

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

---

Кафедра «Електротехніка та Електромеханіка»

*В авторській редакції*

# **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

Навчально-методичні рекомендації  
до лабораторних робіт

Частина 2

*Електронне видання*

ДНІПРО  
2024

Упорядники:

*О. І. Бондар, О. Л. Маренич, О. О. Карзова*

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми  
141 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

Протокол № 2 від 30.10.2024

Т 33 Теоретичні основи електротехніки : навчально-методичні рекомендації до лабораторних робіт / упоряд. О. І. Бондар, О. Л. Маренич, О. О. Карзова ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – Ч. 2. – 47 с.

Навчально-методичні рекомендації охоплюють зміст восьми лабораторних робіт з другої частини дисципліни ТОЕ, а саме: теорії кіл несинусоїдного струму, нелінійних електричних та магнітних кіл, перехідних процесів у лінійних електричних колах а також теорії електромагнітного поля.

Навчально-методичні рекомендації містять основні теоретичні положення для засвоєння матеріалу, інструкції до виконання лабораторних робіт, вимоги до аналізу результатів та оформлення робіт. Призначені для студентів II курсу усіх форм навчання за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Іл. 22. Табл. 8. Бібліогр.: 10 найм.

## ЗМІСТ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. Дослідження кола періодичного несинусоїдного струму.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. Дослідження електричного кола постійного струму з нелінійними елементами .....	8
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. Дослідження нерозгалуженого магнітного кола .....	13
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. Дослідження котушки з феромагнітним осердям (нелінійного дроселя) .....	18
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. Дослідження перехідних процесів у нерозгалуженому колі з ємнісним елементом .....	22
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. Дослідження перехідних процесів у розгалуженому колі з ємнісним елементом .....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. Дослідження перехідних процесів у коливальному контурі .....	33
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8. Дослідження електричного поля у плоскому провідному листі .....	40
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	46

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

### I. Мета роботи

Вимірювання струму, напруги та потужності у колах періодичного несинусоїдного струму.

### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Амперметр магнітоелектричний  $A1 - 0...2$  А.
2. Амперметр електромагнітний  $A2 - 0,4...2$  А.
3. Вольтметр магнітоелектричний  $V1 - 0...150$  В.
4. Вольтметр електромагнітний  $V2, V3 - 30...150$  В.
5. Ватметр електродинамічний  $W - 2$  А,  $150$  В.
6. Реостат  $R - 100$  Ом.
7. Магазин ємностей  $C - 50$  мкФ.
8. Рубильники однополюсні  $S1, S2$ .
9. Осцилограф  $C1-69$ .

### III. Короткі відомості з теорії

Під періодичними несинусоїдними електричними величинами, у подальшому скорочено н.е.в., розуміють такі електричні величини, що змінюються за часом за періодичним несинусоїдним законом. Вони виникають у разі принципово різних режимів роботи електричних кіл, пристроїв і систем.

Будь-яка періодична н.е.в.  $a(t)$ , що задовольняє вимогам Діріхле, може бути розкладена в тригонометричний ряд Фур'є – Ейлера вигляду:

$$a(t) = A_0 + \sum_{k=1}^n A_m^{(k)} \cdot \sin\left(k\omega t + \psi_a^{(k)}\right),$$

де  $A_0$  або  $A^{(0)}$  – постійна складова, або нульова гармоніка;

$A_m^{(1)}, \psi_a^{(1)}$  – амплітуда і початкова фаза основної, або першої гармоніки;

$A_m^{(k)}, \psi_a^{(k)}$  при  $k > 1$  – амплітуди і початкові фази вищих гармонік.

Якщо в досліджуваному колі діють одне чи декілька джерел періодичних несинусоїдних ЕРС чи (і) струмів, то шукані струми у вітках і напруги на ділянках заданого кола визначають як алгебричну суму їх миттєвих величин, одержаних для кожної гармоніки. Наприклад, струм в  $l$ -й вітці знаходять за виразом

$$i_l(t) = I_l^{(0)} + i_l^{(1)}(t) + i_l^{(2)}(t) + i_l^{(3)}(t) + \dots$$

При цьому діюче значення довільної періодичної н.е.в. визначають як корінь квадратний із суми квадратів діючих значень усіх гармонік ряду, враховуючи і нульову гармоніку. Якщо, наприклад, задається несинусоїдна напруга  $u(t)$ , що діє в колі, то її діюче значення запишеться як

$$U = \sqrt{\left(U^{(0)}\right)^2 + \left(U^{(1)}\right)^2 + \left(U^{(2)}\right)^2 + \dots}$$

У досліджуваному колі лабораторної роботи (рис. 1.1) несинусоїдний струм у навантаженні  $R$  створюється в результаті дії накладених джерел постійної ЕРС  $E$  (із напругою  $U^{(0)}$ ) і синусоїдної ЕРС  $e(t)$  (із напругою  $u(t) = U_m \sin \omega t$ ).

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Скласти коло (див. рис. 1.1).
- А. Коло постійного струму.
  1. Переключити рубильники  $S1$  та  $S2$  у положення 1 та увімкнути коло.
  2. Виконати виміри і записати показання приладів до табл. 1.1.
  3. Зарисувати осцилограму напруги на опорі навантаження  $R$ .
- Б. Коло синусоїдного струму.
  1. Переключити рубильники  $S1$  та  $S2$  у положення 2 та увімкнути коло.
  2. Виконати виміри і записати показання приладів до табл. 1.1.
  3. Зарисувати осцилограму напруги на опорі навантаження  $R$ .
- В. Накладання синусоїдного і постійного струмів.
  1. Переключити рубильник  $S1$  у положення 2, а  $S2$  у положення 1 та увімкнути коло.
  2. Виконати виміри і записати показання приладів до табл. 1.2. Для вимірювання гармонічної складової напруги ( $U^{(1)}$ ) використовувати вольтметр V3 електромагнітної системи.
  3. Зарисувати осцилограму напруги на опорі навантаження  $R$ .

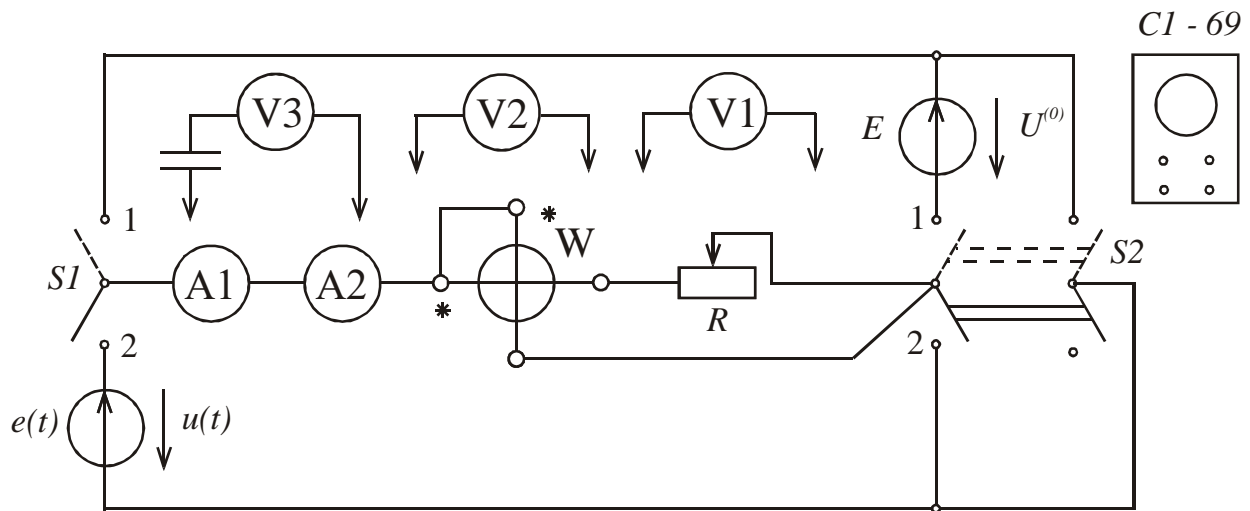


Рисунок 1.1 Схема кола експериментальних досліджень

Таблиця 1.1. Результати вимірювань у колі з постійним та синусоїдним джерелом

Режим роботи	$U^{(0)}$	$I^{(0)}$	$P^{(0)}$	$U^{(1)}$	$I^{(1)}$	$P^{(1)}$
	В	А	Вт	В	А	Вт
Постійний струм				-	-	-
Синусоїдний струм	-	-	-			

Таблиця 1.2. Результати вимірювань та обчислень у колі з несинусоїдним джерелом

Виміряно						Обчислено		
$U^{(0)}$	$U^{(1)}$	$U$	$I^{(0)}$	$I$	$P$	$I$	$U$	$P$
В	В	В	А	А	Вт	Вт	В	Вт

2. За даними табл. 1.1 записати закон зміни струму та напруги

$$i(t) = I^{(0)} + I_m^{(1)} \sin \omega t; u(t) = U^{(0)} + U_m^{(1)} \sin \omega t.$$

3. Користуючись показаннями приладів, визначити діючі значення струму та напруги, а також активну потужність кола за формулами:

$$I = \sqrt{I^{(0)2} + I^{(1)2}} \quad (\text{показання амперметра A2});$$

$$U = \sqrt{U^{(0)2} + U^{(1)2}} \quad (\text{показання вольтметра V2});$$

$$P = P^{(0)} + P^{(1)} \quad (\text{показання ватметра W}).$$

Отримані дані занести до табл. 4.2.

### Контрольні завдання та запитання

1. Назвіть причини виникнення несинусоїдних струмів у колах з синусоїдними джерелами напруги та струму.
2. Запишіть формули визначення коефіцієнтів тригонометричного ряду

Фур'є.

3. Дайте визначення діючого значення несинусоїдного струму.
4. Сформулюйте принцип накладання стосовно кіл несинусоїдного струму.
5. У чому полягає особливість побудови синусоїдних складових несинусоїдного струму на загальному графіку?
6. Як залежить реактивний опір індуктивного елемента від порядку гармоніки?

### Література

1. [1], 9.1 – 9.5.
2. [4], 5.1 – 5.5.
3. [5], 5.1 – 5.5.
4. [8], 3.2.1 – 3.2.4.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

#### I. Мета роботи

Експериментальне отримання вольт-амперних характеристик нелінійних та лінійних пасивних елементів кола; визначення струмів та напруг на ділянках кола графічним методом.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Амперметр магнітоелектричний А1 – 0...3 А.
2. Амперметри магнітоелектричні А2 – 0...2 А.
3. Амперметр магнітоелектричний А3 – 0...1 А.
4. Вольтметр магнітоелектричний V – 0...150 В.
5. Нелінійний резистор НР1 – два ряди ламп розжарювання, з'єднані паралельно.
6. Нелінійний резистор НР1 – один ряд ламп.
7. Лінійний резистор R3 – реостат, 100 Ом.

#### III. Короткі відомості з теорії

Нелінійним називають таке електричне коло, яке містить хоча б один нелінійний елемент.

Нелінійний елемент – такий, елемент, частіше за все пасивний, у якого залежність між його основними величинами є нелінійною. Оскільки індуктивний опір індуктивного елемента постійному струму дорівнює нулю ( $X_{L-} = \omega \cdot L = 0 \cdot L = 0$ ), а ємнісного елемента дорівнює нескінченності ( $X_{c-} = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty$ ), тоді в усталеному режимі роботи нелінійного кола постійного струму наявність індуктивного та ємнісного елементів не має фізичного змісту. Тому згадані кола в зазначеному режимі розглядають тільки з нелінійними резистивними елементами. Основною характеристикою нелінійного резистора є його вольт-амперна характеристика (ВАХ) – залежність струму в резисторі від напруги, прикладеної до нього.

Будь-яка однозначна ВАХ – це геометричне місце точок, котре однозначно пов'язує дві величини – струм та напругу. Якщо задано одну з цих величин, іншу визначають графічно за залежністю цієї ВАХ.

На відміну від лінійних кіл, для нелінійних кіл не існує єдиного класичного універсального методу розрахунку; для кожної конкретної задачі необхідно обирати свій, найбільш ефективний метод розрахунку. Усі існуючі на сьогодні методи розрахунку нелінійних кіл підрозділяють на три великі групи: аналітичні, графічні, або графо-аналітичні, та чисельні. У даній роботі розрахунок заданого нелінійного кола здійснюють графічним методом, який

базується на законах Кірхгофа, що є справедливими і для нелінійних електричних кіл.

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Скласти коло рис. 2.1. Підключаючи по черзі до цього кола резистори HP1, HP2 та R3, зняти їх ВАХ за показаннями амперметра А та вольтметра V. Записати в табл. 2.1 результати вимірювань.

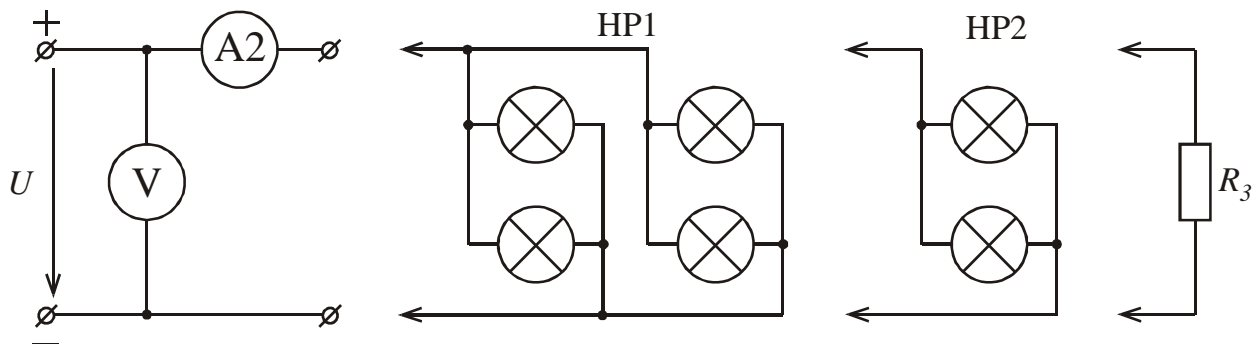


Рисунок 2.1. Схема для експериментального отримання ВАХ резисторів

Таблиця 2.1. Вольт-амперні характеристики резисторів

№ пор.	ВАХ HP1		ВАХ HP2		R3	
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$U_3, \text{В}$	$I_3, \text{А}$
1	0	0	0	0	0	0
2	20		20			1
3	40		40		-	-
4	60		60		-	-
5	80		80		-	-
6	100		100		-	-
7	115		115		-	-

2. Скласти коло рис. 2.2.

3. Встановити необхідне значення вхідної напруги  $U_0$ . Провести вимірювання напруг та струмів у колі. Показання вольтметра та амперметрів записати до рядка «Виміряно» табл. 2.2.

4. За даними табл. 2.1 побудувати ВАХ усіх резисторів у одній системі координат  $I-U$  нижченаведеного вигляду та приблизного масштабу (рис. 2.3); слід мати на увазі, що вибір масштабу впливає на точність подальших обчислень.

5. Для кола (див. рис. 2.2) визначити графічним методом струми  $I_1, I_2, I_3$  у вітках та напруги  $U_{аб}, U_{бв}$  на елементах кола за заданою вхідною напругою  $U_0$ . Результати розрахунків записати до рядка «Обчислено» табл. 2.2.

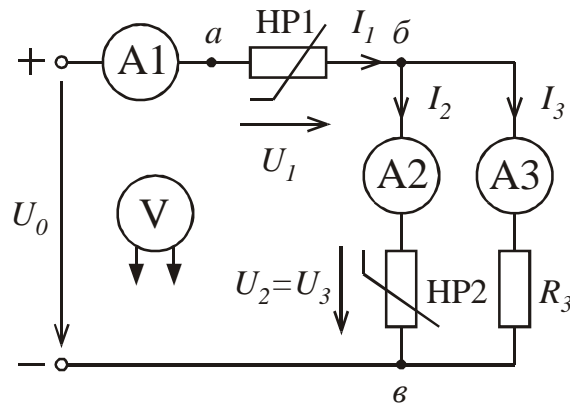


Рисунок 2.2. Схема для експериментальних досліджень у нелінійному колі

Таблиця 2.2. Результати вимірювань та розрахунків

Види роботи	$U_0$	$U_{aб}$	$U_{бв}$	$I_1$	$I_2$	$I_3$
	В	В	В	А	А	А
Виміряне						
Обчислено						
Розходження, %						

Розрахунки виконати методом результуючої вольт-амперної характеристики таким чином (рис. 2.3).

5.1. Побудуємо ВАХ паралельної ділянки «б-в» (див. рис. 2.2), для чого необхідно додати ВАХ резисторів HP2 та R3, тобто  $I_2(U_2)$  та  $I_3(U_3)$  (див. рис. 2.3). Будь-яке значення напруги, прикладеної до паралельного з'єднання елементів HP2 та R3, викликає відповідні значення струмів  $I_2$  та  $I_3$  у кожній вітці. Сума цих струмів згідно з першим законом Кірхгофа має дорівнювати вхідному струму  $I_1$ . Тому для отримання ВАХ ділянки «б-в» задаємося на осі  $U$  декількома довільними значеннями (до 8...10) напруги  $U'$ ,  $U''$ , ..., визначаємо при цих значеннях струми  $I_2'$ ,  $I_2''$ , ...,  $I_3'$ ,  $I_3''$  ... у вітках з HP2 та R3, додаючи їх (наприклад,  $I_2' + I_3'$  при  $U'$  на рис. 2.3), отримуємо точки шуканої ВАХ. На рис. 2.3 її показано штрих-пунктирною кривою та позначено як  $(I_2 + I_3)(U_{бв}) = I_1(U_{бв})$ .

Отримана ВАХ дозволяє замінити паралельну ділянку з HP2 та R3 кола рис. 2.2 єдиним еквівалентним нелінійним резистором HP23. У результаті отримуємо нелінійне коло з послідовним з'єднанням двох нелінійних резисторів (рис. 2.4).

5.2. Побудуємо результуючу ВАХ кола рис. 2.4, а отже, і заданого кола рис. 2.2, додавши ВАХ HP1 та HP23. Для послідовного з'єднання елементів за будь-якого значення струму  $I_1$  утворюються відповідно на елементах HP1 та HP23 спади напруги  $U_{aб}$  та  $U_{бв}$ .

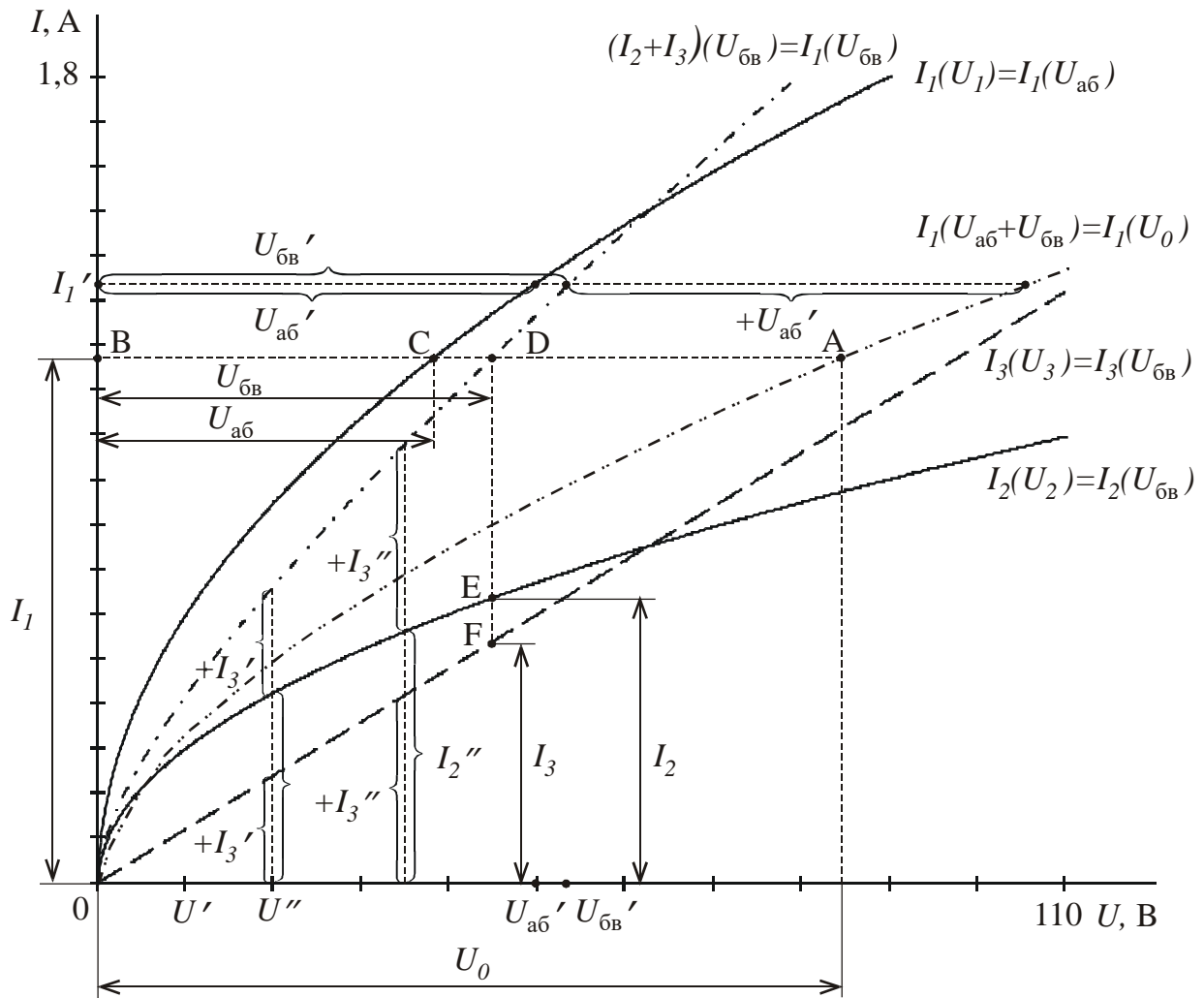


Рисунок 2.3. Графічний розв'язок для кола рис.2.2

Згідно з другим законом Кірхгофа сума цих напруг має дорівнювати вхідній напрузі  $U_0$ . Тому для отримання результуючої ВАХ кола задаємося на осі  $I$  декількома значеннями (до 8...10) струму  $I_1$  (наприклад,  $I_1'$ ), визначаємо для цих значень спади напруги  $U_{a6}$  та  $U_{6B}$  (наприклад,  $U_{a6}'$  та  $U_{6B}'$ ), додаючи їх, отримуємо точки шуканої ВАХ. На рис. 2.3 її показано штриховою кривою та позначено як  $I_1(U_{a6} + U_{6B}) = I_1(U_0)$ . Отримана ВАХ дозволяє замінити усе коло рис. 2.2 одним нелінійним резистором, до якого прикладено напругу  $U_0$ , що створює струм  $I_1$ .

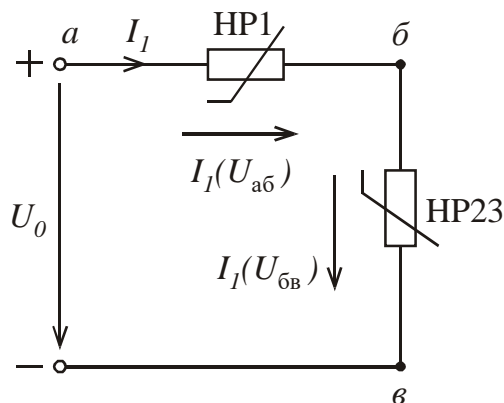


Рис. 2.4. Еквівалентне нерозгалужене коло

5.3. Визначаємо струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  у вітках та напруги  $U_{ab}$ ,  $U_{cb}$  на елементах кола.

Із цією метою на осі  $U$  рис. 2.3 відкладаємо задану вхідну напругу  $U_0$ . Із точки значення цієї напруги підіймаємо перпендикуляр до перетину в точці А з результуючою ВАХ усього кола  $I_1(U_0)$ . Із точки А проводимо горизонтальну лінію до осі струмів  $I$  (точка В), отримуємо шукане значення струму  $I_1$ . Точки С та D, у котрих горизонтальна лінія АВ перетинає ВАХ  $I_1(U_1)$  та  $I_1(U_{cb})$ , дозволяють отримати шукані напруги  $U_1 = U_{ab}$  та  $U_2 = U_3 = U_{cb}$  на резисторах; повинна виконуватися рівність згідно з другим законом Кірхгофа:  $U_{ab} + U_{cb} = U_0$ . У подальшому з точки D, тобто з напругою  $U_2 = U_3$ , проводимо перпендикуляр до перетину у точках Е та F з ВАХ  $I_2(U_2)$  та  $I_3(U_3)$ , в результаті отримуємо шукані струми  $I_2$  та  $I_3$  у вітках відповідно до резисторів HP2 та R3. Для цих струмів повинна виконуватися рівність згідно з першим законом Кірхгофа:  $I_2 + I_3 = I_1$ .

6. Результати розрахунків струмів та напруг записати до рядка «Обчислено» табл. 2.2.

7. Порівняти результати експериментальних даних, наведених у рядку «Виміряне» табл. 2.2, з розрахунковими даними, що наведені в рядку «Обчислено» тієї ж таблиці. Визначити відсоток розходження цих даних за відомою формулою відносної похибки та записати його до рядку «Розходження» табл. 2.2.

### Контрольні запитання

1. Які кола називають нелінійними?.
2. Які елементи називають нелінійними?
3. Чи можливо застосовувати до нелінійних кіл закон Ома та закони Кірхгофа?
4. Що розуміють під вольт-амперною характеристикою нелінійного резистора?

## Література

1. [3], 1.1 – 1.6.
2. [4], 6.1 – 6.2.
3. [5], 9.1 – 9.4.
4. [7], 2.1 – 2.3.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНОГО МАГНІТНОГО КОЛА

#### I. Мета роботи

Експериментальне дослідження та розрахунок характеристик магнітного кола за постійного у часі магнітного потоку.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Амперметр магнітоелектричний А – 0...1 А.
2. Мілівеберметр магнітоелектричний mVB.
3. Магнітне коло (магнітопровід з намагнічувальною та вимірювальною обмотками).
4. Рубильник однополюсний S.

#### III. Короткі відомості з теорії

Магнітне коло – це сукупність феро- та неферомагнітних ділянок, провідників (котушок) зі струмами та (або) постійних магнітів, призначених для створення та протікання магнітних потоків.

Магнітні кола характеризують такими основними величинами: магнітною індукцією  $B$  (Тл); напруженістю магнітного поля  $H$  (А/м); абсолютною магнітною проникненістю  $\mu_a$  (Гн/м); магнітним потоком  $\Phi$  (Вб); намагнічувальною або магніторушійною силою  $F$  (А). Феромагнітні ділянки кола характеризують кривою намагнічування  $B(H)$  або  $\Phi(I)$ .

Магнітні кола є нелінійними колами, тому для них у загальному випадку не є справедливим закон Ома. Але для лінійних ділянок кривої намагнічування може бути отриманий такий аналог закону Ома:

а) для пасивної ділянки

$$\Phi = \frac{U_M}{R_M} = \frac{H \cdot \ell}{R_M}, \quad (3.1)$$

де  $U_M = H \cdot \ell$  – магнітна напруга (спад магнітної напруги) на ділянці довжиною  $\ell$ ;

$R_M = \frac{\ell}{\mu_a \cdot S}$  – магнітний опір пасивної ділянки довжиною  $\ell$ , перерізом  $S$  з

матеріалу з проникненістю  $\mu_a$  ;

б) для нерозгалуженого кола

$$\Phi = \frac{\sum_{k=1}^n F_k}{\sum_{\ell=1}^m R_{M\ell}}, \quad (3.2)$$

де у чисельнику сума алгебрична, а у знаменнику – арифметична.

Закони Кірхгофа для магнітних кіл є справедливими у повній мірі:

а) перший закон Кірхгофа

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0, \quad (3.3)$$

б) другий закон Кірхгофа

$$\sum_{k=1}^n H_k \cdot \ell_k = \sum_{k=1}^m W_k \cdot I_k. \quad (3.4)$$

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

Ознайомитись з принципом дії мілівеберметра та правилами користування ним (за інструкцією). Записати до табл. 3.1 дані про магнітне коло (кількість витків котушки намагнічування  $W_H$ , середню довжину магнітної силової лінії у сталі  $\ell_{ст}$ , площу перерізу магнітопровода  $S$ , кількість витків вимірювальної котушки  $W_B$ ).

2. Скласти коло (рис. 3.1) для вимірювання магнітного потоку в магнітопроводі при відсутності проміжків у ньому.

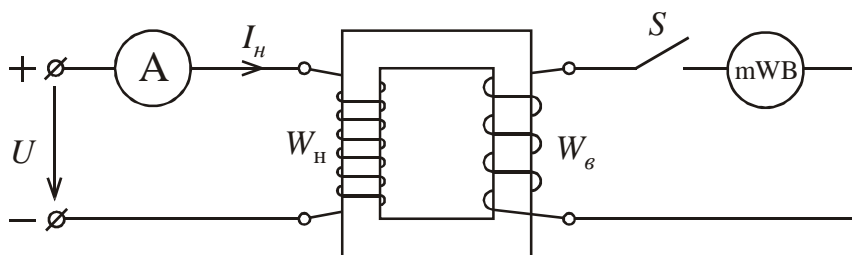


Рисунок 3.1. Схема експериментальних досліджень

3. Плавно підвищуючи струм  $I_1$  намагнічуючої обмотки від 0 до 1 А, зняти показання мілівеберметра у поділках  $N$  шкали для шести значень струму.

**УВАГА!** Перед вмиканням та відмиканням кола від мережі обов'язково розімкнути рубильник  $S$ .

4. Встановити в магнітопроводі проміжок за допомогою двох гетинаксових (текстолітових) прокладок однакової товщини та повторити виміри за тих самих значень намагнічувального струму. Результати вимірювань занести до табл. 3.1.

5. За даними вимірів визначити магнітний потік  $\Phi$ , магнітну індукцію  $B$ , напруженість магнітного поля в повітряному проміжку  $H_0$  та в сталі  $H_{ст}$ , абсолютну магнітну проникність  $\mu_a$  та відносну магнітну проникність  $\mu_r$  сталі, магнітний опір ділянки зі сталі  $R_{мст}$ , повітряного проміжку  $R_{м0}$  та усього кола  $R_M$ . Результати занести до табл. 7.2.

Розрахунок виконати за наведеними формулами.

5.1. Коло без проміжку

$$\Phi = \frac{N \cdot C \cdot 10^{-3}}{W_B}; B = \frac{\Phi}{S}; H_{ст} = \frac{W_H \cdot I_H}{\ell_{ст}};$$

$$\mu_a = \frac{B}{H_{ст}}; R_{мст} = \frac{\ell_{ст}}{\mu_a \cdot S}.$$

Таблиця 3.1. Результати експериментальних досліджень

Характер кола	Но- мер вим.	Струм намаг- нічу- вання $I_H, A$	Пока- зання міліве- бермет- ра $N$ , поділ.	Кіль- кість витків котушок		Постій- на мілі- вебер- метра $C$ , мВб/под.	Середня довжина магніт- ної си- лової лінії $\ell_{ст}$ , м	Площа перері- зу маг- ніто- прово- да $S, м^2$	Довжи- на пові- тряного проміж- ку $\delta$ , мм <sup>2</sup>
				$W_H$	$W_B$				
Без про- міжку	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								
Із промі- жком	1								
	2								
	3								
	4								
	5								
	6								

5.2. Коло з проміжком

$$\Phi = \frac{N \cdot C \cdot 10^{-3}}{W_B}; B = \frac{\Phi}{S}; H_{ст} = \frac{W_H \cdot I_H - H_0 \cdot \delta}{\ell_{ст}};$$

$$\mu_a = \frac{B}{H_{ст}}; R_M = R_{мст} + R_{м0},$$

де  $C = 0,1$  – постійна мілівеберметра (мВб/под.);

$W_B = 10$  – кількість витків вимірювальної котушки;

$W_H$  – кількість витків котушки намагнічування;

$S$  – площа поперечного перерізу осердя (м<sup>2</sup>);

$l_{ст}$  – середня довжина магнітної силової лінії в осерді (м);

$\delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  м – величина проміжку ( $\Delta_1, \Delta_2$  – товщина немагнітних пластин);

$R_{м0} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S}$  – магнітний опір немагнітного середовища – проміжку ( $\text{Гн}^{-1}$ );

$H_0 = B_0 \cdot 0,8 \cdot 10^6$  А/м – напруженість магнітного поля у проміжку;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна проникність немагнітного середовища – проміжку.

Таблиця 3.2. Розраховані магнітні величини

Характер кола	Номер вим.	$\Phi$	$B$	$H_0$	$H_{ст}$	$\mu_a$	$\mu_r$	$R_{мст}$	$R_{м0}$	$R_m$
		Вб	Тл	А/м	А/м	Гн/м	-	1/Гн	1/Гн	1/Гн
Без проміжку	1			-					-	
	2			-					-	
	3			-					-	
	4			-					-	
	5			-					-	
	6			-					-	
Із проміжком	1									
	2									
	3									
	4									
	5									
	6									

Побудувати графіки залежностей  $B(H_{ст})$ ,  $\mu_a(H_{ст})$  та  $R_{мст} + R_{м0} = R_m(H_{ст})$  для магнітної системи без проміжку та з проміжком у магнітопроводі; якісний характер цих залежностей наведено на рис. 3.2.

7. Зробити висновки про вплив на магнітний опір кола та на характер кривої намагнічування наявності повітряного проміжку в магнітопроводі.

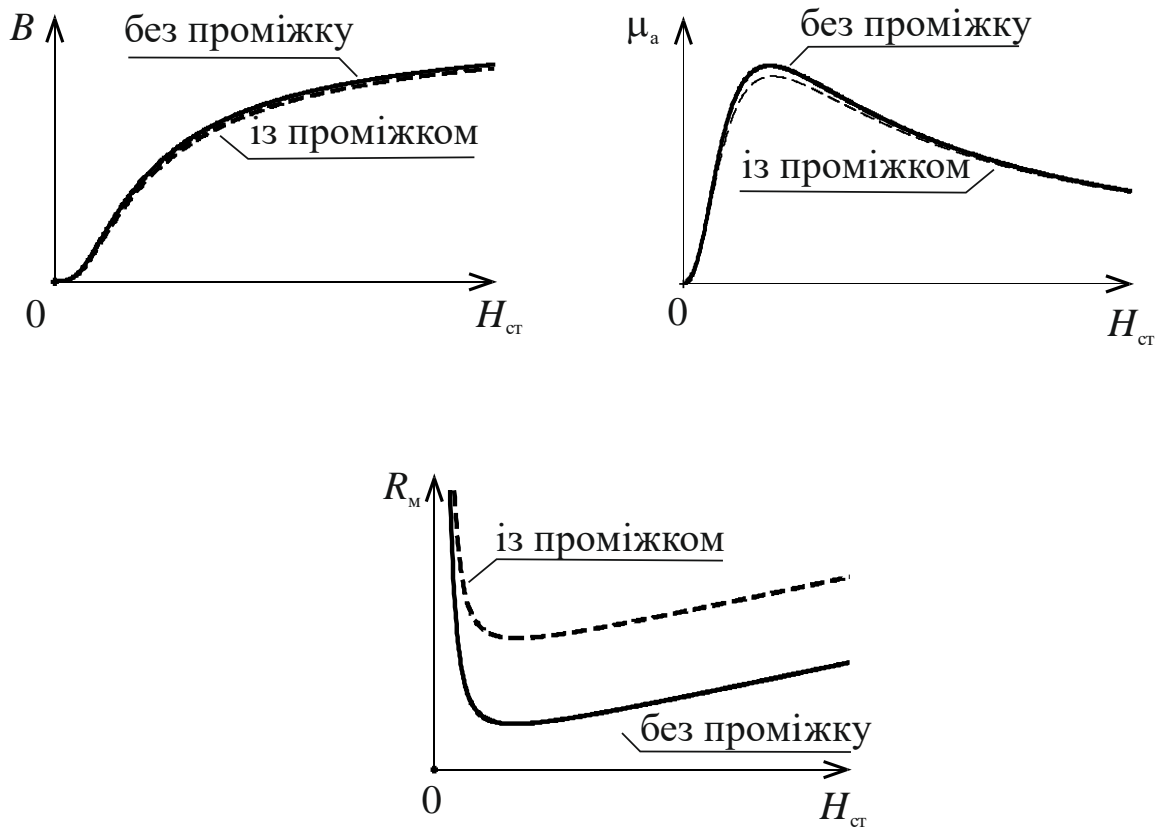


Рисунок 3.2 Нелінійні залежності магнітних величин

### Контрольні завдання та запитання

1. Дайте визначення магнітного кола.
2. Сформулюйте закони Ома та Кірхгофа для магнітного кола.
3. Назвіть одиниці виміру магнітного потоку, магнітної індукції, напруженості магнітного поля, магнітної проникності, магнітного опору.
4. У чому полягає вплив проміжку на характер кривої намагнічування, на величину магнітного опору кола?
5. Наведіть аналогії між параметрами, а також величинами магнітних та електричних кіл.

### Література

1. [3], 3.1 – 3.4.
2. [5], 10.1 – 10.4.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ (НЕЛІНІЙНОГО ДРОСЕЛЯ)

#### I. Мета роботи

Експериментальне визначення параметрів та побудова еквівалентних схем заміщення котушки з феромагнітним осердям; побудова її векторної діаграми.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

Джерело живлення – розподільчий щит, синусоїдну напругу на затискачах якого можна плавно змінювати від 0 до 250 В, а постійну – від 0 до 120 В;

1. Котушка з цільним осердям, осердям із литої сталі та набірним осердям з листової електротехнічної сталі.
2. Амперметр електромагнітний А – 0,4...2 А.
3. Фазометр електродинамічний  $\varphi$  – 5 А, 220 В.
4. Вольтметр електромагнітний V – 50...250 В.
5. Вольтметр електромагнітний V – 10...50 В.

#### III. Короткі відомості з теорії

Із метою спрощення розрахунку електричних кіл змінного струму з нелінійними індуктивними елементами (котушкою з феромагнітним осердям) останні доцільно (за умови невисокої частоти струму) замінювати однією з умовно нелінійних еквівалентних схем (рис. 4.1), котрі побудовано на основі електромагнітних процесів, що протікають у нелінійному дроселі. Застосовують послідовну (а) та паралельну, точніше послідовно-паралельну (б), схеми заміщення. При цьому вважають, що несинусоїдний струм, який протікає по котушці, заміщений еквівалентним синусоїдним струмом згідно з методом еквівалентної синусоїди.

У схемах рис.1 опір резистора  $R_k$  є активним опором проводів котушки. Магнітним потоком розсіювання, а відповідно і індуктивним опором  $X_s$ , нехтуємо, виходячи з їх незначних значень. Активний опір  $R_c$  та провідність  $G_c$  враховують наявність активних втрат у сталі осердя котушки. Реактивні опір  $X_\mu$  та провідність  $B_\mu$  враховують намагнічування осердя; воно обумовлено магнітним потоком, що протікає в осерді. Зазначені елементи визначають таким чином:

$$R_c = \frac{P_c}{I^2}, \quad (4.1)$$

$$X_\mu = \sqrt{Z^2 - (R_k + R_c)^2}, \quad (4.2)$$

тут  $P_c$  – потужність втрат в осерді,

$$P_c = P - R_c \cdot I^2,$$

де  $P$  – потужність, що споживає котушка,

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi;$$

$Z$  – повний опір котушки,  $Z = \frac{U}{I}$ ;

$$G_c = \frac{R_c}{R_c^2 + X_\mu^2}, \quad (4.3)$$

$$B_\mu = \frac{X_\mu}{R_c^2 + X_\mu^2}. \quad (4.4)$$

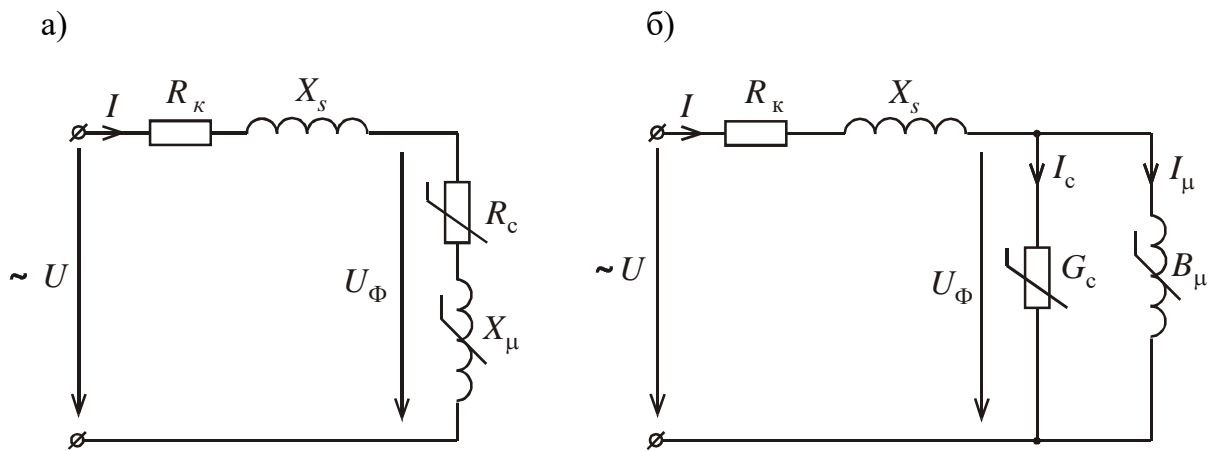


Рисунок 4.1. Еквівалентні схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям

Побудову векторної діаграми (рис. 4.2) слід розпочинати з побудови вектора струму котушки  $\underline{I}$ , його напрямок обирають довільно. Вектор прикладеної напруги  $\underline{U}$  випереджає  $\underline{I}$  на кут, що дорівнює  $\varphi = \arccos \frac{P}{U \cdot I}$ . Віднявши вектор  $R_k \cdot \underline{I}$  від  $\underline{U}$ , отримуємо вектор  $\underline{U}_\Phi$  – складову прикладеної напруги, що врівноважує ЕРС самоіндукції котушки, індуковану основним (робочим) магнітним потоком  $\Phi$ .

$$\underline{U}_\Phi = \underline{U} - R_k \cdot \underline{I}. \quad (4.5)$$

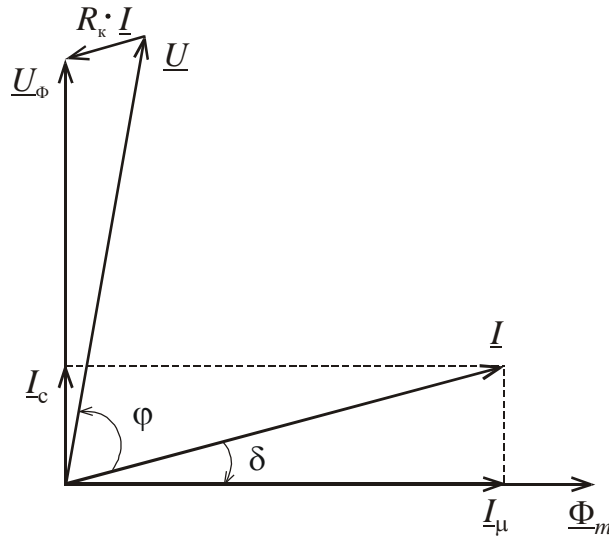


Рисунок 4.2. Векторна діаграма котушки з феромагнітним осердям

На кут, що дорівнює  $90^\circ$ , від вектора  $\underline{U}_\Phi$  відстає вектор магнітного потоку  $\underline{\Phi}_m$ . Спроектувавши вектор  $\underline{I}$  на напрямки векторів  $\underline{U}_\Phi$  та  $\underline{\Phi}_m$ , отримаємо такі складові струму:  $I_c$  – складову, обумовлену втратами в осерді;  $I_\mu$  – складову, що враховує намагнічування осердя. Зазначені складові також обчислюють за формулами:

$$I_c = G_c \cdot U_\Phi, \quad (4.6)$$

$$I_\mu = B_\mu \cdot U_\Phi, \quad (4.7)$$

де 
$$U_\Phi = |\underline{U}_\Phi| = |U \angle \varphi - R_k \cdot I \angle 0^\circ|. \quad (4.8)$$

Кут  $\delta$  аналітично визначають як: 
$$\delta = \arccos \frac{I_\mu}{I}. \quad (4.9)$$

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Методом вольтметра – амперметра виміряти на постійному струмі активний опір котушки  $R_k$ . Оскільки значення  $R_k$  є невеликим, то змінюючи напругу на затискачах котушки, слід підвищувати плавно від нуля до величини, за якої струм в котушці дорівнюватиме номінальному.

2. Скласти коло (рис. 4.3) для вимірів під час вмикання на синусоїдну напругу. Виконати виміри величин напруг та куту зсуву фаз між напругою та струмом виставивши однакове значення сили струму, наприклад 1 А, для режимів, коли котушка містить:

- а) осердя з литої сталі ( $U \leq 220 \text{ В}$ ,  $I \leq 1 \text{ А}$ );
- б) осердя, що набрано з листової електротехнічної сталі ( $U \leq 220 \text{ В}$ ,  $I \leq 1 \text{ А}$ );
- в) без осердя ( $U \leq 220 \text{ В}$ ,  $I \leq 1 \text{ А}$ ).

В останньому режимі, якщо значення вхідної напруги  $U \leq 50 \text{ В}$ , слід ско-

ристанись вольтметром V1.

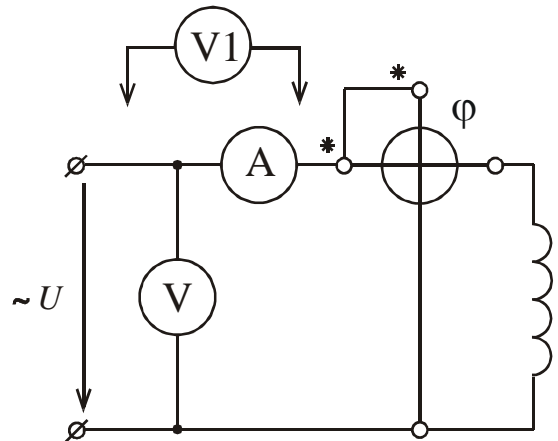


Рисунок 4.3. Схема експериментальних досліджень

Дані вимірів занести у стовпець «Виміряно» табл. 4.1.

3. Побудувати (у масштабі) векторну діаграму.

4. За даними вимірів визначити параметри схем заміщення (рис. 4.1) та занести їх у стовпці «обчислено» табл. 4.1.

5. Визначити  $U_{\Phi}$ ,  $I_c$ ,  $I_{\mu}$ ,  $\delta$  за формулами (4.6) – (4.9), занести їх до табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Результати експериментальних досліджень та розрахунків

Осердя	Виміряно			Обчислено										
	$U$ В	$I$ А	$\varphi$ град.	$I_c$ А	$I_{\mu}$ А	$U_{\Phi}$ В	$\delta$ град.	$P$ Вт	$P_c$ Вт	$R_c$ Ом	$Z$ Ом	$X_{\mu}$ Ом	$G_c$ См	$B_{\mu}$ См
Із литої сталі														
Із листової сталі														
Без осердя														

6. Зробити висновки про вплив вигляду осердя на параметри схем заміщення котушки та інші величини табл. 4.1.

### Контрольні завдання та запитання

1. Якою буде форма кривої струму та магнітного потоку котушки зі сталевим осердям після її вмикання до синусоїдної напруги?
2. Чим обумовлені елементи  $R_c$ ,  $X_{\mu}$ ,  $G_c$  та  $B_{\mu}$  схем заміщення?
3. Чим пояснюється наявність кута зсуву фаз  $\delta$  між струмом та магнітним потоком? У якому випадку  $\delta=0$ ?
4. Поясніть причини виникнення напруги  $U_{\Phi}$  та запишіть вираз, що пов'язує його з амплітудою магнітного потоку осердя  $\Phi_m$ .

### Література

1. [3], § 4.5.
2. [4], §6.3.2.

3. [5, § 10.5].

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У НЕРОЗГАЛУЖЕНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ЄМНІСНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

#### I. Мета роботи

Дослідження перехідних процесів у колі при увімкненні його на постійну напругу і при розряді конденсатора на резистор. Визначення сталої часу кола.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Мікроамперметр магнітоелектричний  $A$ ,  $0 \dots 200$  мкА.
2. Вольтметр електронний  $V$ ,  $0 \dots 150$  В.
3. Батарея конденсаторів  $C$ ,  $0 \dots 50$  мкФ.
4. Резистор  $R$ ,  $500 \dots 750$  кОм.
5. Перемикач  $S1$ .
6. Вимикач  $S2$ .
7. Електронний секундомір.

#### III. Короткі відомості з теорії

Перехідний або неусталений процес - електромагнітний процес, що виникає в електричному колі при переході від одного усталеного процесу до іншого в результаті зміни конфігурації чи параметрів схеми кола.

Умовами виникнення перехідного процесу є наявність в колі, по-перше, хоча б одного реактивного елемента (індуктивного чи ємнісного) і, по-друге, якогось перемикання, вмикання, вимикання рубильників, вимикачів і таке інше, тобто наявність комутації в колі. При аналізі перехідних процесів лінійних колах вважаємо, що тривалість власне процесу комутації  $\Delta t_{\text{КОМ}} = 0$ , тобто він протікає миттєво, інакше треба б було враховувати електричну дугу, що виникає у вимикачах і яка є нелінійним елементом. Крім цього, якщо в задачі нема спеціальних вказівок, то теж припускаємо, що комутація відбувається в умовний момент часу  $t = 0$  і що з цього моменту починається відрахування часу протікання перехідного процесу.

Усі електричні величини в перехідному процесі є змінними за часом незалежно від того яке джерело, постійної чи змінної напруги або струму, діє в колі і позначаються малими літерами:  $i(t)$  – перехідний струм,  $u(t)$  – перехідна напруга і таке інше.

Теоретично тривалість будь-якого перехідного процесу дорівнює нескінченності, а практично – вона залежить від параметрів кола і може тривати від часток секунди до кількох хвилин.

В умовах реальної експлуатації електротехнічні пристрої часто безперервно знаходяться в перехідних режимах. При цьому розрізняють нормальні і аварійні перехідні процеси. Наприклад, водій трамваю чи тролейбусу, керуючи швидкістю руху, то вмикає, то вимикає тягові двигуни, що обумовлює роботу останніх в безперервних нормальних перехідних режимах. Різного виду непередбачені короткі замикання викликають аварійні перехідні процеси. І хоча ці процеси, як правило, короткочасні, однак струм і спади напруг в колі в цей період можуть мати значення, які в декілька разів перевищують їх значення в нормальних усталених режимах, в результаті чого може скоїтись пошкодження окремих елементів чи усього пристрою. Тому вміння правильно розраховувати і кваліфіковано аналізувати перехідні електромагнітні процеси мають виключно велике значення при дослідженнях, розробці і впровадженні будь-якого електротехнічного пристрою чи системи.

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1 Скласти коло (рис. 5.1). Поставити перемикач  $S1$  у нейтральне положення, а перемикач  $S2$  увімкнути.

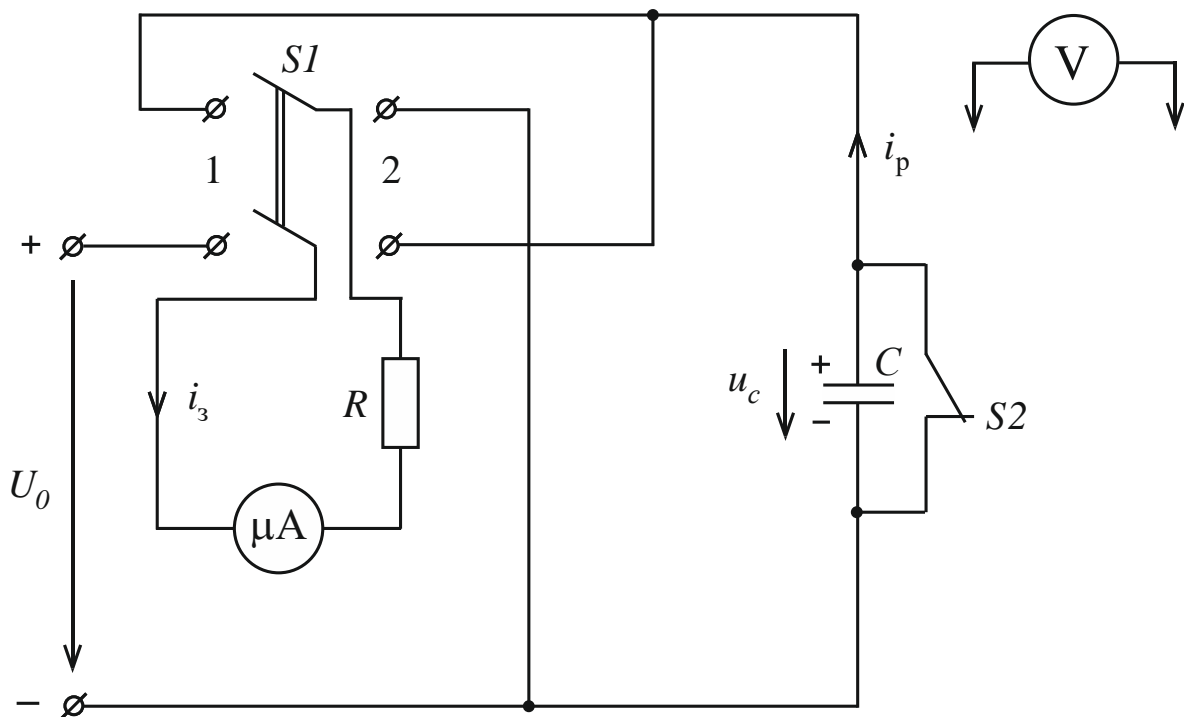


Рисунок 5.1. Схема експериментальних досліджень

2. Увімкнути коло на затискачі джерела постійної напруги  $U_0$ .
3. Дослідити процес заряду конденсатора.
  - 3.1. Поставити перемикач 1  $S$  у положення 1 та зафіксувати значення струму у колі, яке буде в колі у момент комутації, тобто це значення  $i_3(0)$ .
  - 3.2. Розімкнути перемикач  $S2$ . При цьому конденсатор буде заряджатися. Провести 8...10 вимірів значень струму заряду  $i_3$  в колі і напруги  $u_{c3}$  на конденсаторі в процесі його зарядження. Дані вимірів занести до табл. 5.1 (стовпці 2, 3, 4).
4. Дослідити процес розряду конденсатора.
  - 4.1. Вимкнути коло, для чого треба поставити перемикач  $S1$  у положення 2. При цьому заряджений конденсатор буде розряджатися на резистор  $R$ . Провести 8...10 вимірів значень струму розряду  $i_p$  у колі та напруги  $u_{cp}$  на конденсаторі для тих же моментів часу що і в п. 3.2. Результат вимірів занести до табл. 1 (стовпці 2, 7, 8).
5. Класичним або операторним методом для заданих в роботі  $U_0$ ,  $R$  і  $C$  розрахувати аналітичні вирази перехідних струму і напруги на конденсаторі при увімкненні кола на постійну напругу  $U_0$  і при розряді конденсатора на резистор  $R$ . Дані розрахунків занести до табл. 5.1 (стовпці 5, 6, 9 і 10). При цьому використати наступні спрощені схеми комутацій кола.
  - 5.1. Дослід заряду конденсатора відбувається за схемою рис. 5.2, де конденсатор до комутації розряджений, тому згідно другого закону комутації маємо:  $u_{c3}(-0) = u_{c3}(0) = u_{c3}(0+) = 0$ .

Таблиця 5.1. Результати експериментальних досліджень та розрахунків

№ вимі- ру	$t$ с	Виміряно		Обчислено		Виміряно		Обчислено		$\ln i_p$	$\tau$ с	$\tau_{cp}$ с	При- мітка
		$i_3$	$u_{c3}$	$i_3$	$u_{c3}$	$i_p$	$u_{cp}$	$i_p$	$u_{cp}$				
		мкА	В	мкА	В	мкА	В	мкА	В				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													

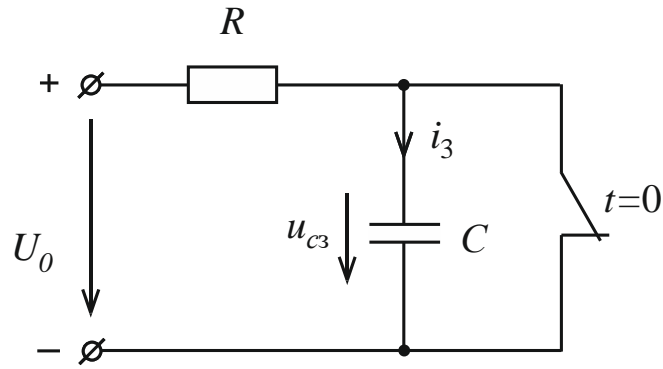


Рисунок 5.2. Розрахункова схема кола заряду конденсатора

Напруга на конденсаторі при заряді буде повільно зростати від нуля до напруги джерела  $U_0$ , а струм конденсатора в момент комутації змінюється стрибком від нуля до значення  $i_3(0) = U_0 / R$  (якщо знехтувати струмом витoku конденсатора), а потім зменшується до нуля. Якісний вигляд кривих струму та напруги заряду конденсатора наведено на рис. 5.3.

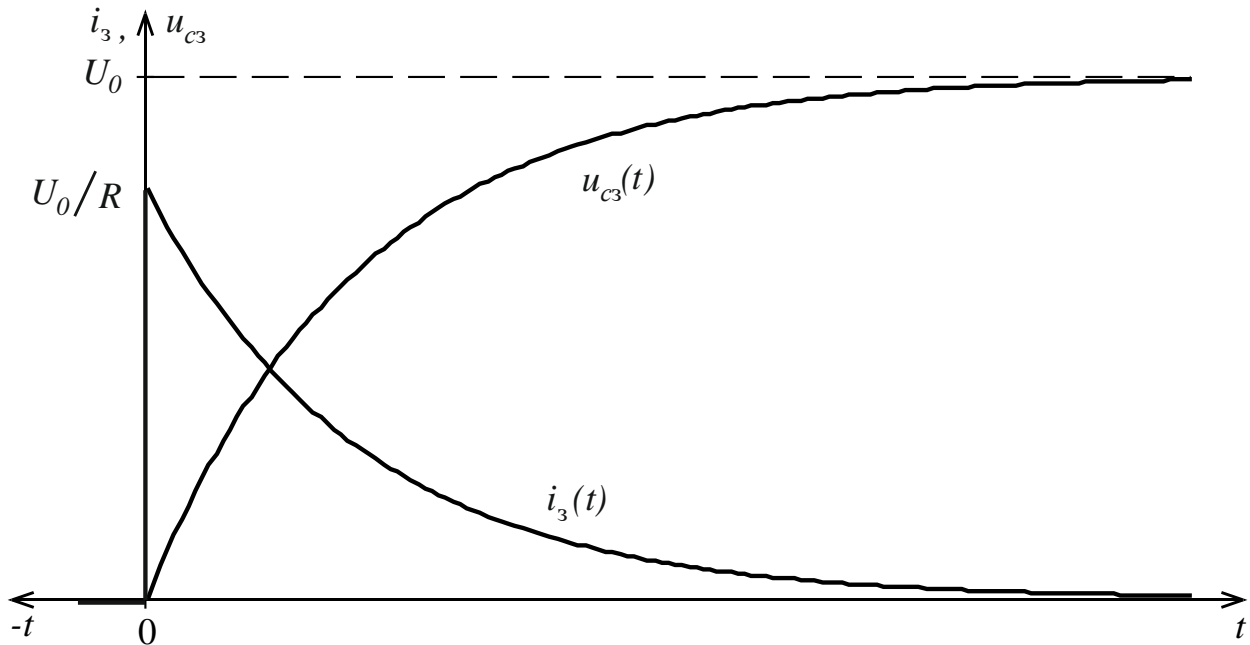


Рисунок 5.3. Часові діаграми напруги та струму під час заряду конденсатора

Аналitичні вирази законів зміни величин  $i_3(t)$  та  $u_{c3}(t)$  можуть бути визначені класичним або операторним методом, та мають вигляд:

$$i_3(t) = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad u_{c3}(t) = U_0 - U_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

5.2. Дослід розряду конденсатора відбувається за схемою рис. 4, де конденсатор до комутації попередньо був заряджений до напруги  $U_0$ , тому згідно другого закону комутації для схеми рис. 4 маємо:  $u_{cp}(-0) = u_{cp}(0) = u_{cp}(0+) = 0$ .

Якісний вигляд кривих струму та напруги розряду конденсатора приведено на рис. 5, які описуються наступними законами:

$$i_p(t) = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}}, \quad u_{cp}(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}.$$

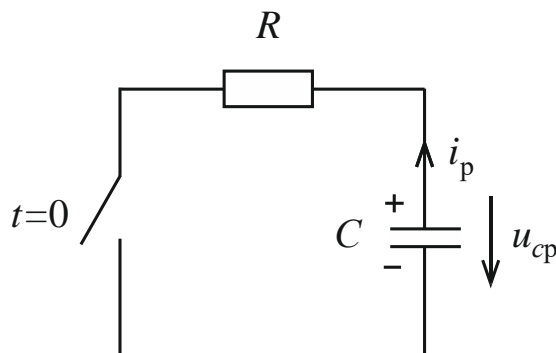


Рисунок 5.4. Розрахункова схема кола розряду конденсатора

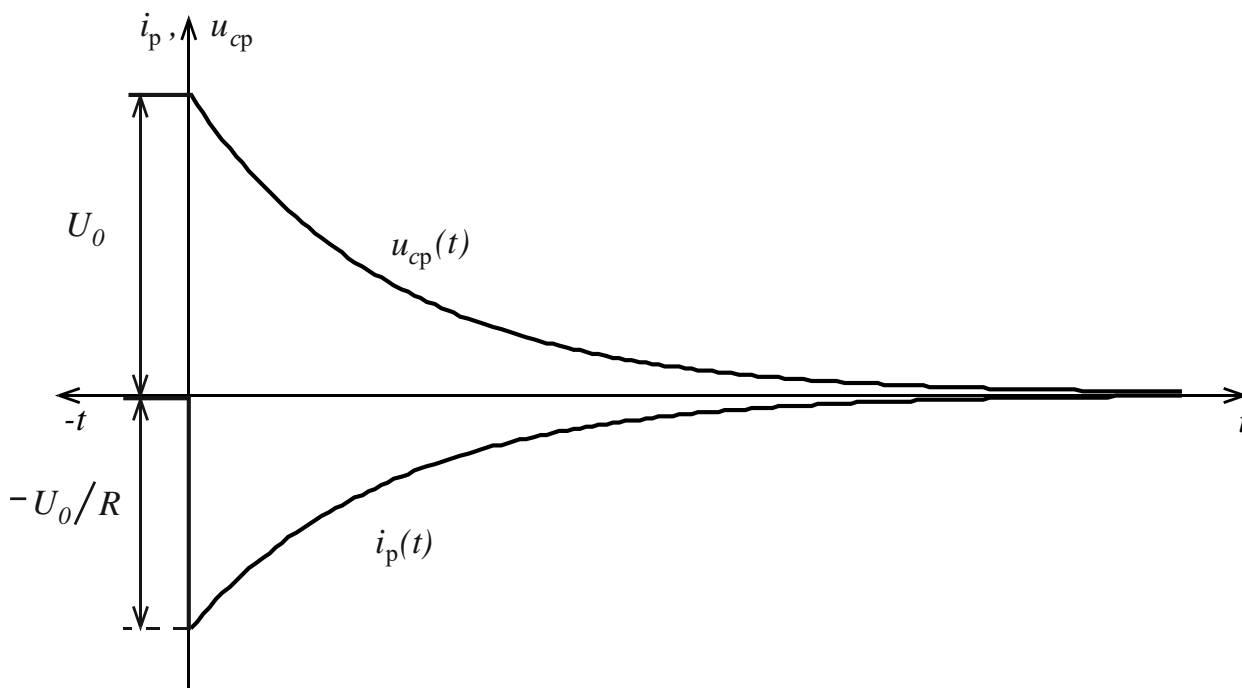


Рисунок 5.5. Часові діаграми напруги та струму під час розряду конденсатора

6. Побудувати графіки  $i_s(t)$ ,  $u_{cs}(t)$ ,  $i_p(t)$ ,  $u_{cp}(t)$  за даними вимірів і розрахунків в одній системі координат.

7. Визначити сталу часу кола:

а) використовуючи дані вимірів (табл. 5.1) при розряді конденсатора

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln i_{p1} - \ln i_{p2}},$$

де  $i_{p1}$  та  $i_{p2}$  – величини розрядних струмів конденсатора у довільні моменти часу  $t_1$  та  $t_2$ ;

- б) за даними параметрів кола  $R$  і  $C$  (за виразом  $\tau = RC$ );  
в) графічно, використовуючи залежності  $i_3(t)$  та  $i_p(t)$ .

8. Повторити виміри струму в колі і напруги на конденсаторі при інших значеннях  $R$  і  $C$ .

9. Порівняти середнє значення сталої часу  $\tau_{cp}$  одержане за даними вимірів, з розрахунковими значеннями.

### Контрольні запитання

1. Які процеси (режими) називають перехідними? Що розуміють під комутацією в електричному колі? У чому полягають закони комутації?
2. У чому полягає суть класичного методу розрахунку перехідних процесів в електричних колах?
3. Яку складову перехідної величини називають вимушеною, а яку – вільною?
4. Що розуміють під сталою часу кола?
5. Якими методами можна визначити сталу часу кола?
6. Які параметри впливають на тривалість перехідного процесу?
7. Побудувати якісно графіки напруги на конденсаторі та резисторі при заряді та розряді конденсатора в досліджуваному колі.

### Література

1. [2], 1.1 – 1.4, 1.8 – 1.9.
2. [4], 10.1 – 10.2.
3. [5], 7.1 – 7.4.
4. [8], 4.1.1 – 4.1.5, 4.1.7.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗГАЛУЖЕНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ З ЄМНІСНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

#### I. Мета роботи

Дослідити перехідні процеси в розгалуженому  $RC$  колі при увімкненні його на постійну напругу.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Мікроамперметр магнітоелектричний А, 0...200 мкА – 3 шт.
2. Вольтметр цифровий Щ 4300 V, 0...200 В – 2 шт.
3. Резистор не дрововий  $R_1$ , 560 кОм.
4. Резистор не дрововий  $R_2$ , 200 кОм.
5. Магазин ємностей  $C$ , 60 мкФ.
6. Вимикач однополюсний  $S_1, S_2, S_3$  – 3 шт.
7. Електронний секундомір.

### III. Короткі відомості з теорії

У загальному випадку перехідні електромагнітні процеси у лінійних колах математично описують за допомогою звичайних лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь, складених за законами Кірхгофа. Відповідно аналіз перехідного процесу в лінійному колі полягає у розв'язанні рівнянь зазначеного типу. Зокрема в електротехніці при розрахунках перехідних процесів застосовують хоча і математичні, але декілька трансформовані, способи розв'язання диференціальних рівнянь. На цих способах і базуються такі основні методи аналізу перехідних процесів: класичний, операторний, спектральний і метод інтеграла Дюамеля. Розрахункова частина даної лабораторної роботи передбачає використання класичного методу аналізу перехідних процесів у електричних колах.

Тому коротко розглянемо сутність класичного методу. Як відомо з курсу математики розв'язок звичайного лінійного неоднорідного диференціального рівняння складеного відносно певної перехідної величини, наприклад струму  $i(t)$  складається з двох частин:

$$i(t) = i_y(t) + i_b(t), \quad (6.1)$$

де  $i_y(t)$  - усталена складова перехідного струму. При дії у колі постійних джерел напруги або струму її визначають за допомогою методів розрахунку кіл постійного струму.

$i_b(t)$  - вільна складова перехідного струму. При наявності у колі одного реактивного елемента (індуктивності або ємності) цю складову шукають у вигляді

$$i_b(t) = Ae^{pt}, \quad (6.2)$$

де  $p$  – корінь характеристичного рівняння, який визначають з використанням схеми заміщення заданого кола після комутації.

$A$  – постійна інтегрування, яку визначають з урахуванням початкових умов. Під якими розуміють значення перехідних величин та їх похідних в момент комутації.

Усі початкові умови розподіляють на: незалежні і залежні; нульові і ненульові. Незалежні початкові умови – це значення струму в індуктивному і напруги на ємнісному елементах в момент комутації  $t=0$ , тобто це  $i_L(0)$  і  $u_C(0)$ ; їх знаходять, користуючись законами комутації. Залежні початкові умови – це значення інших струмів і напруг в колі та їх похідних в момент комутації ( $t=0$ ). Тобто це значення напруг на індуктивностях

$u_C(0)$ , струму в ємностях  $i_C(0)$  і в резисторах  $i_R(0)$ , їх похідних і таке інше в момент  $t = 0$ . Ці умови визначають із рівнянь Кірхгофа, складених для схеми в її післякомутаційному стані. Якщо якась початкова умова дорівнює нулю, то кажуть, що в схемі кола має місце нульова початкова умова для даної перехідної величини. Якщо початкова умова для якоїсь перехідної величини відрізняється від нуля, то кажуть, що має місце ненульова початкова умова для даної перехідної величини.

Таким чином для розрахунку перехідного процесу класичним методом треба виконати наступне.

1. Визначити величини початкових умов для заданого кола.
2. Розрахувати усталене коло в усталеному режимі і визначити усталену складову перехідних струмів та напруг.
3. Скласти характеристичне рівняння та визначити його корені.
4. Розрахувати постійні інтегрування і визначити вільну складову перехідних струмів та напруг.
5. Записати часові залежності для кожної з шуканих перехідних величин у вигляді суми їх усталеної та вільної складової.

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1 Скласти коло (рис. 6.1). Поставити перемикач  $S1$  у нейтральне положення, а перемикач  $S2$  увімкнути.

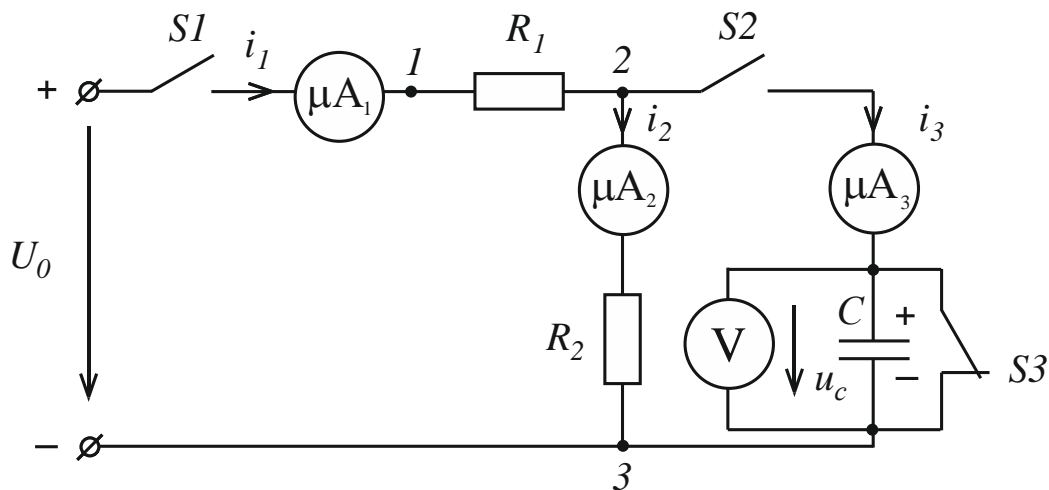


Рисунок 6.1. Схема експериментальних досліджень

2. Увімкнути коло на затискачі джерела постійної напруги (замкнути вимикач  $S1$  при розімкненому вимикачі  $S2$ ). Провести виміри струмів кола при заданій напрузі  $U_0$ . Ці струми відповідають усталеним струмам кола після комутації  $I_{1y}$  і  $I_{2y}$ , а  $I_{3y} = 0$ , оскільки на вході кола  $U_0 = \text{const}$ .

Дані вимірів занести до табл. 6.1

Таблиця 6.1. Значення електричних величин в усталеному режимі кола до комутації

$U_0$	$I_{1y}$	$I_{2y}$
В	мкА	мкА

3. Розімкнути вимикач  $S3$  (при замкнених вимикачах  $S1$  і  $S2$ ), при цьому конденсатор  $C$  буде заряджатись. Провести 8...10 відліків значень струмів  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  у вітках кола і напруги  $u_c$  на конденсаторі в процесі заряду для зазначених моментів часу  $t=0, 5, 10, \dots$  с (величини стовпців 3...6 табл.6.2 для моменту комутації (при  $t=0$ ) записати перед дослідом окремо, за показами приладів при усіх замкнених вимикачах).

Дані вимірів занести до табл. 2 (стовпці 2...6).

Таблиця 6.2. Електричні величини у колі в процесі заряду конденсатора

№ вимі- ру	$t$	Виміряно				Обчислено				Примі- тка
		$i_1$	$i_2$	$i_3$	$u_c$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$u_c$	
	с	мк А	мкА	мкА	В	мкА	мкА	мкА	В	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	14
1										$U_0 =$ $R_1 =$ $R_2 =$ $C =$
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										

4. Розімкнути вимикач  $S1$ . При цьому конденсатор  $C$  буде розряджатись. Провести 8...10 вимірів значень струму  $i_3$  у колі та напруги  $u_c$  на конденсаторі. Дані вимірів занести до табл. 6.3.

5. Розрахувати аналітично перехідні струми та напругу на конденсаторі при його заряді та розряді, використовуючи дані параметрів досліджуваного кола і напруги на затискачах джерела (табл. 6.2 стовпець 11). Дані розрахунків занести до табл. 6.2 та 6.3.

Дослід заряду конденсатора відбувається за схемою рис. 6.2, де конденсатор до комутації розряджений, тому згідно другого закону комутації маємо:  $u_c(-0) = u_c(0) = u_c(0+) = 0$ .

Таблиця 6.3. Електричні величини у колі в процесі розряду конденсатора

№ вимі- ру	$t$ с	Виміряно		Обчислено	
		$i_3$	$u_c$	$i_3$	$u_c$
		мкА	В	мкА	В
1	2	3	4	5	6
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

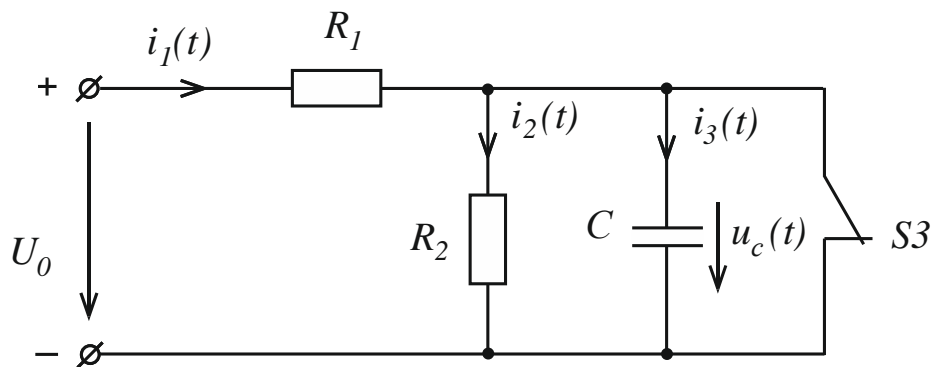


Рисунок 6.2. Розрахункова схема кола заряду конденсатора

Незаряджений конденсатор, що вмикається в коло, в перший момент часу має нескінченно малий опір для струму  $i_3(0)$ , тому в колі рис 6.2 в момент комутації (при  $t=0$ ) конденсатор шунтує резистор  $R_2$ , а струми у вітках становлять  $i_1(0) = i_3(0) = U_0 / R_1$ ,  $i_2(0) = 0$  (тобто струм у перший момент часу обмежений лише опором  $R_1$ ). В кінці перехідного процесу струми у вітках і напруга на конденсаторі при його заряді набувають усталених значень, що дорівнюють  $I_{1y} = I_{2y} = \frac{U_0}{R_1 + R_2}$ ,  $I_{3y} = 0$ ,  $U_{cy} = R_2 \cdot I_{2y}$ . Аналітичні вирази струмів кола і напруги на конденсаторі при його заряді можуть бути отримані класичним або операторним методом розрахунку перехідного процесу у колі рис.6.2, які мають вигляд

$$i_3(t) = \frac{U_0}{R_1} e^{pt},$$

$$i_2(t) = \frac{U_0}{R_1 + R_2} (1 - e^{pt}),$$

$$i_1(t) = i_2(t) + i_3(t) = \frac{U_0}{R_1 + R_2} - \left( \frac{U_0}{R_1 + R_2} - \frac{U_0}{R_1} \right) e^{pt},$$

$$u_c(t) = R_2 \cdot i_2(t) = \frac{R_2 \cdot U_0}{R_1 + R_2} (1 - e^{pt}),$$

де корінь характеристичного рівняння для заданого кола становить

$p = -\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot C}$ . Якісний вигляд наведених перехідних величин представлено на рис. 6.3.

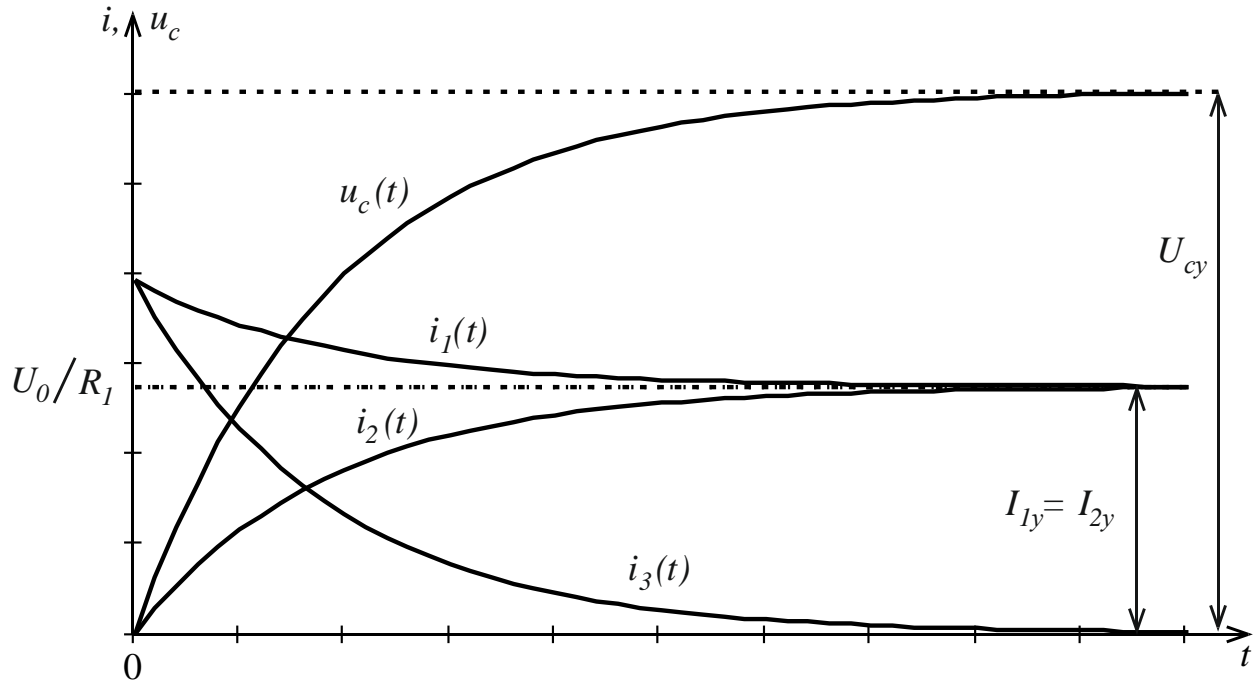


Рисунок 6.3. Часові залежності електричних величин у колі заряду конденсатора

Дослід розряду конденсатора виконується так само як і у лабораторній роботі №5.

6. Побудувати криві перехідних струмів  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$  і напруги на конденсаторі  $u_c(t)$  за даними вимірів і розрахунків в одній системі координат.

### Контрольні запитання

1. Який режим електричного кола називають усталеним?
2. Як можна розглядати ємність (індуктивність) в початковий момент часу після комутації у випадку нульових та ненульових початкових умов?
3. Які початкові умови називають незалежними?
4. Які початкові умови називають залежними?
5. Через який час після комутації перехідний процес можна вважати прак-

тично закінченим?

6. Чому напруга на конденсаторі не може змінюватися стрибками?

7. Чому при вмиканні вимикача  $S_2$  у колі (див. рис.6.1) струм  $i_2$  зменшується до нуля, а струм  $i_3$  збільшується стрибком до максимального значення?

### Література

1. [2], 1.13.
2. [4], 10.2.6.2.
3. [9], 7.1

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

#### I. Мета роботи

Дослідити вплив параметрів коливального контуру на характер перехідного процесу.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Генератор імпульсів Г5-15.
2. Електронний осцилограф ЕО.
3. Змінна індуктивність  $L$  до 10 мГн.
4. Магазин опорів Р33  $R$ .
5. Магазин ємностей  $C$  до 1 мкФ.

#### III. Короткі відомості з теорії

Під послідовним коливальним контуром розуміють коло, представлене на рис.7.1.

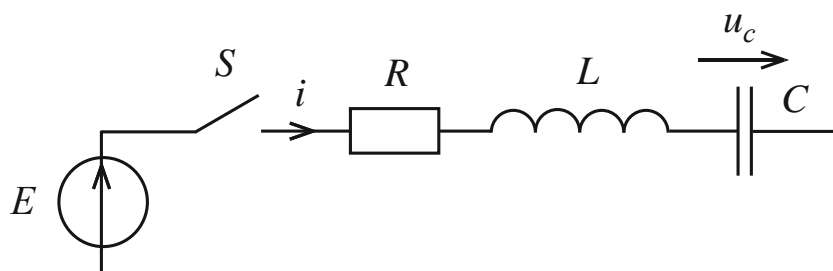


Рисунок 7.1. Розрахункова схема для аналізу перехідних процесів у послідовному коливальному контурі

Перехідний процес у колі рис. 7.1 може бути описаний наступним рівнян-

ням електромагнітного стану другого порядку

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C}{dt} + \frac{1}{LC} u_C = E, \quad (7.1)$$

Згідно з класичним методом розрахунку перехідних процесів розв'язок рівняння (7.1) можна представити у вигляді суми усталеної та вільної складової:

$$u_C(t) = u_{Cy}(t) + u_{Cв}(t). \quad (7.2)$$

Для визначення вигляду вільної складової перехідної напруги на конденсаторі потрібно спочатку скласти характеристичне рівняння у вигляді

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0. \quad (7.3)$$

Відповідно розв'язок характеристичного рівняння матиме два корені у вигляді

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \quad (7.4)$$

Характер зазначених коренів в залежності від співвідношення параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  у колі рис. 7.1 може бути різним. Тому у подальшому розглянемо наступні можливі випадки.

1. Аперіодичний розряд конденсатора.

Якщо значення параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  такі, що  $\frac{R^2}{4L} > \frac{1}{LC}$ , тобто

$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} = R_{кр}$  (назвемо  $R_{кр}$  критичним опором контуру), то, згідно

з виразом (7.4), корені  $p_1$ ,  $p_2$  будуть дійсними, обов'язково від'ємними щоб вільний процес загасав, і різними, а шукана вільна складова напруги на конденсаторі  $u_{Cв}(t)$  записується у вигляді

$$u_{Cв}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}, \quad (7.5)$$

де  $A_1$ ,  $A_2$  - постійні інтегрування.

Зауважимо, що під критичним опором  $R_{кр}$  розуміють таке його найменше значення, при якому перехідний процес у коливальному контурі має ще аперіодичний характер.

2. Граничний режим аперіодичного розряду.

При певних значеннях параметрів  $R$ ,  $L$ ,  $C$  величина  $R = R_{кр}$  тобто  $\frac{R^2}{4L} = \frac{1}{LC}$  і, згідно з (7.3), отримуємо корені характеристичного рівняння дійсними однаковими від'ємними:  $p_1 = p_2 = p = -\frac{R}{2L}$ . Як відомо, при таких коренях вільна складова розв'язку однорідного диференційного рівняння (7.1) має вигляд

$$u_{св}(t) = (A_1 + A_2 t) e^{pt}. \quad (7.6)$$

3. Періодичний коливальний процес у вигляді згасаючих коливань.

У випадку, коли  $R < R_{кр}$ , тоді, згідно (7.4) корені характеристичного рівняння будуть комплексними і спряженими:  $p_1 = -\delta + j\omega_в$ ,  $p_2 = -\delta - j\omega_в$ , де кутова частота вільних коливань

$$\omega_в = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2} \quad (7.7)$$

а коефіцієнт згасання

$$\delta = \frac{R}{2L}. \quad (7.8)$$

Вільна складова шуканої перехідної напруги при цьому дорівнює

$$u_{св}(t) = A e^{-\delta t} \sin(\omega_в t + \psi_u), \quad (7.9)$$

де  $A$  і  $\psi_u$  – постійні інтегрування.

Зауважимо, що у випадках коли  $\frac{1}{LC} \gg \delta^2$ , зокрема, наприклад при малих значеннях активного опору  $R$ , кутову частоту вільних коливань можна визначати за наближеним виразом

$$\omega_в \approx \omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (7.10)$$

Вигляд вільної складової перехідної напруги за виразом (7.9) показано на

рис. 7.2.

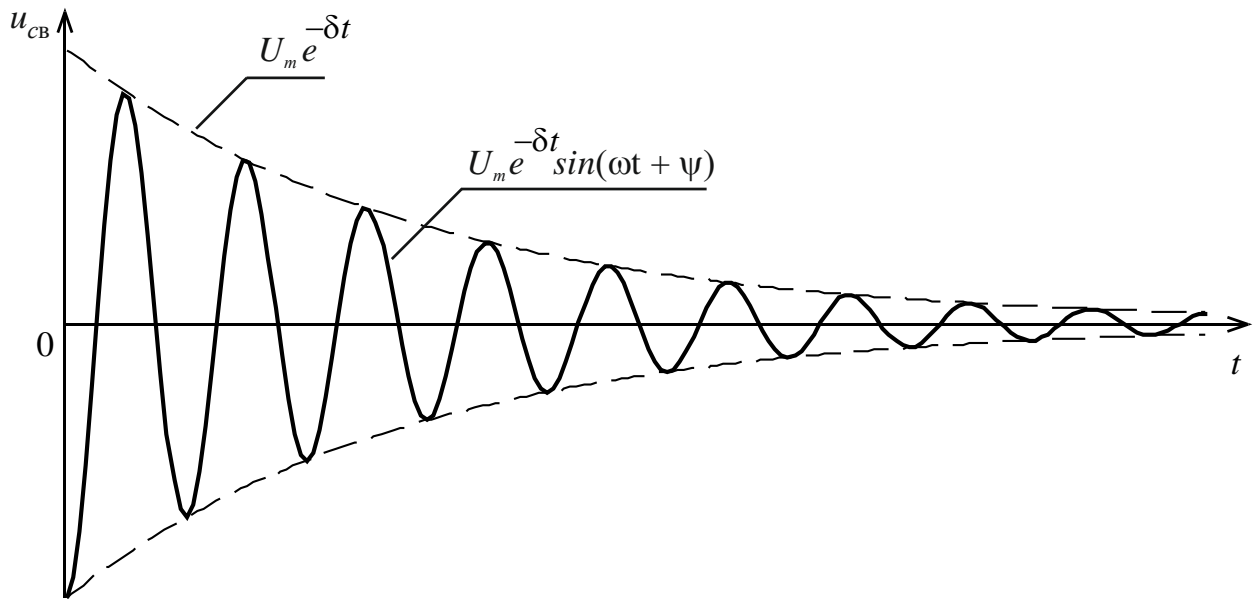


Рисунок 7.2. Загальний вигляд вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у режимі періодичних згасаючих коливань

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1 Скласти коло (рис. 7.3). Поставити перемикач  $S1$  у нейтральне положення, а перемикач  $S2$  увімкнути.

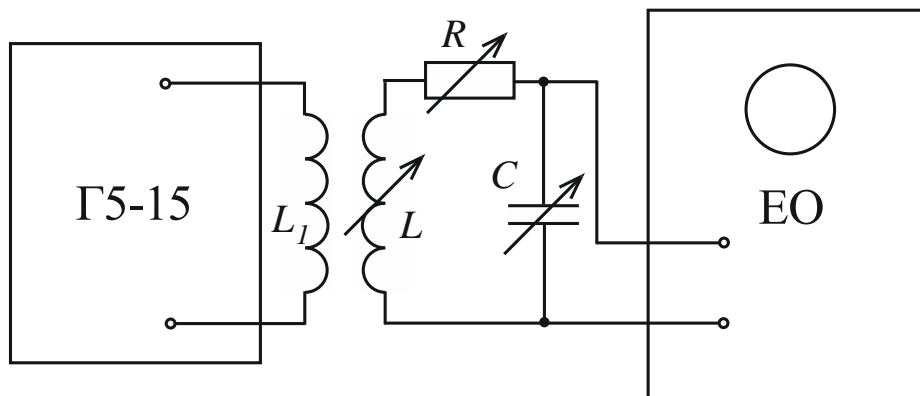


Рисунок 7.3. Схема для проведення експериментальних досліджень

2. Для проведення дослідів №1 налаштувати коливальний контур з наступними базовими (середніми) параметрами  $L = L_{cp} = 5$  мГн;  $C = C_{cp} = 0,5$  мкФ. Опір реостата встановити рівним нулю, при цьому активний опір коливального контуру дорівнюватиме активному опору проводів котушок магазину змінної індуктивності  $R = r_k \approx 3$  Ом. Отримати на екрані стійке зображення вільної складової періодичних згасаючих коливань напруги на конденсаторі

(рис.7.4).

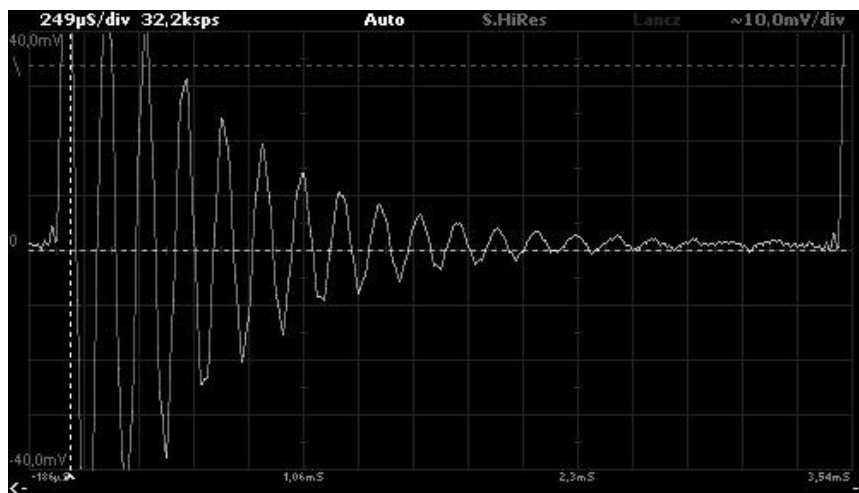


Рисунок 7.4 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №1

3. Виконати наступні досліді при таких параметрах коливального контуру:

дослід №2:  $R = r_k$ ,  $L = L_{cp}$ ,  $C = 2C_{cp}$ ;

дослід №3:  $R = r_k$ ,  $L = L_{cp}$ ,  $C = 0,5C_{cp}$ ;

дослід №4:  $R = r_k$ ,  $L = 2L_{cp}$ ,  $C = C_{cp}$ ;

дослід №5:  $R = r_k$ ,  $L = 0,5L_{cp}$ ,  $C = C_{cp}$ ;

дослід №6:  $r_k < R < R_{кр}$ ,  $L = L_{cp}$ ,  $C = C_{cp}$ ;

дослід №7:  $R > R_{кр}$ ,  $L = L_{cp}$ ,  $C = C_{cp}$ .

4. Навести у звіті осцилограми усіх дослідів (рис.7.4 – 7.10). У кожному досліді за допомогою аналітичних виразів (7.8), (7.10) а також на підставі отриманих осцилограм охарактеризувати вплив зміни параметрів коливального кола на кутову частоту згасаючих коливань  $\omega$  а також коефіцієнт згасання  $\delta$ . Зробити висновки, чи підтверджують результати експериментів передбачені за аналітичними виразами зміни величин  $\delta$  та  $\omega$ .

5. Розрахувати перехідний процес по даних п.2 прийнявши електрорушійну силу джерела живлення постійною і такою, що дорівнює  $E = 1$  В згідно зі схемою рис. 7.1.

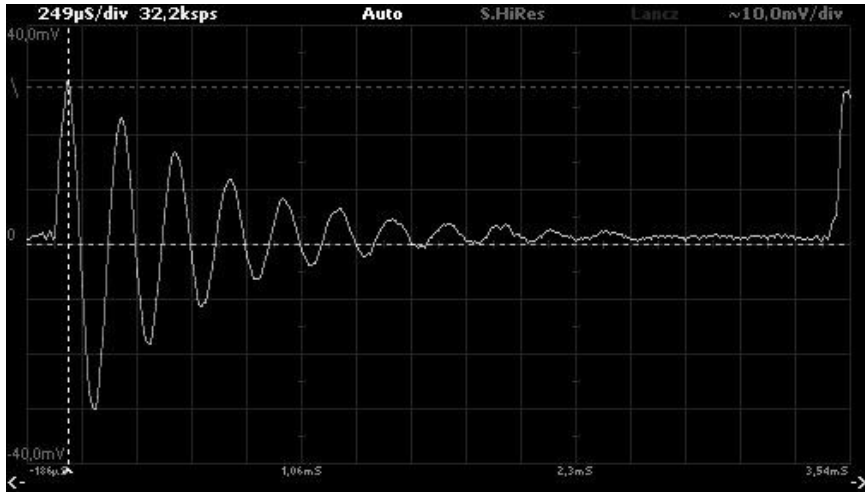


Рисунок 7.5 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №2

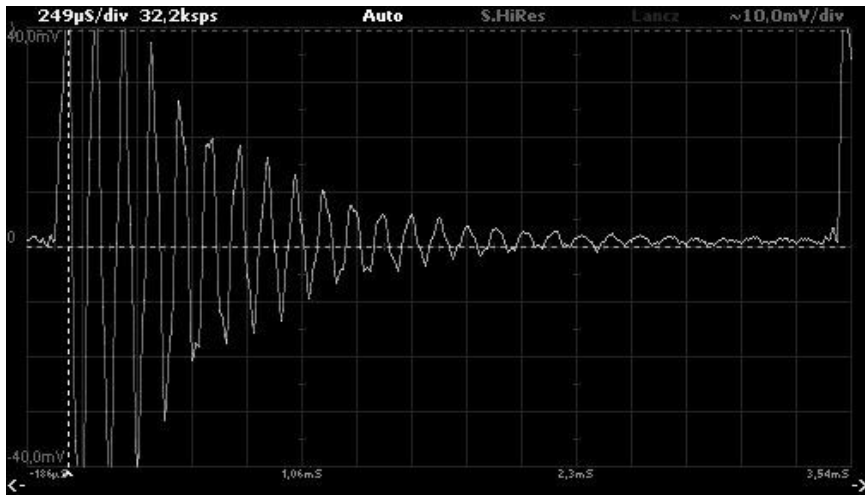


Рисунок 7.6 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №3

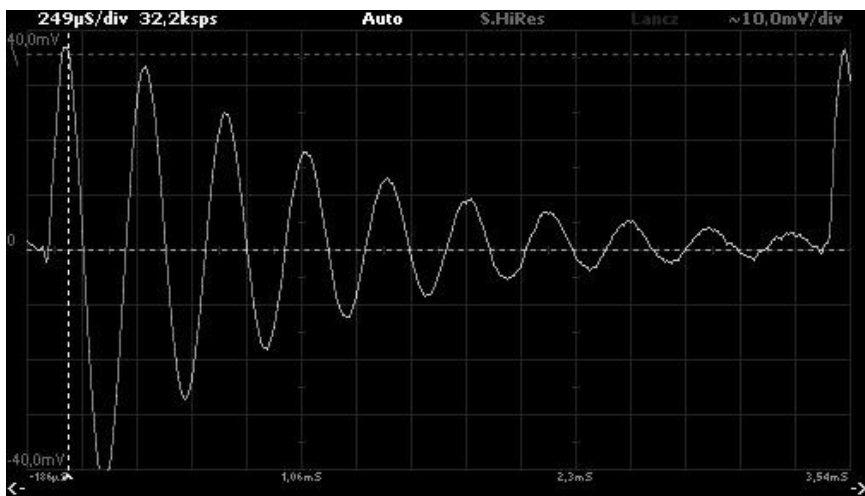


Рисунок 7.7 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №4

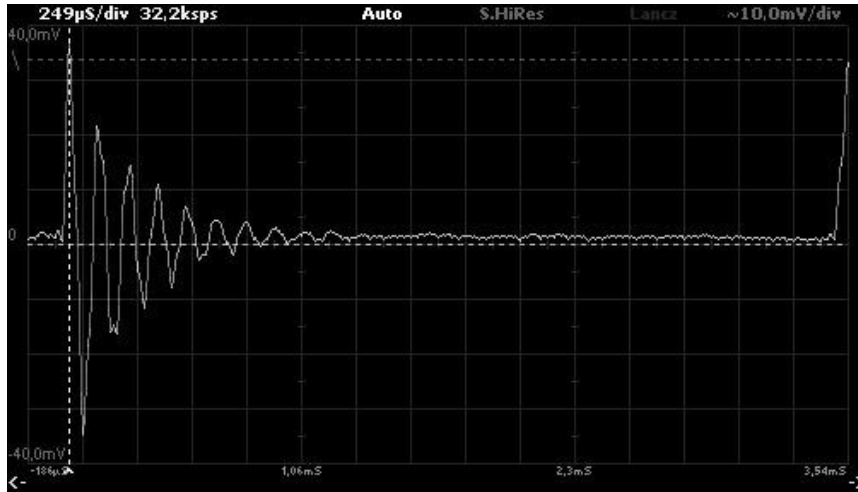


Рисунок 7.8 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №5

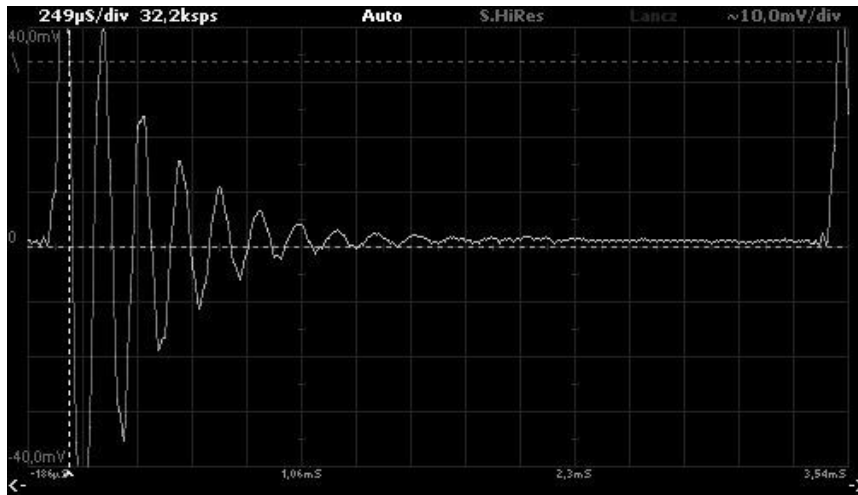


Рисунок 7.9 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №6

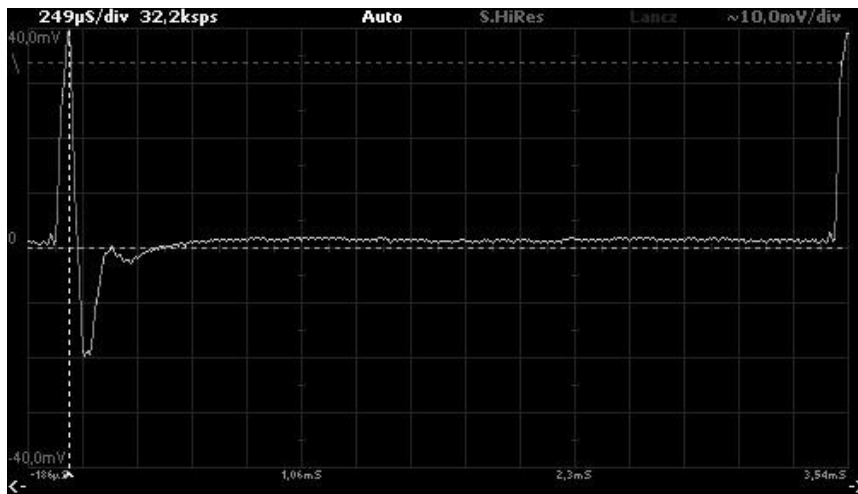


Рисунок 7.10 Осцилограма вільної складової перехідної величини напруги на конденсаторі у досліді №7

## Контрольні запитання

1. Який вигляд має характеристичне рівняння коливального контуру?
2. Як залежить характер перехідного процесу від параметрів контуру? Який вигляд при цьому мають корені характеристичного рівняння?
3. Що називають коефіцієнтом згасання, частотою вільних згасаючих та незгасаючих коливань перехідного процесу? Як зазначені величини розраховують через параметри коливального контуру?
4. Як аналітично та дослідним шляхом визначити критичний опір коливального контуру?
5. При яких співвідношеннях між параметрами у колі мав би відбуватися незгасаючий коливальний перехідний процес?

## Література

1. [2], 1.11, 1.12.
2. [4], 10.2.6.3.
3. [8], 4.1.8.4

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ У ПЛОСКОМУ ПРОВІДНОМУ ЛИСТІ

#### I. Мета роботи

Створення картини електричного поля у плоскому провідному листі на основі одержаних дослідним шляхом ліній рівного потенціалу та побудованих ліній електричного струму. Визначення питомого опору матеріалу листа.

#### II. Необхідні прилади та обладнання

1. Джерело постійного струму,  $0 \dots 20$  А.
2. Амперметр магнітоелектричний А,  $0 \dots 20$  А.
3. Мілівольтметр магнітоелектричний mV,  $0 \dots 150$  мВ.
4. Реостат дрововий R,  $0 \dots 5$  Ом.
5. Провідний лист.

#### III. Короткі відомості з теорії

Електромагнітне поле – це особливий вид матерії, що відзначається неперервним розподілом у просторі (електромагнітні хвилі, поле заряджених частинок) і проявляє дискретну структуру (фотони), характеризується здатністю у вільному стані розповсюджуватись у пустоті (за відсутності сильних гравітаційних полів) зі швидкістю, близькою до  $3 \cdot 10^8$  м/с, володіє масою та енергією і виявляє силову дію на внесені в нього заряджені частинки, яка залежить від швидкості їх руху.

Інше визначення електромагнітного поля – це простір або його частина, в кожній точці якого існують і можуть бути визначеними векторні величини напруженості електричного  $\vec{E}$  та магнітного  $\vec{H}$  полів.

Однією зі складових електромагнітного поля є електричне поле – це така складова, що характеризується дією на електрично заряджену частинку з силою, пропорційною заряду частинки і не залежною від її швидкості.

Наслідком розповсюдження стаціонарного електричного поля в провідному середовищі є явище впорядкованого руху зарядів (наявність струму провідності), яке супроводжується виділенням тепла. Саме тому для підтримки незмінного електричного поля (постійної різниці потенціалів) і компенсації теплових втрат енергії потрібна наявність зовнішнього джерела, в якому створюється стороннє електричне поле за рахунок процесів неелектричного походження.

Основними характеристиками електричного поля є векторні величини – густина струму провідності  $\vec{J}$  [А/м<sup>2</sup>] і напруженість поля  $\vec{E}$  [В/м], а також скалярний електричний потенціал  $V$  [В]. Одночасно провідне середовище характеризуєть питомою провідністю  $\gamma$  [См/м]. Зокрема у лінійних стаціонарних середовищах  $\gamma = \text{const}$ . Струм через певну поверхню (переріз)  $I$  [А] і напруга на певній ділянці 1-2 провідного середовища записуються як інтегральні величини:

$$I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (8.1)$$

$$U_{12} = V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{\ell} \quad (8.2)$$

Якщо вектор  $\vec{J}$  розподіляється по площі  $S$  рівномірно то вираз (8.1) спрощується і приймає вигляд:

$$I = JS. \quad (8.3)$$

Аналогічно при рівномірному розподілі напруженості поля уздовж ділянки 1-2, напругу цієї ділянки можна визначити так

$$U_{12} = E \cdot \Delta\ell_{12}, \quad (8.4)$$

де  $\Delta\ell_{12}$  - довжина розглянутої ділянки провідного середовища.

Опір ділянки провідного середовища завдовжки  $l$  і перерізом  $S$  обчислюють як

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (8.5)$$

де  $\rho = \frac{1}{\gamma}$  - питомий опір середовища, [Ом·м].

Закони, які характеризують дію електричного поля в провідних середовищах – це закон Ома і закони Кірхгофа, а також закон Джоуля-Ленца. Вони застосовуються як в інтегральній так і у диференціальній формах. Зокрема закон Ома для областей зовні джерел енергії у інтегральній формі має вигляд

$$I = \frac{U}{R}. \quad (8.6)$$

Диференціальна форма згаданого закону запишеться так

$$\vec{J} = \gamma \vec{E}. \quad (8.7)$$

В інтегральній формі перший закон Кірхгофа можна записати наступним чином

$$\oint_S \vec{J} d\vec{S} = 0, \quad (8.8)$$

а диференціальна форма цього закону буде такою

$$\text{div} \vec{J} = 0. \quad (8.9)$$

Вираз другого закону Кірхгофа в диференціальній формі одночасно відображає і узагальнену форму закону Ома для областей поля, зайнятих джерелами енергії:

$$\vec{J} = \gamma(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}}), \quad (8.10)$$

де  $\vec{E}_{\text{стор}}$  - напруженість стороннього електричного поля яке створюється тепловими чи механічними процесами, хімічними реакціями, неелектромагнітними процесами, що протікають в його джерелі.

Згідно із диференціальною формою закону Джоуля-Ленца в одиниці об'єму провідного середовища поблизу даної точки в одиницю часу споживається енергія, яка пропорційна квадрату напруженості поля  $E$  в цій точці і залежить від питомої провідності  $\gamma$  матеріалу провідника, тобто

$$P = \gamma E^2, \quad (8.11)$$

де  $P$  - потужність теплових втрат у одиниці об'єму провідного середовища, Вт/м<sup>3</sup>.

Записані вище закони Ома і Кірхгофа у диференціальній формі можуть бути зведені у так званий об'єднаний закон, який описується рівнянням Лапласа

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0, \quad (8.12)$$

де  $\nabla$  - оператор Набла.

Як відомо, рівняння Лапласа описує потенціальні поля, зокрема і електростатичне поле. Тобто між електростатичним і полем в провідному середовищі в областях зовні джерел поля існує формальна аналогія, оскільки в обох випадках справедливим є рівняння Лапласа, також граничні умови записуються ідентичними формулами та основні величини пов'язані одна з іншою аналогічним чином. Сукупність зазначених обставин призводить до того, що і картина поля у провідному середовищі (рис.1) є подібною до картини електростатичного поля, що може стати у нагоді при моделюванні полів, а також під час їх аналізу.

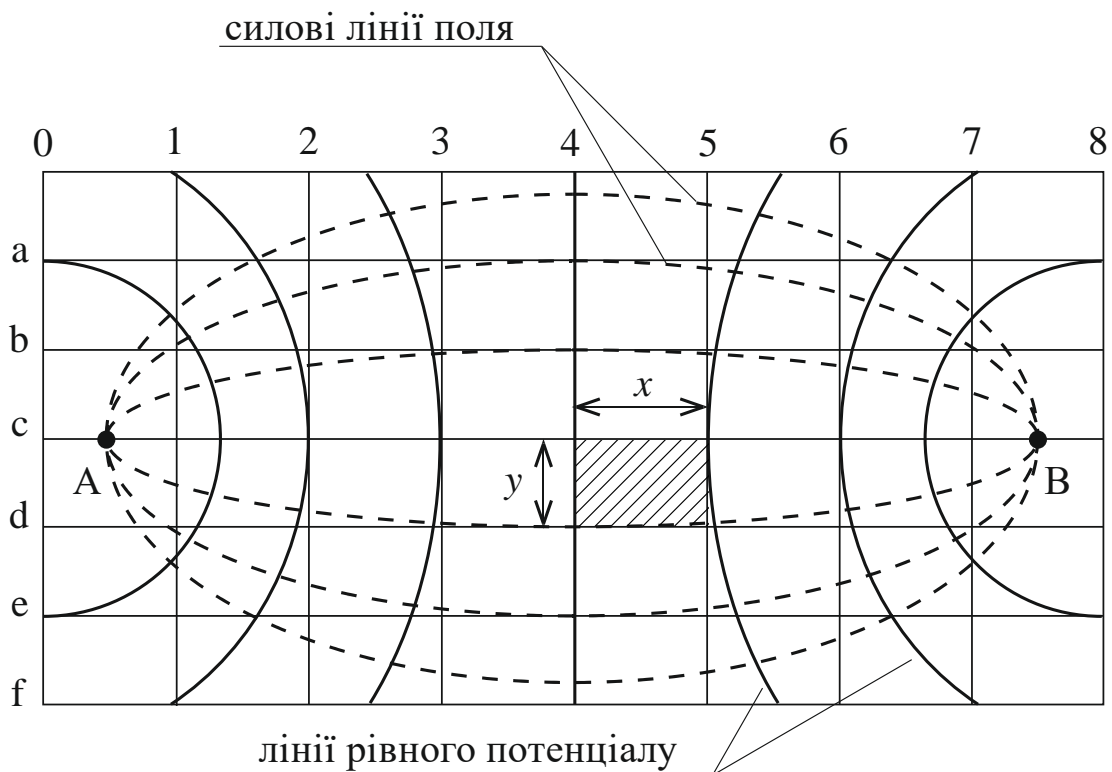


Рисунок 8.1. Картина електричного поля у плоскому провідному листі

#### IV. Зміст та порядок виконання роботи

1 Скласти коло (рис. 8.2).

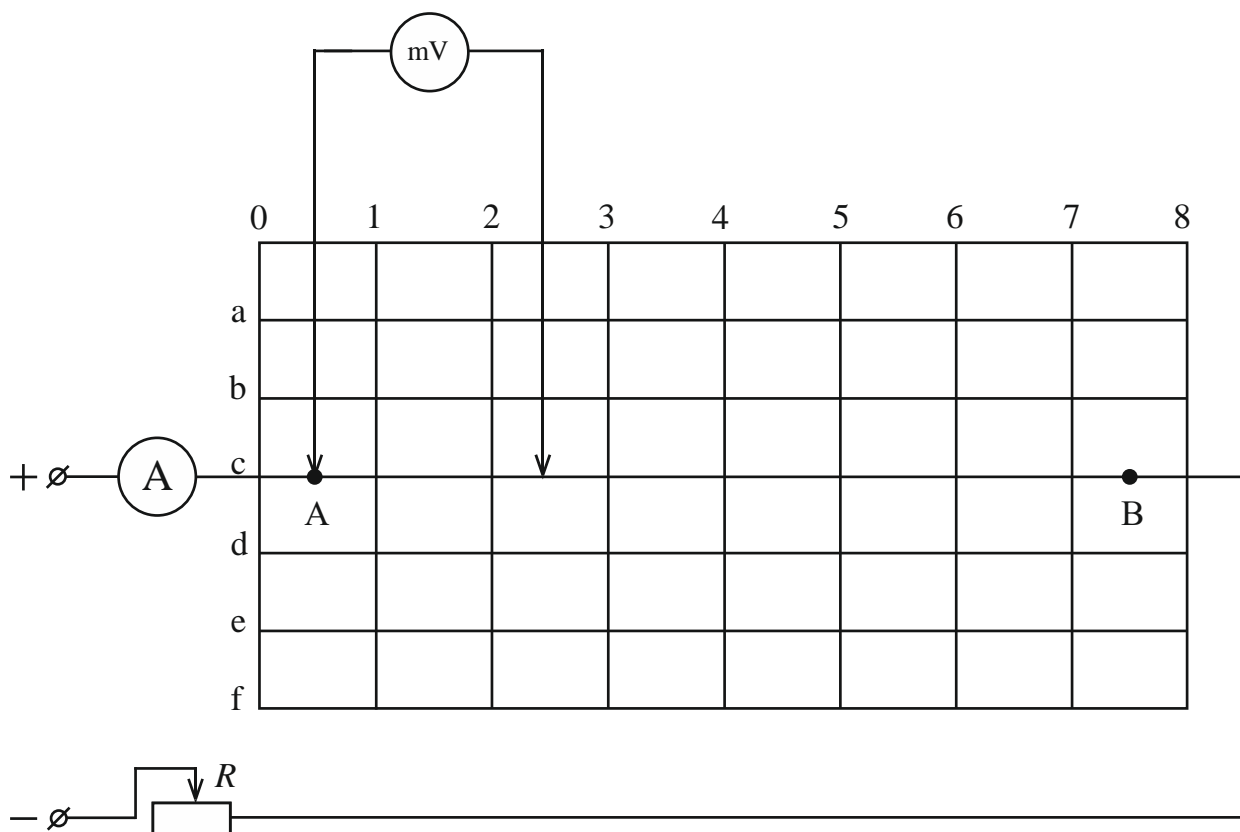


Рисунок 8.2. Схема експериментального отримання картини електричного поля

2. Увімкнути коло. За показами амперметра встановити струм у листі  $I = 10 \dots 15$  А і підтримувати його незмінним на протязі усього досліду.

3. За допомогою мілівольтметра побудувати картину ліній рівного електричного потенціалу (еквіпотенціалей). Для цього виміряти різницю потенціалів між точками А і В  $U_{AB}$  та розділити її на 8 рівних частин  $\Delta U = \frac{U_{AB}}{8}$  з тим,

щоб одержати 7 еквіпотенціалей. Підключити один затискач мілівольтметра до одного із затискачів листа, а інший – за допомогою гнучкого проводу – до щупу. Переміщуючи щуп по поверхні так, щоб покази мілівольтметра лишалися незмінними, одержати послідовно сім ліній рівного потенціалу через рівні проміжки  $\Delta U$ . Для кожної лінії слід отримати 5-6 точок і нанести їх на заздалегідь загартований лист у масштабі з координатною сіткою, відповідною до сітки на листі. Оскільки товщина листа незначна ( $h = 1$  мм), тому електричне поле плоске, тобто усі величини, які його характеризують, залежать лише від двох координат.

4. На рисунок листа нанести лінії струму. Їх проводять перпендикулярно до еквіпотенціалей. Слід нанести не менше восьми трубок рівного струму (рис.1). Струм трубки

$$\Delta I = \frac{\Delta U}{n}, \quad (8.13)$$

де  $n$  - кількість трубок струму.

5. Визначити за розмірами криволінійної площадки, обмеженої лініями рівного потенціалу і трубкою струму, питомий опір матеріалу листа.

Для цього належить виділити чотирикутник якомога ближчий до прямокутної форми, тобто у центральній частині листа. Тоді питомий опір матеріалу листа постійному струмові можна визначити так

$$\rho = \frac{RS}{\ell} = \frac{\Delta U \cdot y \cdot h}{\Delta I \cdot x}, \quad (8.14)$$

де  $y$  - ширина трубки струму, м;

$x$  - довжина трубки струму, м;

$h$  - товщина листа, м.

### Контрольні запитання

1. Яке поле називається плоскопаралельним?
2. Які поля, що зустрічаються у практиці можна віднести до плоскопаралельних?
3. Якими основними рівняннями описується плоско паралельне поле постійного струму?
4. Наведіть аналогії між електричним полем постійного струму та магнітним полем постійного струму.
5. Які аналогії існують між електричним полем постійного струму та електростатичним полем у діелектрику?
6. Сформулюйте та запишіть закон Ома у диференціальній формі.
7. Сформулюйте та запишіть закони Кірхгофа у диференціальній формі.

### Література

1. [3], 7.1, 7.2, 7.7, 7.8, 8.1, 8.2, 8.5, 8.7.
2. [4], 14.1 - 14.4.
3. [5], 1.1

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Костін М. О., Шейкіна О. Г. Теоретичні основи електротехніки : підручник : у 3 т. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2006. Т. 1 : Теорія лінійних електричних кіл. 336 с.
2. Костін М. О., Шейкіна О. Г. Теоретичні основи електротехніки : підручник : у 3 т. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2007. Т. 2 : Перехідні процеси у лінійних електричних колах. 276 с.
3. Костін М. О., Шейкіна О. Г. Теоретичні основи електротехніки : підручник : у 3 т. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2011. Т. 3. Ч. 1 : Теорія нелінійних кіл. 224 с.
4. Khilov V. S. Theoretical fundamentals of electrical engineering : textbook. Dnipro : National Mining University, 2018. 467 p.
5. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки : підручник. Львів : Львівська політехніка, 2018. 416 с.
6. Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Мадьяров В. Г. Теоретичні основи електротехніки : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2018. Ч. 1. 154 с.
7. Грудська В. П. Методи розрахунку нелінійних кіл постійного струму : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 82 с.
8. Теоретичні основи електротехніки : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмою «Електричні системи і мережі», «Електричні станції», «Електричні машини і апарати», «Управління, захист та автоматизація енергосистем», «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність», «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / Л. Ю. Спінул та ін. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. Ч. 2. 167 с.
9. Туник В. Ф. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах з зосередженими параметрами. Класичний, операторний метод і метод інтеграла Дюамеля : навч.-метод. посіб. до виконання розрахунково-графічного завдання з дисципліни ТОЕ. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2002. 93 с.
10. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни ТОЕ / уклад.: І. Л. Бондар, О. І. Бондар ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна, 2005. Ч. 3 : Розрахунок електричного поля. 44 с.

Навчально-методичне видання

**Бондар Олег Ігорович,  
Маренич Оксана Леонідівна,  
Карзова Оксана Олександрівна**

## **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

Навчально-методичні рекомендації до лабораторних робіт, ч. 2

Електронне видання

Експертний висновок склала канд. техн. наук, доц. Оксана Маренич

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 804 від 26.11.2024)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка О. Л. Маренич

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 2,73 Обл.-вид. арк. 1,26.

Зам. № 125

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022