогою цієї установки можна вивчити залежність напруги на конденсаторі C (перемикач $K1$ у положенні 2) або на опорах $R1 - R3$ (перемикач $K1$ у положенні 1) від частоти ω зовнішнього генератора. Вимірювання напруги діючої здійснюється за допомогою цифрового вольтметра V . Активний опір контура можна змінювати за допомогою резисторів $R1 - R3$ та перемикачів $K2 - K4$.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути звуковий генератор в мережу. Встановити на виході генератора напругу 10 В.
2. Установити перемикач $K1$ в положення 2, $K2$ у положення 1, $K3$ у положення 2 і $K4$ у положення 2. (При цьому в контур буде увімкнений опір $R1$). Змінюючи частоту генератора f , знайти резонансну частоту f_u , при якій напруга на конденсаторі буде максимальною $U_{C0} = U_{Cm}$. Значення f_u та U_{Cm} занести до табл. 1.
3. Зменшуючи й збільшуючи частоту генератора в обидва боки від резонансної частоти (узяти 8-10 значень), виміряти амплітуди напруги U_{C0} . Значення f і U_{C0} занести до табл. 1.

Табл. 1

R1	f_u									
	U_{C0}									
R2	f_u									
	U_{C0}									
R3	f_u									
	U_{C0}									

4. Перевести перемикач $K1$ у положення 1. (При цьому вольтметр V буде показувати напругу на опорі контура). Змінюючи частоту генератора, знайти резонансну частоту f_i , при якій напруга на резисторі $R1$ буде максимальною. Обчислити амплітуду напруги U_{Rm} на резисторі $R1$ при резонансній частоті f_i . Значення $R1$, f_i та U_{Rm} занести до табл. 2.

5. Зменшуючи і збільшуючи частоту генератора в обидва боки від резонансної частоти (взяти 8-10 значень частоти), обчислити амплітуди напруги U_{R0} . Значення f_i та U_{R0} занести до табл. 2. Для кожного значення U_{R0} знайти амплітуду струму $I_0 = U_{R0}/R$ і занести результат у табл. 2.

Табл. 2.

R1	f_i									
	U_{R0}									
	I_0									
R2	f_i									
	U_{R0}									
	I_0									
R3	f_i									
	U_{R0}									
	I_0									

6. Виміри п.п. 2 – 5 повторити при опорі контура $R2$ та $R3$. Вибір опорів здійснити за допомогою перемикачів $K2 - K4$.

Обробка результатів вимірювань

1. За даними табл. 1 побудувати резонансні криві $U_{C0} = U(f)$ для різних значень R .

2. Визначити добротність контура за формулою (13а) для різних значень R . За отриманими даними побудувати графік $Q = Q(1/R)$, відкладаючи по осі ординат добротність Q , а по осі абсцис – обернений опір контура $1/R$.

3. За даними табл. 2 побудувати резонансні криві $I_0 = I(f)$ для різних значень R .

4. Із графіків п. 3 визначити ширини Δf резонансних кривих струму та обчислити добротність контура Q для різних значень R за формулою

(15). Отримані значення Q нанести на графік п. 2 і порівняти результати, отримані в п. 2 і п. 3.

Контрольні запитання

1. Записати диференціальне рівняння вимушених коливань у послідовному контурі. Який вигляд має загальний розв'язок цього рівняння?
2. Що таке стаціонарні вимушені коливання та який вигляд має їх рівняння?
3. Записати формули для амплітудної характеристики напруги на конденсаторі контура та резонансної частоти напруги.
4. Вивести формулу (11).
5. Записати формули для амплітудної характеристики струму в контурі та резонансної частоти струму.
6. Вивести формулу (12).
7. Який вигляд мають резонансні криві напруги на конденсаторі та струму в контурі при різних значеннях опору R ?
8. Що таке добротність контура? Отримати формулу (13).
9. Як змінюються параметри резонансних кривих із зміною добротності?
10. Як можна визначити добротність за параметрами резонансної кривої напруги на конденсаторі? Отримати формулу (13а).
11. Як можна визначити добротність за параметрами резонансної кривої струму в контурі? Що таке ширина резонансної кривої?
12. Довести вираз (15)
13. Який вигляд має векторна діаграма напруг при вимушених коливаннях у контурі?
14. Як відрізняються векторні діаграми напруг на елементах контуру в залежності від частоти генератора?

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Загальний курс фізики, т.2, § 12.3, Техніка, К.2001;
2. Иродов И.Е., Электромагнетизм. Основные законы., Физ-мат лит, М, 2002, §§ 11.2, 11.3.