

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до лабораторних робіт**  
**з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки"**  
**(розділ "Перехідні процеси")**

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до лабораторних робіт**

**з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки"**

**(розділ "Перехідні процеси")**

для студентів факультету заочного та денного навчання  
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**Затверджено**

методичною радою університету,

протокол № \_\_ від \_\_\_\_\_ 2020 р.

Харків 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
АВТОМОБІЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ

**До друку та в світ дозволяю**

Перший проректор

С.Я. Ходирєв

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**  
**до лабораторних робіт**  
**з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки"**  
**(розділ "Перехідні процеси")**

Всі цитати, цифровий,  
фактичний матеріал  
та бібліографічні  
відомості перевірені,  
написання одиниць  
відповідає стандартам

Затверджено

методичною радою університету,  
Протокол № \_\_ від \_\_\_\_ 2020 р.

Укладачі:

О. П. Смирнов

А.О. Борисенко

Відповідальний за випуск

О. В. Бажинов

Харків 2020

Укладачі:

О. П. Смирнов

А.О. Борисенко

Кафедра Автомобільної електроніки

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Для засвоєння теоретичного і практичного матеріалу з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» виконуються лабораторні роботи, що охоплюють два основних розділу: перехідні процеси у електричних колах постійного струму; перехідні процеси у електричних колах змінного струму.

Методичні вказівки включають лабораторні роботи відповідно програмі курсу "Теоретичні основи електротехніки" для студентів факультету заочного та денного навчання спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Мета лабораторних робіт - закріплення теоретичних знань, перевірка на практиці загальних положень теорії та законів електротехніки з розділу "Перехідні процеси у електричних колах постійного та змінного струму", здобуття практичних навичок при роботі на ПК.

У кожній лабораторній роботі формулюється мета, наводяться короткі теоретичні положення, послідовність виконання роботи, а також контрольні питання. Для виконання експериментальної частини роботи необхідно уважно вивчити методичні вказівки, знати мету досліду та характер досліджуваних процесів, детально вивчити послідовність роботи на ПК.

До наступної лабораторної роботи студент повинен представити повністю оформлений звіт за попередню лабораторну роботу.

Звіт повинен вміщувати:

- найменування та мету роботи;
- схему електричного кола;
- коротке описання роботи та необхідні формули;
- графіки перехідних процесів при різних параметрах.

Студенти приступають до виконання роботи після того, як викладач шляхом досвіду перевірить їх готовність до виконання роботи. Для захисту лабораторної роботи необхідно відповісти на контрольні питання, які наведені наприкінці кожної лабораторної роботи, та питання викладача за тематикою відповідної лабораторної роботи.

## Лабораторна робота №1

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити перехідні процеси в електричних колах постійного струму з послідовно ввімкненими елементами  $R$ ,  $L$  та  $C$  за допомогою графічної побудови на ПК аналітично отриманих формул.

#### Теоретичні положення

Процеси в електричних колах, які розглядались раніше, були встановленими процесами; тепер розглянемо перехідні процеси, які проходять при усіх змінах режиму електричного кола - ввімкнені, вимкнені, короткому замкнені і т. п. Ці процеси не можуть проходити миттєво, тому що неможливі миттєві зміни енергії, яка запасена в електромагнітному полі кола, інакше потужність, необхідна для цього повинна дорівнювати нескінченності

$$P = \frac{dW}{dT} = \infty.$$

У колах з зосередженими параметрами енергія запасається в ємностях у вигляді енергії  $Cu_C^2/2$  електричного поля та в індуктивностях у вигляді енергії  $Li_L^2/2$  магнітного поля. З неможливості миттєвих змін енергії слідує неможливість миттєвих змін струмів  $i_L$  у індуктивностях  $L$  (перший закон комутації) та напруги  $U_C$  на ємності  $C$  (другий закон комутації). Разом з цим можливі скачки струмів у ємностях та напруги на індуктивностях, а також скачки напруги та струмів на активних опорах  $R$  (активний опір не запасає електромагнітної енергії). Це положення є ідеалізацією, тому що у дійсності любий елемент електричного кола має і опір, і ємність, і індуктивність.

Для розрахунку перехідних процесів у колах складається система рівнянь за законами Ома та Кірхгофа для миттєвих значень напруги та струмів; ця система приводиться до одного рівняння, яке в загальному випадку лінійних кіл буде лінійним звичайним

диференційним рівнянням. Порядок цього рівняння можна знайти з спрощеної схеми кола, об'єднуючи індуктивності, та, відповідно, ємності, з'єднання між якими є послідовними та паралельними або зводяться до них. Тоді розшукуваний порядок дорівнює числу незалежних початкових умов для струмів індуктивностей та напруги на ємностях спрощеної схеми. Наприклад, якщо три індуктивності з'єднані зіркою, об'єднати їх не можна, але можна задати тільки дві незалежних початкових умови у вигляді струмів двох з них, так як струм третьої знаходиться через перші два. Для кола з послідовним з'єднанням  $R$ ,  $L$  та  $C$  (рис. 1.1) рівняння, яке зв'яже напругу  $u$  кола зі струмом  $i$  буде другого порядку, тому що початкові значення  $i$  та  $U_C$  можуть бути задані незалежно один від одного

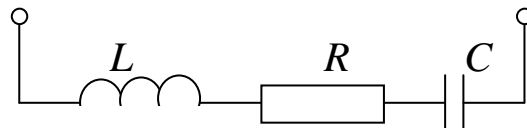


Рисунок 1.1 – Електрична схема

$$L \frac{di}{dt} + iR + \frac{1}{C} \int i dt = u$$

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i = \frac{du}{dt}$$

Як відомо з математики, рішення лінійних диференційних рівнянь з постійними коефіцієнтами представляє собою суперпозицію двох рішень:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{в}} = i_{\text{зм}} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots ;$$

де  $i_{\text{пр}}$  - часне рішення неоднорідного рівняння,  $i_{\text{в}}$  - загальне рішення однорідного рівняння, яке виражене вище через сталі інтегрування  $A_1$ ,  $A_2$ , ... та корені  $p_1$ ,  $p_2$ , ... характеристичного рівняння для випадку, коли всі корені відмінні.

Загальне рішення  $i_{\text{в}}$  однорідного рівняння описує процес, який триває без впливу зовнішніх джерел за рахунок енергії, накопиченої до початку перехідного процесу; воно має однаковий вигляд для

жодного перехідного процесу в даному колі. Це рішення називають вільною складовою перехідного процесу. Так як запасена в колі енергія при відсутності зовнішніх джерел буде поступово витрачатись, вільна складова з течією часу буде зменшуватися до нуля. Математично це відповідає негативним речовим кореням або негативним речовим частинам комплексних коренів  $p_k$  характеристичного рівняння, що викликає зменшення у часі функцій виду  $A_k e^{p_k t}$ .

Часне рішення  $i_{пр}$  неоднорідного рівняння знаходиться видом функції, яка стоїть у правій частині рівняння і тому називається примусовим або вимушеним. Для кіл з заданими сталими або періодичними напругами (струмами) джерел енергії вимушене рішення збігається з встановленими значеннями розшукуваних величин та знаходиться відомими раніше методами розрахунку кіл.

Сума  $i=i_{пр}+i_{в}$  примусової та вільної складових представляє собою розшукувану величину, в даному випадку струм; вона називається перехідною. Перехідний струм перетворюється у вимушений, коли затухне вільний струм; математично суворо це трапиться при  $t = \infty$ , практично час перехідних процесів у більшості електричних кіл обчислюється долями секунди.

Виходячи з виразу для перехідної величини, знаходять сталі інтегрування  $A_1, A_2, \dots$  з початкових умов - значень напруги  $U_C(0)$  на ємностях та струмів  $i_L(0)$  у індуктивностях, які мали місце до початку перехідного процесу, та у відповідності з законами комутації, будуть тими ж і у початковий момент перехідного процесу.

Таким чином, методика розрахунку перехідних процесів, яка зветься класичною, полягає в складанні диференціальних рівнянь для кола, їх рішення та знаходженні сталих інтегрувань з початкових умов.

Відомо, що у колі, яке вміщує  $R, L$  та  $C$ , перехідні процеси можуть проходити або аперіодичними, або з затухаючими коливаннями.

Розглянемо перехідний процес в електричному колі (рис. 1.2), який настає при розімкненні ключа  $K$ .



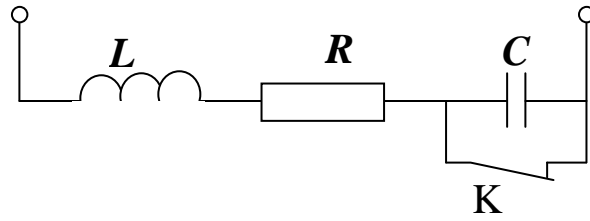


Рисунок 1.2 – Електрична схема

Постійну напругу  $U$  подано на послідовне з'єднання індуктивності  $L$  та активного опору  $R$ . Розрахунки будемо проводити класичним методом.

Повний опір кола

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (1.1)$$

Складаємо та вирішуємо характеристичне рівняння

$$Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC} = 0 \quad (1.2)$$

$$RCp + LCp^2 + 1 = 0 \quad (1.3)$$

$$p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0 \quad (1.4)$$

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (1.5)$$

Введемо позначення

$$\delta = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (1.6)$$

Тоді

$$p_1 = -\delta - \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}, \quad (1.7)$$

$$p_2 = -\delta + \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2}. \quad (1.8)$$

Нехай  $\omega_0 > \delta$

$$\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad (1.9)$$

$$p_1 = -\delta - j\omega_c \quad p_2 = -\delta + j\omega_c. \quad (1.10)$$

Знайдемо струм у вигляді вимушеної та вільної складових

$$i = i_{3M} + i_B = i_{3M} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (1.11)$$

Зі схеми можна побачити, що  $i_{3M} = 0$

$$i = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}. \quad (1.12)$$

Використовуючи перший та другий закони комутації

$$U_C(0^-) = U_C(0^+) = 0 \quad (1.13)$$

$$i_L(0^-) = i_L(0^+) = \frac{U}{R} \quad (1.14)$$

За другим законом Кірхгофа

$$U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (1.15)$$

Для  $t=0^+$  маємо

$$U = i(0^+)R + L \frac{di(0^+)}{dt} \quad (1.16)$$

З рівнянь (1.14) та (1.16)

$$\frac{di(0^+)}{dt} = \frac{U - i(0^+)R}{L} = 0. \quad (1.17)$$

Диференціюємо за часом рівняння (1.12)

$$\frac{di}{dt} = A_1 p_1 e^{p_1 t} + A_2 p_2 e^{p_2 t}. \quad (1.18)$$

З рівнянь (12) та (18) для  $t=0^+$

$$\begin{cases} A_1 = \frac{U}{R} \frac{p_2}{p_2 - p_1} \\ A_1 p_1 + A_2 p_2 = 0 \end{cases} \quad (1.19)$$

Вирішуємо систему (1.19)

$$A_1 = \frac{U}{R} \frac{p_2}{p_2 - p_1}, \quad (1.20)$$

$$A_2 = -\frac{U}{R} \frac{p_1}{p_2 - p_1}. \quad (1.21)$$

Підставляємо (1.20) та (1.21) у (1.12). Отримаємо

$$i = \frac{U}{R} \frac{p_2}{p_2 - p_1} e^{p_1 t} - \frac{U}{R} \frac{p_1}{p_2 - p_1} e^{p_2 t} = \frac{U}{R} \frac{1}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}). \quad (1.22)$$

Отримане рішення  $i(t)$  за формулою (1.22) зручно досліджувати графічно за допомогою пакету MathCAD.

На рис. 1.3, рис. 1.4, рис. 1.5 приведені графіки функції  $i(t)$  для  $t_0 = 0$ ,  $U = 10$  В,  $R = 35$  Ом,  $L = 1.5$  Гн та ємності  $C$ , яка дорівнює відповідно 0.002 Ф, 0.0002 Ф та 0.00002 Ф.

Формула (1.22) отримана точним аналітичним шляхом, а графіки рис. 1.3, рис. 1.4, рис. 1.5 побудовані за допомогою MathCAD. Але є перехідні процеси, розглядання яких приводить до нелінійних диференціальних рівнянь, які не мають точного рішення. У цьому випадку MathCAD треба використовувати як для побудови графічної залежності, так і для чисельного рішення диференціального рівняння.

## Послідовність виконання роботи

1. Ввімкнути ПК та завантажити програмний пакет MathCAD. Ввести початкові значення  $U := 10$   $R := 35$   $L := 1.5$   $C := 0.00002$ . Символ " := " (вводиться натисканням ":") є оператором вводу.

2. Ввести  $t := 0, 0.0001 .. 0.5$  - це означає, що  $t$  змінюється від 0 до 0.5 з інтервалом 0.0001 (символ діапазону дискретної величини вводиться натисканням ";").

3. Задати корені характеристичного рівняння  $p_1$  та  $p_2$  та функціональну залежність  $i(t)$ :

$$p_1 := \frac{-R}{2 \cdot L} - \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C}} \quad p_2 := \frac{-R}{2 \cdot L} + \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C}}$$

$$i(t) := \frac{U \cdot p_2 \cdot e^{p_1 t} - p_1 \cdot e^{p_2 t}}{R \cdot (p_2 - p_1)}$$

4. Створити графік залежності  $i = i(t)$ . Для цього натиснути комбінацію клавіш Shift+2. З'явиться пустий шаблон, в якому задати вісь абсцис як  $t$ , та вісь ординат як  $i(t)$ .

5. Створити три анімаційних кліпи та зафіксувати їхні фрагменти при різних значеннях параметрів  $R$ ,  $L$  та  $C$ , зміна яких, в свою чергу, досягається зміною параметра FRAME. Для цього додати FRAME до потрібного параметра (для  $C$  FRAME помножити на 0.0002, для  $L$  на 1,  $R$  на 3). Для кожного анімаційного кліпу треба задавати параметр FRAME заново, тому що MathCAD сприймає його тільки один раз. Щоб створити сам анімаційний кліп треба вибрати Вид->Анімація, завдати діапазон зміни параметру FRAME (для  $C$  - 6, для  $L$  - 6, для  $R$  - 20), узяти у рамку область графіка та натиснути кнопку "Анімація". Для відображення фрагмента кліпу необхідно вибрати команду "Копіювати" в меню створеного кліпу, а потім, вказавши місце, натиснути кнопку "Вставити" .

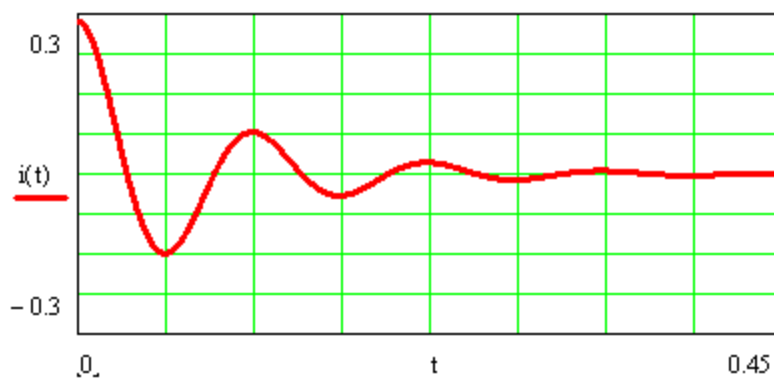


Рисунок 1.3 – Фрагмент анімаційного кліпу 1

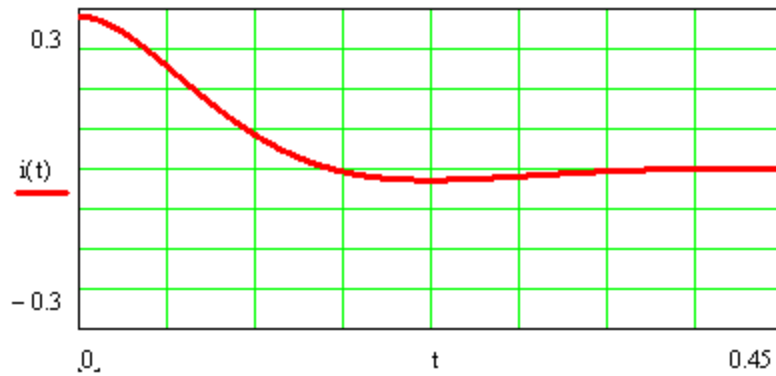


Рисунок 1.4 – Фрагмент анімаційного кліпу 2

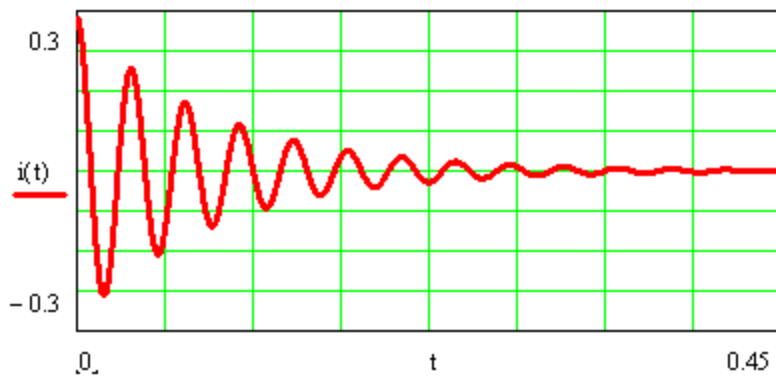


Рисунок 1.5 – Фрагмент анімаційного кліпу 3

## Контрольні питання

1. Що таке перехідний процес?
2. Поясніть значення законів комутації.
3. Яка потужність необхідна для миттєвої зміни енергії, накопиченої в електромагнітному полі кола,?
4. Що таке вимушена та вільна складові струму перехідного процесу?
5. Коли перехідний струм перетвориться у вимушений?
6. Як знаходять сталі інтегрування?
7. У чому полягає класичний метод розрахунку перехідних процесів?
8. Що таке характеристичне рівняння?
9. Як може проходити перехідний процес?
10. Як впливають параметри кола на характер перехідного процесу?

## Лабораторна робота № 2

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗВ'ЯЗАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО РІВНЯННЯ НА ПК

**Мета роботи:** досліджувати перехідні процеси в електричних колах з послідовно увімкненими  $R$ ,  $L$  та  $C$  за допомогою розв'язання диференційного рівняння на ПК з подальшим графічним побудуванням у пакеті MathCAD.

### Теоретичні положення

Як відомо, розрахунок перехідного процесу зводиться до розв'язання відповідного диференційного рівняння відносно струму як функції часу. В лабораторній роботі №1 вирішення такого рівняння було проведено аналітичним шляхом. У даній роботі розв'язання рівняння буде проведено на ПК. Розглянемо перехідний процес у колі показаному на рис. 1.1 (лабораторна робота №1), що настає при відключенні вимикача К.

Постійна напруга  $U$  подана на послідовно включені активний опір  $R$  і індуктивність  $L$ . Запишемо другий закон Кірхгофа для схеми рис. 1.2 (лабораторна робота №1) після відключення вимикача К.

$$U = U_R + U_L + U_C, \quad (2.1)$$

або

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt.$$

Продиференціюємо за часом обидві частини рівняння (2.1). Отримаємо лінійне диференційне рівняння другого порядку.

$$\frac{d^2 i}{dt^2} = -\frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{1}{LC} \cdot i, \quad (2.2)$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} + 2\alpha \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0,$$

де  $2\alpha = \frac{R}{L},$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}.$$

Рівняння (2.2) – однорідне, це означає, що струм в даному колі має тільки вільну складову.

Загальне рішення лінійного однорідного диференційного рівняння  $n$ -го порядку визначаються коренями характеристичного рівняння, яке виходить із диференціального рівняння заміною похідної  $k$ -го порядку ( $k=0, 1, \dots, n$ ) множником  $p^k$ . Для рівняння (2.2) характеристичне рівняння має вигляд

$$p^2 + 2\alpha \cdot p + \omega_0^2 = 0 \quad (2.3)$$

Корені характеристичного рівняння

$$p_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \quad (2.4)$$

Розв'яжемо рівняння (2.2) на ПК за допомогою програмного пакета MathCAD 2000 з подальшим графічним виведенням на екран дисплею.

Введемо позначення

$$Y_0 = i,$$

$$Y_1 = \frac{di}{dt}$$

та перетворимо рівняння (1) до стандартного вигляду

$$\dot{Y}_0 = Y_1$$

$$\dot{Y}_1 = -\frac{R}{L} Y_1 - \frac{1}{LC} \cdot Y_0. \quad (2.5)$$

Розв'язання системи рівнянь (2.5) знайдемо за допомогою стандартної функції системи MathCAD 2000 – Rkadapt( $Y_0, t_0, t_1, N, D$ ). В якості параметрів цієї функції використовується:

- вектор-стовпець  $Y_0$  початкових умов для системи рівнянь (2.5);
- час  $t_0$  початку ітерацій;
- параметр  $t_1$  – проміжок часу інтегрування;
- $N$  – кількість кроків за часом на ділянці інтегрування  $t_1$ ;
- $D$  – матриця правих частин системи рівнянь (2.5).

$$N=1000 \quad t_0:=0 \quad t_1:=2 .$$

Для даної системи рівнянь вектор-стовпець  $Y_0$  та матриця  $D$  приймають значення

$$Y_0 = \begin{pmatrix} U \\ R \\ 0 \end{pmatrix}; \quad D(t, Y) = \begin{pmatrix} Y_1 \\ -\frac{R}{L} \cdot Y_1 - \frac{1}{L \cdot C} \cdot Y_0 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Рішення системи рівнянь (2.5) має вигляд матриці  $S$ , стовпці якої є компонентами рішення, а саме:  $S^{(0)}$  – час  $t$ ,  $S^{(1)}$  – струм  $i$ ,  $S^{(2)}$  – перша похідна від струму за часом

$$S:=\text{Rkadapt}(Y_0, t_0, t_1, N, D) ; \quad (2.7)$$

$$t:=S^{(0)} ; \quad (2.8)$$

$$y1:=S^{(1)} . \quad (2.9)$$

Перехідний процес при  $U=10$  В,  $R=35$  Ом,  $L=1,5$  Гн,  $C=0,02$  Ф .

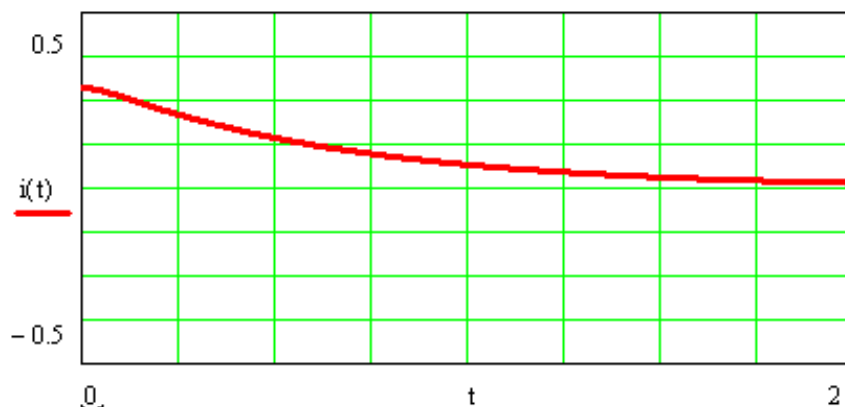


Рисунок 2.1 – Фрагмент анімаційного кліпу 1



## Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути ПК. Ввести початкові значення:  $U=10$  В;  $R=35$  Ом;  $L=1,5$  Гн та отримати графіки для  $C = 0,02$  Ф;  $0,002$  Ф;  $0,0002$  Ф;  $0,00002$  Ф відповідно.
2. Зробити висновок про характер перехідного процесу. Знайти аналітично граничне значення ємності  $C$  та перевірити на графіках.
3. Змінити початкові умови для  $U$  та  $R$  за вказівкою викладача.

## Контрольні запитання

1. Які існують методи розрахунку перехідних процесів?
2. В яких випадках краще використання ПК для розрахунку перехідних процесів в електричних колах?
3. Які методи розв'язання диференціальних рівнянь найбільш частіше використовується для чисельного рішення на ПК?
4. Як впливають параметри кола  $R$ ,  $L$ ,  $C$  на характер перехідного процесу?

## Лабораторна робота № 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ЕЛЕМЕНТАМИ $R$ І $C$ ТА ДЖЕРЕЛОМ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

**Мета роботи:** за допомогою графічного зображення на ПК досліджувати перехідні процеси в електричному колі з елементами  $R$  і  $C$  та джерелом постійної напруги  $E$ .

#### Теоретичні положення

Розглянемо перехідний процес у електричному колі постійного струму, показаному на рис. 3.1, наступаючий після включення вимикача.

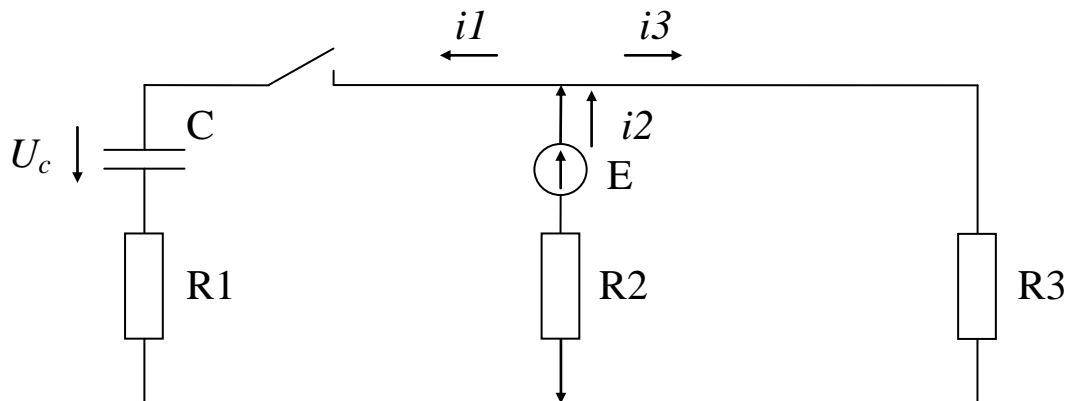


Рисунок 3.1 – Електрична схема

Параметри досліджуваної схеми дорівнюють:  $E=150$  В;  $R_1=100$  Ом;  $R_2=20$  Ом;  $R_3=30$  Ом;  $C=150$  мкФ. Конденсатор до комутації будемо вважати незарядженим.

Визначимо класичним методом закони зміни у часі струмів в усіх гілках схеми (рис. 3.1) і напругу на конденсаторі  $C$  після комутації.

Для післякомутаційної схеми запишемо систему рівнянь для миттєвих значень струмів за 1 законом Кірхгофа та миттєвих значень напруги за 2 законом Кірхгофа.

$$\begin{cases} i_1 + i_3 = i_2 \\ E = i_3 \cdot R_3 + i_2 \cdot R_2 \\ E = i_1 \cdot R_1 + U_C + i_2 \cdot R_2. \end{cases} \quad (3.1)$$

Записуємо напругу на конденсаторі  $U_C$  у вигляді суми примушеної і вільної складової

$$U_C = U_{Cпр} + U_{Cв}. \quad (3.2)$$

Для встановленого режиму ( $t = \infty$ ) визначаємо примушену напругу з 3-го рівняння системи (1).

$$E = i_{1пр} \cdot R_1 + U_{Cпр} + i_{2пр} \cdot R_2$$

$$i_{1пр} = 0$$

$$i_{2пр} = i_{3пр} = \frac{E}{R_2 + R_3} = \frac{150}{20 + 30} = 3 \text{ A.}$$

$$U_{Cпр} = E - i_{1пр} \cdot R_1 - i_{2пр} \cdot R_2 = 150 - 3 \cdot 20 = 90 \text{ В.}$$

Складаємо і вирішуємо характеристичне рівняння (за вхідним опором):

$$Z = R_2 + \frac{R_3 \cdot (R_1 + 1/j\omega C)}{R_3 + R_1 + 1/j\omega C} \quad (3.3)$$

$$Z(p) = R_2 + \frac{R_3 \cdot (R_1 + 1/pC)}{R_3 + R_1 + 1/pC}$$

$$20 + \frac{30 \cdot (100 + 1/p \cdot 150 \cdot 10^6)}{30 + 100 + 1/p \cdot 150 \cdot 10^6} = 0$$

З цього рівняння знаходимо показник затухання

$$p = -59.$$

Вільна складова напруги

$$U_{Cв} = A_1 \cdot e^{-59t} \quad (3.4)$$

Повна напруга

$$U_C = U_{C_{\text{пр}}} + U_{C_{\text{в}}} = 90 + A_1 \cdot e^{-59t}.$$

Для моменту до комутації ( $t=0^-$ ), вважаємо  $U_C(0^-)=0$ .

Згідно з другим законом комутації

$$U_C(0^-) = U_C(0^+) = 0. \quad (3.5)$$

Знаходимо сталу  $A$  з початкових умов

$$U_C(0^+) = 90 + A = 0;$$

$$A = -90.$$

Записуємо рішення для  $U_C$ :

$$U_C = 90 - 90 \cdot e^{-59t} = 90 \cdot (1 - e^{-59t}) \text{ В}. \quad (3.6)$$

Знаходимо струм

$$i_1 = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = 150 \cdot 10^{-6} \cdot (-90) \cdot (-59) \cdot e^{-59t} = 0.8 \cdot e^{-59t} \text{ А}. \quad (3.7)$$

З рівняння (3.7) та системи (3.1), знаходимо  $i_2$ :

$$i_2 = \frac{E}{R_2} - i_1 \frac{R_1}{R_2} - \frac{1}{R_2} \cdot U_C$$

$$i_2 = \frac{150}{20} - 0.8 \cdot e^{-59t} \cdot \frac{100}{20} - \frac{1}{20} \cdot 90 \cdot (1 - e^{-59t}) \cdot U_C$$

$$i_2 = 3 + 0.5e^{-59t} \text{ А}. \quad (3.8)$$

З рівняння 1 системи (1), знаходимо

$$i_3 = i_2 - i_1$$

$$i_3 = 3 - 0.3 \cdot e^{-59t} \text{ А}. \quad (3.9)$$

Перевіряємо правильність 1 закону Кірхгофа у будь-який момент часу

$$i_3 + i_1 = i_2$$

$$0.8 \cdot e^{-59t} + 3 - 0.3 \cdot e^{-59t} = 3 + 0.5e^{-59t} .$$

Тотожність виконується.

Отримане рішення зручно досліджувати графічно за допомогою ПК.

Для побудування графіків використаємо програму MathCAD 2000. Для цього треба ввести в систему MathCAD 2000 наступну програму:

$$i_1(t) := 0.8 \cdot e^{-59t}$$

$$i_2(t) := 3 + 0.5 \cdot e^{-59t}$$

$$i_3(t) := 3 - 0.3 \cdot e^{-59t}$$

$$U_C(t) := 90 \cdot (1 - e^{-59t}).$$

Формули отримані точним аналітичним шляхом, а графіки (рис. 3.2) побудовані за допомогою ПК.

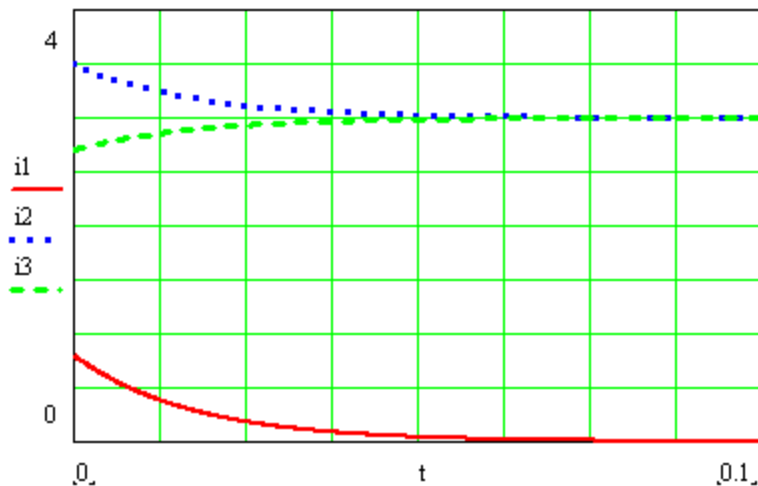


Рисунок 3.2 – Графіки функцій  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  і  $U_C(t)$

Однак є перехідні процеси, розгляд яких приводить до нелінійних диференціальних рівнянь, які не мають точного рішення. У цьому випадку ПК необхідно використовувати як для чисельного рішення диференційного рівняння, так і побудування графіків.

Покажемо це для знаходження  $U_C(t)$ .

Запишемо струм  $i_1$  через конденсатор  $C$  у вигляді

$$i_1 = C \cdot \frac{dU_C}{dt} \quad (3.10)$$

Підставимо цей вираз у рівняння 3.3 системи (3.1)

$$\varepsilon = R_1 \cdot C \cdot \frac{dU_C}{dt} + U_C + i_2 \cdot R_2. \quad (3.11)$$

Виразимо з 1 та 2 рівнянь системи (3.1) струм  $i_2$ , через струм  $i_1$ , та отримаємо:

$$i_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + R_3} + i_1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}$$

Підставимо цей вираз в (3.11) отримаємо

$$\varepsilon = R_1 \cdot C \cdot \frac{dU_C}{dt} + U_C + \frac{\varepsilon \cdot R_2}{R_2 + R_3} + i_1 \cdot \frac{\varepsilon \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

Замінімо у цьому виразі  $i_1$  за формулою (3.10) та отримаємо наступне рівняння

$$\varepsilon = R_1 \cdot C \cdot \frac{dU_C}{dt} + U_C + \frac{\varepsilon \cdot R_2}{R_2 + R_3} + C \cdot \frac{dU_C}{dt} \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.12)$$

З (3.12) отримаємо диференціальне рівняння для знаходження функції  $U_C(t)$ :

$$\frac{dU_C}{dt} = -\frac{R_2 \cdot R_3}{C \cdot (R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3)} \cdot U_C + \varepsilon \frac{R_3}{C \cdot (R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3)}.$$

Підставимо умови задачі та отримаємо

$$\frac{dU_C}{dt} = -60 \cdot U_C + 5333. \quad (3.13)$$

Початкове рівняння для рішення визначено у (3.5).

Вирішимо рівняння (3.13) на ПК за допомогою програми MathCAD 2000 з подальшим графічним виведенням на екран дисплею. Введемо позначення

$$Y_0 = U_c ;$$

$$Y_1 = \frac{dU}{dt}$$

та перетворимо рівняння (3.13) до стандартного вигляду

$$\dot{Y}_0 = Y_1$$

$$\dot{Y}_1 = -60 \cdot Y_0 + 5333 \quad (3.14)$$

Розв'язання системи рівнянь (3.14) знайдемо за допомогою стандартної функції системи MathCAD 2000 - Rkadapt ( $Y_0, t_0, t_1, N, D$ ). В якості параметрів цієї функції використовуються:

- вектор-стовпчик  $Y_0$  початкових умов для системи рівнянь (3.14), час  $t_0$  початку ітерацій;
- параметр  $t_1$  – проміжок часу інтегрування;
- $N$  – кількість кроків за часом на ділянці інтегрування  $t_1$ ;
- $D$  – матриця правих частин системи рівнянь.

$$N:=1000 \quad t_0:=0 \quad t_1:=0,1.$$

Для даної системи рівнянь вектор-стовпчик  $Y_0$  та матриця  $D$  приймають значення

$$Y_0 := 0$$

$$D(t, Y) := -60 \cdot Y_0 + 5333. \quad (3.15)$$

Рішення системи рівнянь має вигляд матриці  $S$ , стовпці якої є компонентами рішення, а саме:  $S^{(0)}$  - час  $t$ ,  $S^{(1)}$  - напруга.

$$S := \text{Rkadapt}(Y_0, t_0, t_1, N, D) \quad (3.16)$$

$$t := S^{(0)} \quad (3.17)$$

$$U_c := S^{(1)}. \quad (3.18)$$

Рішення рівняння (3.13) у графічному вигляді наведено на рис. 3.3.

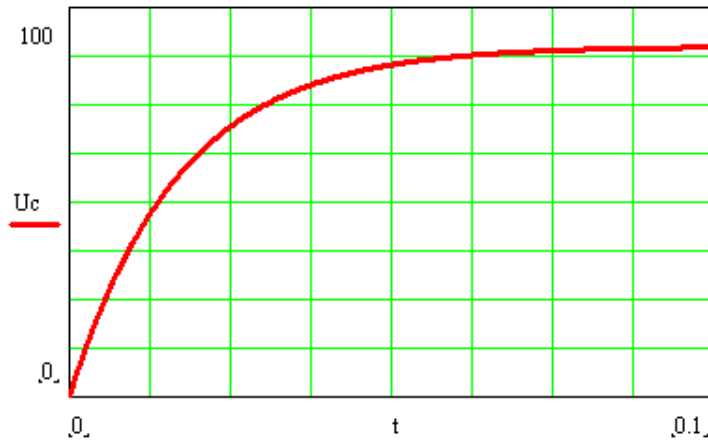


Рисунок 3.3 – Графік функції  $U_C(t)$

## Порядок виконання роботи

1. Ввести вирази для струмів і напруги в систему MathCAD 2000 та побудувати графіки. Зробити висновок про характер перехідного процесу та про вплив на нього ємності  $C$ .

2. Змінити програму для випадку, коли конденсатор був попередньо заряджений до напруги 100 В, співпадаючого з полярністю  $E$ . Отримати графіки для цього випадку. Зробити висновок про зміну характеру перехідного процесу.

3. Змінити програму для випадку, коли конденсатор був попередньо заряджений до напруги 100 В, з полярністю протилежній полярності  $E$ . Отримати графіки для цього випадку. Зробити висновок про зміну характеру перехідного процесу.

4. Ввести програму для розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь. Отримати графіки. Порівняти криві  $U_C(t)$ , отримані двома способами.

## Контрольні запитання

1. На чому засновано класичний метод розрахунку перехідних процесів? Що таке характеристичне рівняння?

2. Як може протікати перехідний процес в колі  $R, C$ ?

3. Як впливають параметри кола на характер перехідного процесу?

4. Чим краще застосування ПК при можливості отримання аналітичного рішення?



## Лабораторно-практична робота № 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ЕЛЕМЕНТАМИ $R$ І $C$ ТА ДЖЕРЕЛОМ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** за допомогою графічного зображення на ПК досліджувати перехідні процеси в електричному колі з елементами  $R$  і  $C$  та джерелом змінної напруги.

#### Теоретичні положення

Розглянемо перехідний процес у колі синусоїдального струму, показаному на рис. 4.1, наступаючий після включення вимикача.

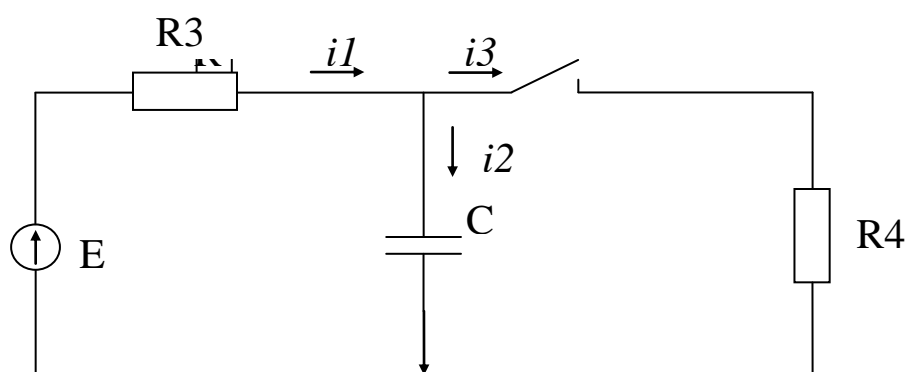


Рисунок 4.1 – Електрична схема

Параметри кола дорівнюють:

$E_m = 120$  В;  $\psi_2 = 60^\circ$ ;  $\omega = 1000$  рад/с;  $R_3 = 2000$  Ом;  $R_4 = 1500$  Ом;  $C = 6$  мкФ.

Визначити класичним методом закони зміни струму  $i_2$ .

Для післякомутаційної схеми запишемо для миттєвих значень струмів рівняння за 1 і 2 законами Кірхгофа.

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ e = i_1 \cdot R_3 + U_C \\ e = i_1 \cdot R_3 + i_3 \cdot R_4 \end{cases} \quad (4.1)$$

Запишемо напругу на конденсаторі у вигляді суми примушеної і вільної складової

$$U_C = U_{Cпр} + U_{Cв}. \quad (4.2)$$

Для усталеного режиму ( $t = \infty$ ) визначаємо примушену напругу з 2 рівняння системи (4.1).

Для миттєвих значень

$$E = i_{1пр} \cdot R_1 + U_{Cпр}.$$

Для комплексів діючих значень

$$\dot{E} = \dot{I}_{1пр} \cdot R_1 + U_{Cпр}.$$

Визначимо примушену складову струму

$$\dot{I}_{1пр} = \frac{\dot{E}}{R_3 + \frac{R_4 \cdot 1/j\omega C}{R_4 + 1/j\omega C}}.$$

Підставимо початкові значення і визначимо струм

$$\dot{I}_{1пр} = 0,017 + j0,037.$$

Визначимо примушену складову напруги на конденсаторі

$$\dot{U}_{Cпр} = \dot{E} - \dot{I}_{1пр} \cdot R_3$$

$$\dot{U}_{Cпр} = 8,5 - j0,1.$$

Представимо його у вигляді

$$\dot{U}_{Cпр} = 8,5 \cdot e^{-j0,8}.$$

$$u_{Cпр} = 12 \cdot \sin(1000t - 0,8^\circ).$$

Складаємо і вирішуємо характеристичне рівняння (за вхідним опором)

$$Z = R_3 + \frac{R_4 \cdot 1/j\omega C}{R_4 + 1/j\omega C} \quad (4.3)$$

$$Z(p) = R_3 + \frac{R_4 \cdot 1/pC}{R_4 + 1/pC} = 0$$

$$2000 + \frac{1500 \cdot 1/p \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{1500 + 1/p \cdot 6 \cdot 10^{-6}} = 0.$$

З цього рівняння знаходимо показник затухання

$$p = -194.$$

Таким чином, вільна складова напруги буде мати вигляд

$$U_{Cв} = A \cdot e^{-194t},$$

де  $A$  – стала інтегрування.

Для знаходження  $A$  записуємо повну напругу

$$U_C = U_{Cпр} + U_{Cв} = 12 \cdot \sin(1000t - 0,8^\circ) + A \cdot e^{-194t}. \quad (4.4)$$

Визначимо значення  $U_C$  до моменту комутації ( $t=0-$ )

$$\dot{I}_1(0-) = \frac{\dot{E}}{R_3 + 1/j\omega C} = 0,018 + j0,038,$$

$$\dot{U}_C(0-) = \dot{E} - \dot{I}_1(0-) \cdot R_3 = 6,5 - j2,1.$$

Для визначення  $U_C$  представимо його у показовій формі комплексного числа та у миттєвому значенні

$$\dot{U}_C(0-) = 6,8 \cdot e^{-j18},$$

$$u_C = 9,6 \cdot \sin(1000t - 18^\circ),$$

та розрахуємо  $U_C$  для моменту часу  $t=0$

$$U_C(0-) = 9,6 \cdot \sin(-18^\circ) = -2,97.$$

Знаходимо сталу  $A$  за другим законом комутації для моменту часу  $t=0$

$$U_C(0-) = U_C(0+) = -2,97$$

$$-2,97 = 12 \cdot \sin(-0,8^\circ) + A$$

$$A = -2,8.$$

Записуємо рішення для  $U_C(t)$

$$U_C(t) = 12 \cdot \sin(1000t - 0,8^\circ) - 2,8 \cdot e^{-194t} \quad (4.5)$$

За законом (4.5) буде змінюватися напруга  $U_C$  на конденсаторі  $C$  улюбий момент часу  $t$ .

Знаходимо струм через конденсатор  $i_2(t)$

$$i_2 = C \cdot \frac{dU_C}{dt} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot (12 \cdot 1000 \cdot \cos(1000t - 18^\circ) + 2,8 \cdot 194 \cdot e^{-194t}),$$

$$i_2(t) = 0,0072 \cdot \cos(1000t - 18^\circ) + 0,00325 \cdot e^{-194t}. \quad (4.6)$$

За законом (4.6) буде змінюватися струм  $i_2(t)$  через конденсатор  $C$  улюбий момент часу  $t$ .

Отримане рішення зручно досліджувати графічно за допомогою ПК.

Для побудування графіків (рис. 4.2) використаємо програму MathCAD 2000. Для цього треба ввести в систему MathCAD 2000 наступну програму:

$$i_2(t) := 0.0072 \cdot \cos(1000 \cdot t - \frac{\pi}{10}) + 0.00325 \cdot e^{-194t}.$$

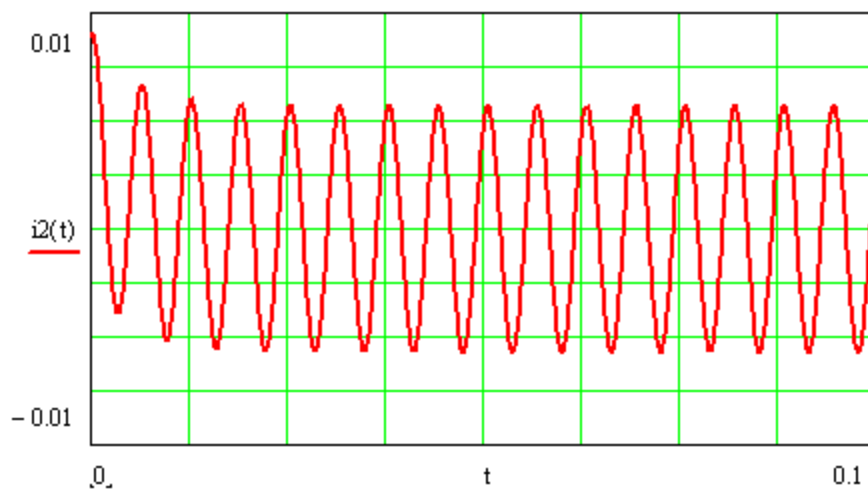


Рисунок 4.2 – Графік функції  $i_2(t)$

## Порядок виконання роботи

1. Ввести вираз для струму у системі MathCAD 2000 та побудувати графіки. Зробити висновок про характер перехідного процесу та про вплив на нього ємності  $C$ .

2. Ввести вираз для напруги на конденсаторі у системі MathCAD 2000 згідно формули (4.5) та побудувати графіки. Зробити висновок про характер перехідного процесу та про вплив на нього ємності  $C$ .

2. Самостійно скласти програму для визначення функції  $i_2(t)$  шляхом розв'язання диференціального рівняння на ПК за аналогією з програмою для розв'язання диференціальних рівнянь в лабораторній роботі № 3.

3. Отримати графік та порівняти його з графіком з п. 1.

## Контрольні запитання

1. У чому особливість знаходження сталих інтегрування при перехідному процесі з джерелом змінного струму?

2. Як впливає момент включення кола на характер перехідного процесу?

3. Як впливають параметри активних та реактивних елементів електричного кола на характер перехідного процесу?

4. В яких випадках можуть виникати в гілках схеми сверхструми, які призводять до виходу електричної апаратури з робочого стану?

5. Чим краще застосування ПК та системи MathCAD 2000 для розрахунку перехідних процесів?

## Лабораторна робота № 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРАФІЧНОЇ ПОБУДОВИ НА ПК

**Мета роботи:** дослідити перехідні процеси в електричних колах змінного струму з послідовно ввімкненими  $R$ ,  $L$  та  $C$  за допомогою графічної побудови на ПК аналітично отриманих формул.

Апаратура та пристрої

1. ПК.
2. Програмний пакет MathCAD.

### Теоретичні положення

При ввімкненні кола з  $R$ ,  $L$  та  $C$  вказаного на рис. 1.2 на змінну напругу  $u=U_m \sin(\omega t + \psi)$  перехідний струм буде представляти собою суму примусових синусоїдальних та вільних затухаючих складових, які носять аперіодичний або коливальний характер з власною частотою  $\omega_1$ , яка в загальному випадку не дорівнює частоті  $\omega$ . Перехідний процес у відмінності від випадку з постійною напругою буде також залежати від фази включення  $\psi$ .

Як відомо з лабораторної роботи 1 коренями характеристичного рівняння є

$$p_1 = -\delta - j\omega_c,$$

$$p_2 = -\delta + j\omega_c$$

де 
$$\delta = \frac{R}{2L},$$

$$\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

а струм перехідного процесу дорівнює  $i = i_{\text{пр}} + i_{\text{в}}$ .

Примусова синусоїдальна складова має вигляд у даному випадку

$$i_{\text{пр}} = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi_L + \varphi_C),$$

$$\text{де } Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

$$\varphi_L = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right),$$

$$\varphi_C = \arctg\left(\frac{1}{\omega CR}\right).$$

Вільна затухаюча складова має такий же вигляд як для постійного струму

$$i_{\text{в}} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Згідно з цим струм дорівнює

$$i = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi_L + \varphi_C) + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (5.1)$$

Складемо рівняння за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + U_C,$$

звідси

$$\frac{di}{dt} = \frac{u - iR - U_C}{L}.$$

Згідно з першим та другим законами комутації

$$i_L(0+) = i_L(0-) = \frac{U_m}{Z_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L)$$

$$U_C(0+) = U_C(0-) = 0,$$

де  $Z_{LR} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$  - повний опір докомутаційного кола.

Перепишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для  $t = 0+$

$$\frac{di(0+)}{dt} = \frac{u - i(0+)R - U_C(0+)}{L} = \frac{U_m}{L} \sin(\psi) - \frac{U_m R}{LZ_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L).$$

Диференціюємо рівняння перехідного струму (5.1) за часом для  $t=0+$

$$\frac{di(0+)}{dt} = \frac{U_m \omega}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C + \frac{\pi}{2}) + A_1 p_1 + A_2 p_2.$$

Запишемо рівняння перехідного струму для  $t = 0+$

$$i(0+) = \frac{U_m}{Z_{заг}} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C) + A_1 + A_2.$$

Для визначення сталих інтегрування  $A_1$  та  $A_2$  складаємо систему рівнянь

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 p_1 + A_2 p_2 = \frac{U_m}{L} \sin(\psi) - \frac{U_m R}{LZ_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{U_m \omega}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C + \frac{\pi}{2}) \\ A_1 + A_2 = \frac{U_m}{Z_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C). \end{array} \right.$$

$$A_1 = \frac{U_m}{Z_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C) - A_2$$

$$A_2 = \frac{U_m}{L(p_2 - p_1)} \sin(\psi) - \frac{U_m R}{LZ_{LR}(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L) -$$

$$- \frac{U_m \omega}{Z(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C + \frac{\pi}{2}) -$$

$$- \frac{U_m p_1}{Z_{LR}(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L) + \frac{U_m p_1}{Z(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C)$$



$$\begin{aligned}
A_1 = & \frac{U_m}{Z_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{U_m}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C) - \frac{U_m}{L(p_2 - p_1)} \sin(\psi) + \\
& + \frac{U_m R}{LZ_{LR}(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L) + \frac{U_m \omega}{Z(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C + \frac{\pi}{2}) + \\
& + \frac{U_m p_1}{Z_{LR}(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L) + \frac{U_m p_1}{Z(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C).
\end{aligned}$$

Якщо підставити сталі інтегрування  $A_1$  та  $A_2$  у вираз для перехідного струму, отримаємо

$$\begin{aligned}
i = & \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \psi - \varphi_L + \varphi_C) + \\
& + U_m e^{p_1 t} \left[ \frac{1}{Z_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{1}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C) - \frac{1}{L(p_2 - p_1)} \sin(\psi) + \right. \\
& + \frac{R}{LZ_{LR}(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L) + \frac{\omega}{Z(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C + \frac{\pi}{2}) + \\
& \left. + \frac{p_1}{Z_{LR}(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{p_1}{Z(p_2 - p_1)} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C) \right] + \\
& + \frac{U_m e^{p_2 t}}{p_2 - p_1} \left[ \frac{1}{L} \sin(\psi) - \frac{R}{LZ_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) - \frac{\omega}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C + \frac{\pi}{2}) - \right. \\
& \left. - \frac{p_1}{Z_{LR}} \sin(\psi - \varphi_L) + \frac{p_1}{Z} \sin(\psi - \varphi_L + \varphi_C) \right].
\end{aligned}$$

Отримане рішення  $i(t)$  за формулою зручно досліджувати графічно за допомогою пакету MathCAD.

На рис. 5.1, рис. 5.2, рис. 5.3. рис. 5.4 приведені графіки функції  $i(t)$  для  $t_0=0$ ,  $U=10$  В,  $R=35$  Ом,  $L= 1.5$  Гн та ємності  $C$ , яка дорівнює відповідно 0.02 Ф, 0.002 Ф, 0.0002 Ф та 0.00002 Ф.

Графіки рис. 5.1, рис. 5.2, рис. 5.3. рис. 5.4 побудовані за допомогою MathCAD.

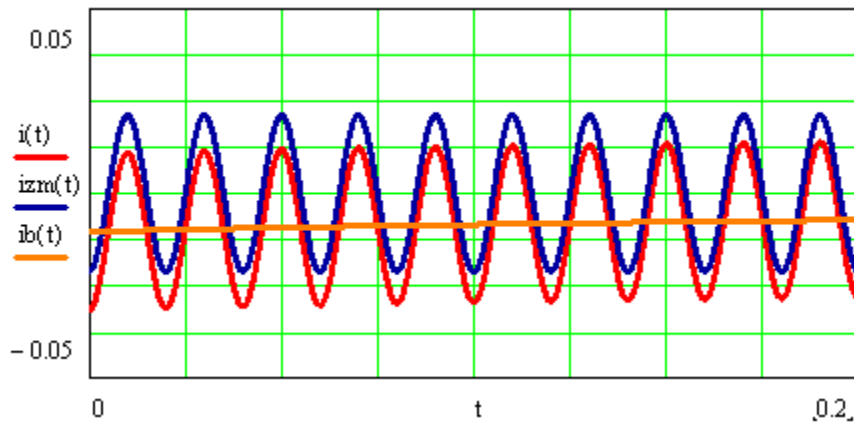


Рисунок 5.1 – Фрагмент 1 графіків функцій

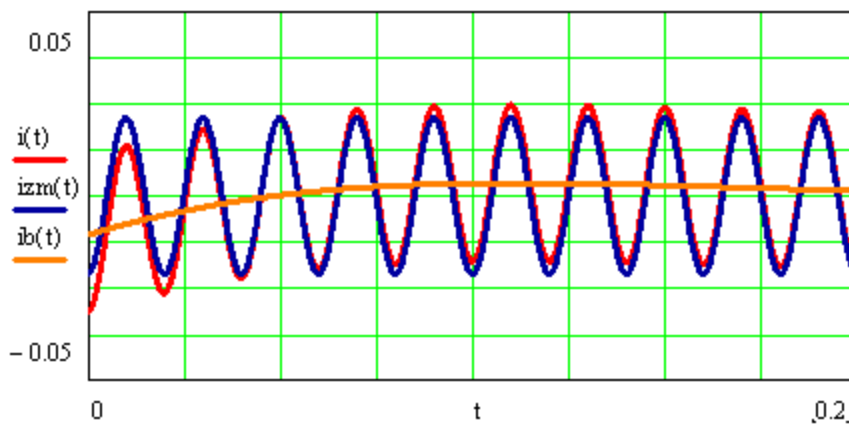


Рисунок 5.2 – Фрагмент 2 графіків функцій

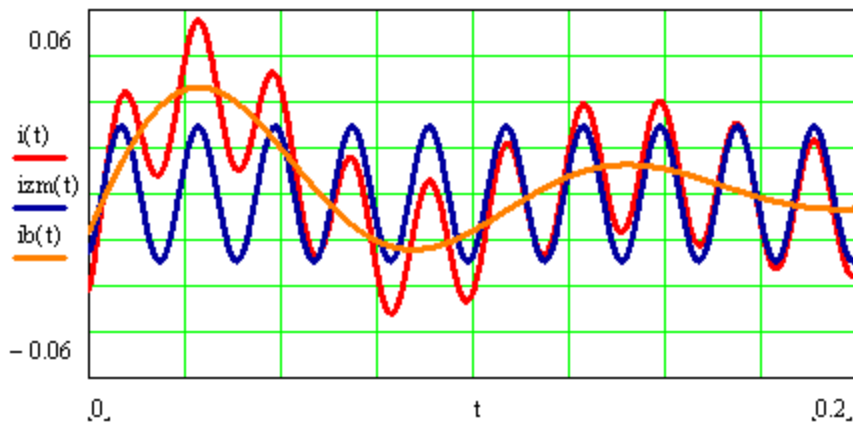


Рисунок 5.3 – Фрагмент 3 графіків функцій

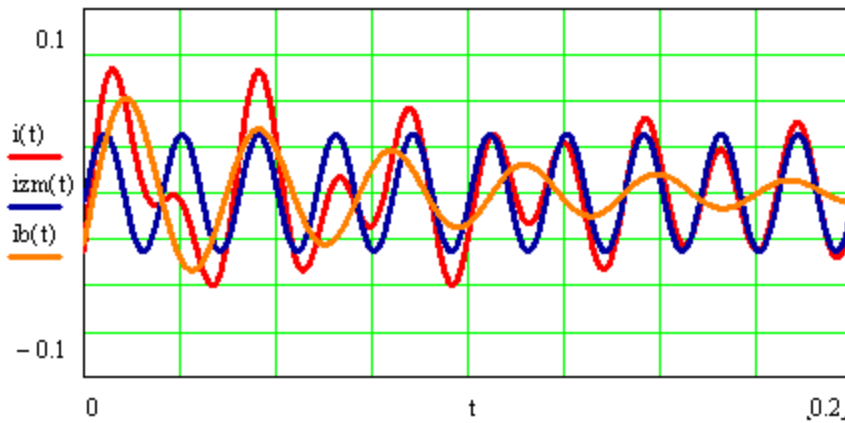


Рисунок 5.4 – Фрагмент 4 графіків функцій

### Послідовність виконання роботи.

1. Ввімкнути ПК та завантажити програмний пакет MathCAD. Ввести початкові значення  $U:=10$   $R:=35$   $L:=1.5$   $C:=2 \cdot 10^{-2}$   $f:=50$   $\psi:=0$ .

Ввести

$t:=0,0.0001 \dots 0.2$ , це означає, що  $t$  змінюється від 0 до 0.2 з інтервалом  $10^{-4}$ .

2. Задати корені характеристичного рівняння  $p_1$  та  $p_2$  сталі інтегрування  $A_1$  та  $A_2$ , кути зсуву  $\varphi_L$  та  $\varphi_C$ , та функціональні залежності  $i_b(t)$  та  $i_{np}(t)$

$$i_b(t) := A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}.$$

$$i_{np}(t) := \frac{U_m}{Z} \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_L + \varphi_C)$$

$$i(t) := \frac{U_m}{Z} \sin(\omega \cdot t + \psi - \varphi_L + \varphi_C) + A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}.$$

3. Створити зображення залежностей  $i(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_{np}(t)$  на єдиній графічній площині. В шаблоні задати вісь абсцис як  $t$ , та вісь ординат як  $i(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_{np}(t)$  (вводити через кому).

4. Створити три анімаційних кліпи та зафіксувати їхні фрагменти при різних значеннях параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  зміна яких, в свою чергу, досягається зміною параметра FRAME (див. лабораторна робота № 1).

## Контрольні запитання

1. Від чого залежить характер перехідного струму при змінній напрузі?
2. Якого впливу завдає початкова фаза ввімкнення?
3. Як впливає зміна активного опору на перехідний струм?
4. Як впливає зміна індуктивності на перехідний струм?
5. Як впливає зміна ємності на перехідний струм?
6. Від чого залежить амплітуда коливань перехідного струму?
7. Як залежать кути зсуву фаз від частоти?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: Підручник для бакалаврів. М. Видавництво “Юрайт”, 2016. – 702 с.
2. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола. Навчальний посібник. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
3. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами: підручник / Ю.О. Карпов, С.Ш. Кацив, В. В. Кухарчук, Ю.Г. Ведміцький ; під ред. проф. Ю.О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.
4. Малинівський С.М. Загальна електротехніка: Підручник. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 640 с.
5. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. Кн. 1. Аналіз лінійних електричних кіл. Часова область: Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Спивак; За ред. М.Б. Ігумен. – К.: Вища шк., 2003. – 399 с.
6. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. Кн. 2. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область: Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Спивак; За ред. М.Б. Ігумен. – К.: Вища шк., 2003. – 358 с.
7. Теорія електричних і магнітних кіл. Соколов Ю.В., Бабаєв М.М., Давиденко М.Г. – Харків: ХФВ "Транспорт України", 2002. – 264 с.
8. Методичні вказівки до курсової роботи з “Теоретичні основи електротехніки” (Розділ “Перехідні процеси”) Смирнов О.П., Борисенко А.О., Харків, ХНАДУ, 2020, 36 с. <http://files.khadi.kharkov.ua>