

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКСТРАСТРУМІВ ЗАМИКАННЯ І РОЗМИКАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З RLC ЕЛЕМЕНТАМИ

*Горбачук І.Т.,*

*завідувач кафедри ММНФМДВШ, професор,*

*Національний педагогічний університет імені М.П.Драгоманова,*

*Стариков С.М.,*

*завідувач лабораторії,*

*Національний педагогічний університет імені М.П.Драгоманова,*

*Козеренко С.І.,*

*кандидат пед. наук, доцент,*

*Національний педагогічний університет імені М.П.Драгоманова*

У статті подані результати дослідження швидкоплинних електромагнітних процесів в електричному колі джерела постійного струму, що містить активний опір, ємність та індуктивність. Експериментальні дослідження проведені за допомогою універсального комп'ютерно – вимірювального комплексу з аналого – цифровим перетворювачем. Отримані результати аналізуються в межах представленої в роботі теорії. Дослідження проведені в режимі реального часу.

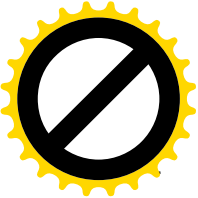
В статье представлены результаты исследования быстротекущих электромагнитных процессов в электрической цепи источника постоянного тока, содержащее активное сопротивление, емкость и индуктивность. Экспериментальные исследования проведены с помощью универсального компьютерно - измерительного комплекса с аналого - цифровым преобразователем. Полученные результаты анализируются в рамках представленной в работе теории. Исследования проведены в режиме реального времени

The paper presents the results of a study of fleeting electromagnetic processes in the circuit DC containing resistance, capacitance and inductance. Experimental studies were conducted using a universal computer - measuring system with an analog - digital converter. The results are analyzed in the framework presented in the theory. The studies were performed in real time.

**Вступ.** Сучасні фізичні експериментальні дослідження потребують створення складних установок, оскільки кількість аналогових параметрів, що мають вимірюватись може досягати, в окремих випадках, десятків. Діставати такий об'єм інформації аналоговими методами дуже складно, а інколи, взагалі неможливо.

В останні роки якість експериментальної техніки оновлюється і покращується. На заміну громіздким вимірювальним приладам прийшли пристрої, що мають не лише невеликі розміри, а й високу ступінь функціональності, що в десятки разів перевищує своїх попередників. Такими пристроями є аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), які використовуються спільно зі стаціонарними комп'ютерами, ноутбуками чи планшетами. Серед причин, за яких експериментатори віддають перевагу вимірювальним комплексам з АЦП перед “застарілими” аналоговими приладами, можна назвати:

- обладнання має незначні габаритні розміри, що підвищує мобільність вимірювального комплексу;
- можливість підключення аналого-цифрових перетворювачів до ПК;



висвітлення результатів вимірювань у вигляді цифрових табло, таблиць, або графіків на екрані комп'ютера чи проекційного екрану;

- зменшення часу на аналіз та обробку отриманих результатів досліджень;
- електронні засоби сприяють створенню мініатюрних компонентів і підвищенню функціональних можливостей вимірювальних пристроїв;
- можливість експорту даних у формат Excel;
- одночасне вимірювання декількох фізичних величин;
- активізація процесу вимірювань за амплітудою вимірюваного сигналу, або за імпульсом зовнішньої синхронізації;
- створення мультимедійного проекту експерименту (в складі текстового файлу опису, відеоролика з поясненнями сутності експерименту, групи файлів з даними ходу експерименту) з подальшим відтворенням на будь-якому комп'ютері.

Отже, галузю використання вимірювальних комплексів з АЦП можуть бути не тільки наукові дослідження, а й навчальний процес у вищій та середній школах. Вони будуть підвищувати не лише рівень фундаментальної підготовки фахівців, а й стимулюватимуть молодь до навчання і виконання наукової роботи.

**Формування завдань статті.** Автори поставили за мету провести дослідження швидкоплинних електромагнітних процесів, що протікають в електричному колі, яке містить опір, ємність та індуктивність, за допомогою універсального комп'ютерно – вимірювального комплексу.

**Виклад основного матеріалу дослідження. Теорія.** Нехай конденсатор  $C$  був заряджений до напруги  $U_c$  рівної ЕРС джерела живлення. Після замикання ключа  $K$  (рис.1) в положення 1 конденсатор почне розряджатися через опір  $R$  та котушку індуктивності  $L$ .

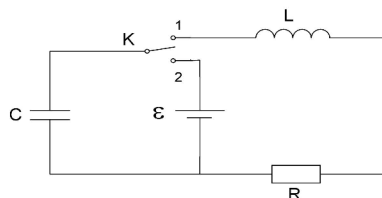


Рис.1

Запишемо для зазначеного контура диференціальне рівняння на основі II правила Кірхгофа та закону Ома:

$$U_c + U_R + U_L = 0 \text{ або } U_c + RI + L \frac{dI}{dt} = 0. \quad (1)$$

Струм у колі обумовлений зміною заряду  $q$  конденсатора

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU_c}{dt}. \quad (2)$$

Врахувавши вираз (2) запишемо рівняння (1) у вигляді:  $LC \frac{d^2U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0.$

Поділимо всі доданки на  $LC$  та отримаємо

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{LC} U_c = 0. \quad (3)$$



Ми отримали лінійне однорідне диференціальне рівняння другого порядку. Знайдемо розв'язок диференціального рівняння (3) методом Ейлера, а саме, у вигляді  $U_c = e^{\lambda t}$ , де  $\lambda$  - деяке невизначене стале число (дійсне або комплексне). Знайдемо похідні

$$U'_c = \lambda e^{\lambda t}; \quad U''_c = \lambda^2 e^{\lambda t} \quad \text{і підставимо їх у рівняння (3): } P(U_c) = U''_c + a_1 U'_c + a_2 U_c;$$

$$P(e^{\lambda t}) = \lambda^2 e^{\lambda t} + a_1 \lambda e^{\lambda t} + a_2 e^{\lambda t} = e^{\lambda t} (\lambda^2 + a_1 \lambda + a_2), \quad \text{де } a_1 = \frac{R}{L}; \quad a_2 = \frac{1}{LC}.$$

Отже,  $U_c = e^{\lambda t}$  є розв'язком рівняння (3), якщо вираз у дужках рівний нулю

$$\lambda^2 + a_1 \lambda + a_2 = 0 \quad (4)$$

Рівняння (4) є характеристичним рівнянням для диференціального рівняння (3). Розв'язком цього квадратного рівняння відносно невідомої  $\lambda$  будуть числа:  $\lambda_{1,2} = -\frac{a_1}{2} \pm \sqrt{\frac{a_1^2}{4} - a_2}$ , або

після підстановки значень  $a_1$  і  $a_2$  -  $\lambda_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$ . Загальний розв'язок лінійного однорідного диференціального рівняння другого порядку (3) матиме такий вигляд

$$U_c = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad (5)$$

При  $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$  корені  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  характеристичного рівняння дійсні та від'ємні і розрядка конденсатора має аперіодичний характер. При  $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$  корені  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  - спряжені комплексні і розрядка конденсатора має коливальний характер.

Розглянемо коливальний процес розрядки. В цьому випадку корені характеристичного рівняння спряжені і комплексні числа. А саме

$$\lambda_1 = -\frac{R}{2L} + i \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad \lambda_2 = -\frac{R}{2L} - i \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad \text{де } i = \sqrt{-1}.$$

Позначимо  $\frac{R}{2L} = \delta$  - коефіцієнт затухання;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  - резонансна частота контура;

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  - частота власних затухаючих коливань контура. Використовуючи введені позначення перепишемо вирази так

$$\lambda_1 = -\delta + i\omega, \quad \lambda_2 = -\delta - i\omega \quad (6)$$

Підставимо (6) у (5)

$$U_c = A_1 e^{(-\delta + i\omega)t} + A_2 e^{(-\delta - i\omega)t} = A_1 e^{-\delta t + i\omega t} + A_2 e^{-\delta t - i\omega t} = A_1 e^{-\delta t} e^{i\omega t} + A_2 e^{-\delta t} e^{-i\omega t} = e^{-\delta t} (A_1 e^{i\omega t} + A_2 e^{-i\omega t}) = e^{-\delta t} (A_1 \cos \omega t + \sin \omega t) \quad (7)$$

Для струму скористаємось виразом  $I = -C \frac{dU_c}{dt}$  (знак "-" бо  $I$  тут струм розрядки)

$$I = -C e^{-\delta t} ((-\delta A_1 + A_2 \omega) \cos \omega t + (-\delta A_2 - A_1 \omega) \sin \omega t) \quad (8)$$



Сталі інтегрування  $A_1$  і  $A_2$  знайдемо з початкових умов ( $t=0$ ): напруга на конденсаторі була рівна ЕРС джерела, а струму в електричному колі не було. Тому  $U_c(0) = A_1 = \varepsilon$ ,

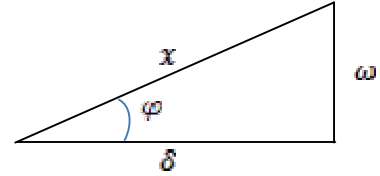
$$I(0) = -C(-\delta A_1 + A_2 \omega) = 0 \Rightarrow A_2 = \frac{\delta \varepsilon}{\omega}. \text{ Підставляючи значення } A_1 \text{ і } A_2 \text{ у вираз (7) отримаємо}$$

$$U_c = \frac{\varepsilon}{\omega} e^{-\delta t} (\omega \cos \omega t + \delta \sin \omega t) \quad (9)$$

Суму косинусоїдальної і синусоїдальної функцій можна замінити однією синусоїдальною функцією. Для цього покладемо  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega}{\delta}$ .

$$\text{Тоді } \omega^2 + \delta^2 = x^2 \Rightarrow x = \sqrt{\omega^2 + \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2 + \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC}},$$

$$\sin \varphi = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \delta^2}} = \omega \sqrt{LC}, \quad \cos \varphi = \frac{\delta}{\sqrt{\omega^2 + \delta^2}} = \delta \sqrt{LC}.$$



Помножимо і поділимо (9) на  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$U_c = \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} e^{-\delta t} (\omega \sqrt{LC} \cos \omega t + \delta \sqrt{LC} \sin \omega t) = \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} e^{-\delta t} (\sin \varphi \cos \omega t + \cos \varphi \sin \omega t)$$

Змінімо доданки і множники у дужках місцями

$$U_c = \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} e^{-\delta t} (\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi).$$

Скориставшись формулою синуса суми, остаточно отримаємо закон зміни напруги на конденсаторі з часом

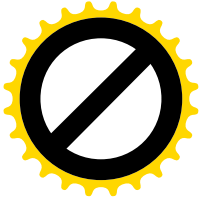
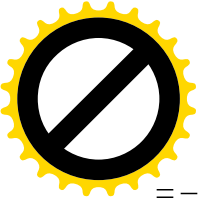
$$U_c = \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} e^{-\delta t} (\sin \omega t + \varphi), \text{ де } \varphi = \arctg \frac{\varphi}{\delta} \quad (10)$$

Для знаходження закону зміни сили струму з часом скористаємось виразом (2) враховуючи, що це струм розрядки

$$\begin{aligned} I &= -C \frac{dU_c}{dt} = -C \frac{d}{dt} \left( \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \right) = -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot \frac{d}{dt} (e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)) = \\ &= -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot (e^{-\delta t} \cdot (-\delta) \cdot \sin(\omega t + \varphi) + e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \cdot \omega) = -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} (\omega \cdot \cos(\omega t + \varphi) - \delta \cdot \sin(\omega t + \varphi)) = \\ &= -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} (\omega (\cos \omega t \cdot \cos \varphi - \sin \omega t \cdot \sin \varphi) - \delta (\sin \omega t \cdot \cos \varphi + \cos \omega t \cdot \sin \varphi)) = \\ &= -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} (\omega \cos \omega t \cdot \cos \varphi - \omega \sin \omega t \cdot \sin \varphi - \delta \sin \omega t \cdot \cos \varphi - \delta \cos \omega t \cdot \sin \varphi) \end{aligned}$$

Скористаємось виразами  $\sin \varphi = \omega \sqrt{LC}$  та  $\cos \varphi = \delta \sqrt{LC}$ . Тоді попередній вираз буде мати вигляд

$$I = -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} (\omega \cos \omega t \cdot \delta \sqrt{LC} - \omega \sin \omega t \cdot \omega \sqrt{LC} - \delta \sin \omega t \cdot \delta \sqrt{LC} - \delta \cos \omega t \cdot \omega \sqrt{LC}) =$$



$$= -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} \left( -\omega^2 \sqrt{LC} \sin \omega t - \delta^2 \sqrt{LC} \sin \omega t \right) = -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} \left( -\sqrt{LC} \right) \left( \omega^2 + \delta^2 \right) \sin \omega t$$

Вираз у дужках рівний  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$

$$I = -C \frac{\varepsilon}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} \left( -\sqrt{LC} \right) \frac{1}{\sqrt{LC}} \sin \omega t = \frac{\varepsilon C}{\omega \sqrt{LC}} e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (11)$$

Закон зміни напруги з часом на котушці знайдемо із співвідношення  $U_L = L \frac{dI}{dt}$

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d}{dt} \left( \frac{\varepsilon C}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t \right) = L \frac{\varepsilon C}{\omega \sqrt{LC}} \cdot \left( e^{-\delta t} \cdot (-\delta) \cdot \sin \omega t + e^{-\delta t} \cdot \omega \cos \omega t \right) =$$

$$= L \frac{\varepsilon C}{\omega \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} (\omega \cos \omega t - \delta \cdot \sin \omega t).$$

Порівняємо даний вираз з виразом (10) та застосуємо аналогічний підхід для його спрощення

$$U_L = \frac{L \varepsilon C}{\omega \sqrt{LC} \cdot \sqrt{LC}} \cdot e^{-\delta t} (\omega \sqrt{LC} \cos \omega t - \delta \sqrt{LC} \cdot \sin \omega t) = \frac{\varepsilon}{\omega} \cdot e^{-\delta t} (\sin \varphi \cos \omega t - \cos \varphi \sin \omega t) = \quad (12)$$

$$= \frac{\varepsilon}{\omega} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin (\varphi - \omega t) = -\frac{\varepsilon}{\omega} \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin (\omega t - \varphi)$$

Відповідно до формул (10)-(12) в контурі має місце коливальний розряд конденсатора з частотою  $\omega$ . Коливальний процес має затухаючий характер через втрати енергії на резисторі  $R$ . Затухання відбуваються за експоненціальним законом зі швидкістю, що залежить від коефіцієнта  $\delta$ . Приблизні часові діаграми відповідних функцій представлені на рис.2.

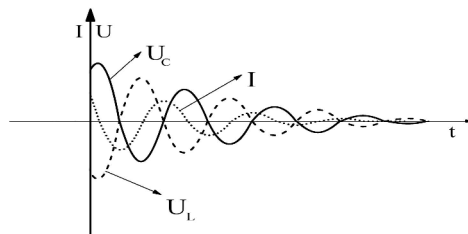


Рис. 2

Аперіодичний процес розрядки. Розглянемо процес розрядки конденсатора при

$\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ . Запишемо рівняння (1) у вигляді

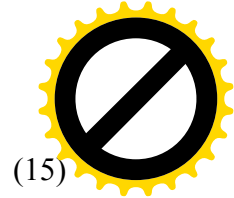
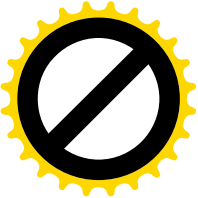
$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0. \quad (13)$$

Складемо характеристичне рівняння:  $LCp^2 + RCP + 1 = 0$ . Загальний розв'язок однорідного диференціального рівняння другого порядку (13) буде мати вигляд

$$U_c = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (14)$$

де  $p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$  - корені характеристичного рівняння,  $A_1$  і  $A_2$  - довільні сталі.

Скористаємось виразом (2) для знаходження сили струму



$$I = -C \frac{dU_c}{dt} = -C \frac{d}{dt} (A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}) = -C (A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}). \quad (15)$$

Визначимо  $A_1$  і  $A_2$  з початкових умов. При  $t=0$ ,  $U_c = \varepsilon$ ,  $I=0$ . Підставимо їх у вирази (14) і (15)

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = \varepsilon, \\ -C(A_1 p_1 + A_2 p_2) = 0, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_1 = \frac{\varepsilon}{1} + \frac{\varepsilon p_1}{p_2 - p_1}, \\ A_2 = \frac{-\varepsilon p_1}{p_2 - p_1}, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_1 = \frac{\varepsilon(p_2 - p_1) + \varepsilon p_1}{p_2 - p_1}, \\ A_2 = \frac{-\varepsilon p_1}{p_2 - p_1}, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_1 = \frac{\varepsilon p_2}{p_2 - p_1}, \\ A_2 = -\frac{\varepsilon p_1}{p_2 - p_1}. \end{cases} \quad (16)$$

Підставимо (16) у (14) і (15) та отримаємо

$$U_c = \frac{\varepsilon p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} - \frac{\varepsilon p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t} = \frac{\varepsilon}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (17)$$

$$I = -C \left( \frac{\varepsilon p_2}{p_2 - p_1} p_1 e^{p_1 t} - \frac{\varepsilon p_1}{p_2 - p_1} p_2 e^{p_2 t} \right) = \frac{-C p_1 p_2 \varepsilon}{p_2 - p_1} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}),$$

або врахувавши за теоремою Вієта  $p_2 \cdot p_1 = \frac{1}{LC}$

$$I = -\frac{\varepsilon}{L \cdot (p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (18)$$

Напругу на котушці знайдемо як

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d}{dt} \left( -\frac{\varepsilon}{L(p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \right) = L \left( -\frac{\varepsilon}{L(p_2 - p_1)} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \right) = -\frac{\varepsilon}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t})$$

Схематичне зображення аперіодичного процесу розрядки подано на рис.3.

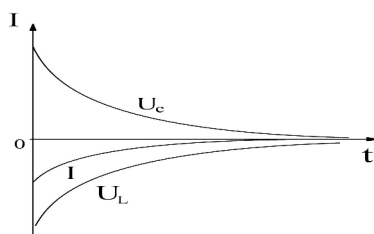


Рис. 3

Граничний аперіодичний розряд конденсатора на котушку і опір. При розгляді аперіодичного розряду конденсатора ми виходили із співвідношення між параметрами контура  $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ .

Тепер розглянемо той випадок, коли  $\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$  - так званий граничний аперіодичний розряд конденсатора. Це можна зробити підібравши опір резистора  $R$  так, щоб

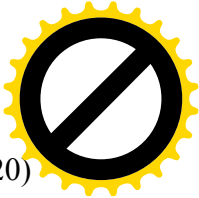
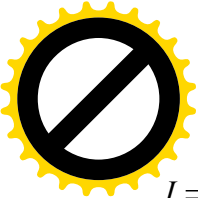
$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ . В такому випадку корні характеристичного рівняння будуть рівні та від'ємні:

$p_1 = p_2 = p = -\frac{R}{2L}$ . Процес розрядки буде аперіодичний, але граничним з коливальним.

Загальний розв'язок диференціального рівняння запишеться у вигляді

$$U_c = (A_1 + A_2 t) e^{pt}. \quad (19)$$

Використовуючи (19) запишемо закон сили струму для цього випадку:



$$I = -C \frac{dU_c}{dt} = -C \frac{d}{dt} (A_1 e^{pt} + A_2 t e^{pt}) = -C (A_1 p e^{pt} + A_2 t p e^{pt} + A_2 e^{pt}) = -C e^{pt} (A_1 p + A_2 p t + A_2) \quad (20)$$

При початкових умовах  $U_c(0) = \varepsilon$  і  $I(0) = 0$ :  $A_1 = \varepsilon$ ;  $A_2 = -\varepsilon p = \frac{R\varepsilon}{2L}$ , використовуючи значення отриманих вище сталих інтегрування перепишемо (19) і (20)

$$U_c = (\varepsilon - \varepsilon p t) e^{pt} \text{ або } U_c = \varepsilon e^{pt} (1 - p t),$$

$$I = -C (\varepsilon p - \varepsilon p^2 t - \varepsilon p) e^{pt} = -C e^{pt} (-\varepsilon p^2 t) = C \varepsilon p^2 t e^{pt} = C \frac{R^2 \varepsilon}{4L^2} t e^{pt}.$$

Враховуючи, що  $R^2 = 4 \frac{L}{C}$  остаточно отримаємо  $I = \frac{C\varepsilon \cdot 4L t e^{pt}}{C \cdot 4L^2} = \frac{\varepsilon}{L} t \cdot e^{pt}$ . Використовуючи попередній вираз знайдемо значення напруги на котушці  $U_L$

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d}{dt} \left( \frac{\varepsilon}{L} \cdot t \cdot e^{pt} \right) = L \frac{\varepsilon}{L} (e^{pt} + t \cdot e^{pt} \cdot p) = \varepsilon e^{pt} (1 + p t).$$

**Виклад основного матеріалу дослідження. Експеримент.** Дослідження швидкоплинних процесів проводилось на спеціальному навчальному стенді, схематичний вигляд якого представлено на рис. 4.

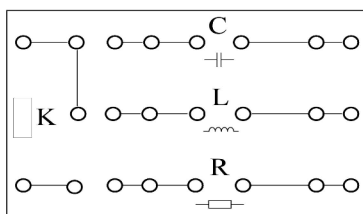


Рис.4.

В експерименті використовувалось джерело живлення постійної напруги 12В, батарея конденсаторів ємністю  $0,5 \div 60$  мкФ, котушка індуктивності без залізного осердя на  $1200 \div 3600$  витків, магазин опорів від 0,01 Ом до 10 кОм. Вимірювання проводились за допомогою універсального комп'ютерно – вимірювального комплексу, під'єданого до стаціонарного комп'ютера через USB кабель. Було використано датчики напруги на  $\pm 25$ В та  $\pm 12$ В і датчик сили струму на  $\pm 2$ А.

Схему досліду зображено на рис. 5. На навчальному стенді було зібране електричне коло з послідовно з'єднаних джерела живлення  $\varepsilon$ , ключа К, магазину опорів R, батареї конденсаторів С, датчика сили струму на  $\pm 2$ А та котушки індуктивністю L.

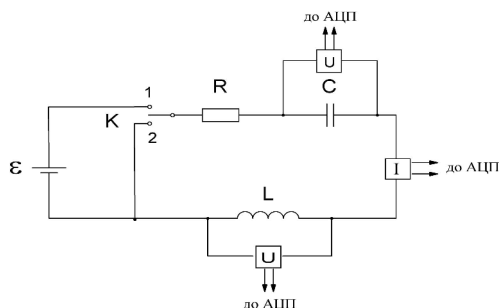
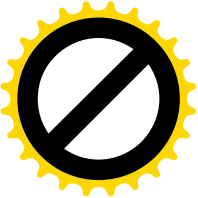


Рис.5.



До батареї конденсаторів  $C$  і котушки індуктивності  $L$  під'єднувались паралельно датчики напруги на  $\pm 25\text{В}$  та  $\pm 12\text{В}$  відповідно. Засобами програмного забезпечення встановлювався час вимірювання  $200\text{мкс}$ .

Експеримент проходив так. При розімкненому ключі  $K$  вмикалось джерело живлення на  $2\text{В}$ . Потім відбувалось замикання ключа в положення 1, при якому батарея конденсаторів  $C$  заряджалась через магазин опорів  $R$  до значення прикладеної ЕРС джерела живлення. За повної зарядки батареї конденсаторів ключ  $K$  переводився у положення 2. В результаті відбувалась розрядка конденсаторів через магазин опір  $R$  та котушку індуктивності  $L$ . У серії дослідів  $L$  і  $C$  залишались сталими, а опір  $R$  змінювався у вибраному діапазоні. В експерименті використовувались конденсатори ємністю  $5, 10, 20, 40 \text{ мкФ}$ ; котушки індуктивності на  $1200, 2400, 3600$  витків без осердя, опори в  $1, 10, 100, 1000 \text{ Ом}$ .

**Результати експериментів.** В результаті розрядки батареї конденсаторів на котушку індуктивності  $L$  і магазин опорів  $R$  на характер процесу впливало співвідношення між параметрами електричного кола  $R, L$  та  $C$ . При  $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$  спостерігався періодичний коливальний процес розрядки конденсатора. На рис.6 зображено типовий характер цього процесу для котушки в  $3600$  витків, ємності  $20 \text{ мкФ}$  та опору в  $10 \text{ Ом}$

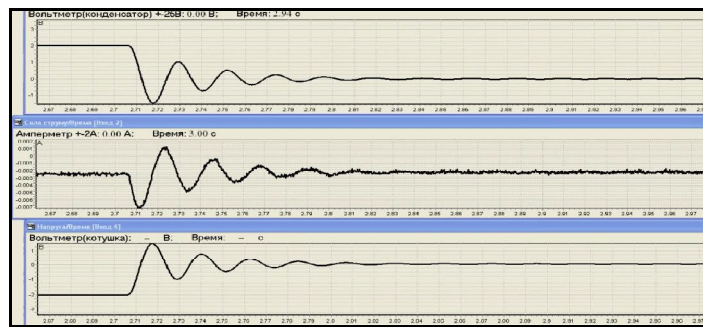


Рис. 6

При  $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$  спостерігався аперіодичний процес розрядки. На рис.7 зображено типовий характер цього процесу для котушки в  $2400$  витків, ємності  $20 \text{ мкФ}$  та опору в  $1 \text{ кОм}$

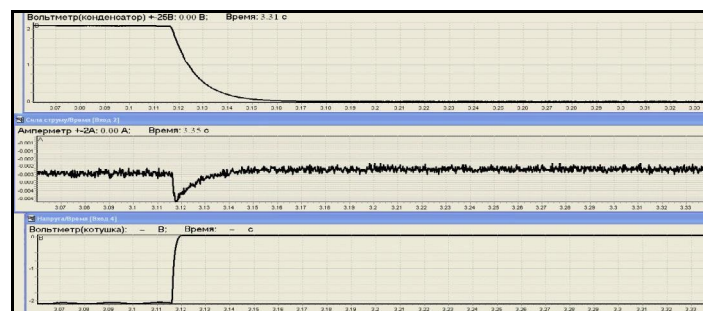


Рис. 7

При  $\frac{R^2}{4L^2} \approx \frac{1}{LC}$  спостерігався граничний аперіодичний процес розрядки конденсатора. Графіки цього процесу зображено на рис.8 для електричного кола котушки в  $1200$  витків, ємності  $40 \text{ мкФ}$  та опору в  $100 \text{ Ом}$ .



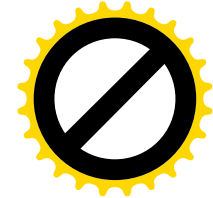
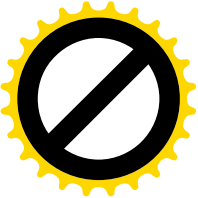


Рис.8

Процес зарядки конденсатора мав періодичний коливальний характер (рис.9 ) при значеннях опорів від 1-100 Ом та аперіодичний (рис.10) при опорі близько 1 кОма.

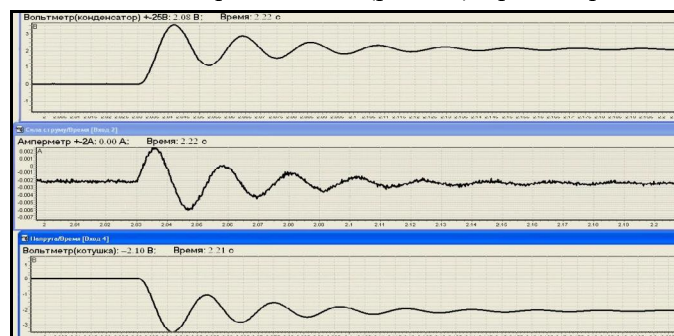


Рис. 9

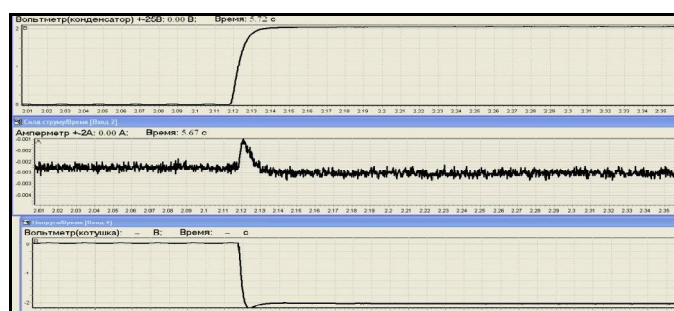


Рис. 10

**Висновки.** У роботі експериментально підтверджено характер процесів, що тривають протягом декількох мікросекунд у моменти заряджання та розряджання конденсатора через опір та катушку індуктивності. Експериментально підтверджений характер швидкоплинних процесів повністю відповідає теоретичним розрахункам. Проведення експерименту та аналіз отриманих даних став можливим завдяки використанню сучасного комп'ютерно - вимірювального комплексу на основі АЦП.

### Список використаної літератури

1. Горбачук І.Т., Козеренко С.І., Левандовський В.В., Мусієнко Ю.А., Шут М.І., Янчевський Л.К. Дослідження будови та принципу дії елементів структури аналогово-цифрового перетворювача. Спеціальний фізичний практикум. Частина 3. // За заг.ред. проф. Горбачука І.Т. – К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2011. – 55 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики: Навчальний посібник - Т. 2. Електрика і магнетизм. -К.: Техніка, 2003. - 452 с.
3. Калашников С. Г. Электричество. 5-е изд. -М: Наука, 1985. -576 с.