

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка»

В авторській редакції

НЕЛІНІЙНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Навчально-методичні рекомендації
до виконання лабораторних робіт

Електронне видання

ДНІПРО
2025

Упорядники:

Олег Ігорович Бондар

Оксана Леонідівна Маренич

Оксана Олександрівна Карзова

Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми G3.2.03.2025
«Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»

Протокол №1 від 14.10.2025 р.

Н 49 Нелінійна електротехніка: навчально- методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт / упоряд. О. І. Бондар, О. Л. Маренич, О. А. Карзова; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро: УДУНТ, 2025. – 53 с.

Навчально-методичні рекомендації містять теоретичні положення та практичні рекомендації по дослідженню і аналізу усталених а також перехідних процесів у нелінійних пристроях та системах із використанням електротехнічного обладнання лабораторій кафедри «Електротехніка та електромеханіка» університету.

Іл. 36. Табл. 18. Бібліогр. 7.

© Бондар О. І. та ін., укладання, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. Дослідження електричного кола постійного струму з нелінійним елементом.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. Дослідження динамічної петлі гістерезису феромагнітного матеріалу.....	7
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3. Дослідження несинусоїдних електричних величин у колі змінного струму з безінерційними нелінійними елементами	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4. Дослідження кола з послідовним з'єднанням конденсатора та котушки зі сталевим осердям.....	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5. Дослідження ферорезонансного стабілізатора напруги.....	32
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6. Дослідження перехідних процесів у нерозгалуженому нелінійному колі.....	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7. Дослідження перехідних процесів у розгалуженому нелінійному колі RC	41
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8. Дослідження генератора релаксаційних коливань	46
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	52

ВСТУП

Розвиток сучасної електроенергетики значною мірою ґрунтується на застосуванні нелінійних кіл і розробці нових нелінійних елементів. Зокрема на основі нелінійних ефектів створені такі найважливіші електротехнічні пристрої, як випрямлячі, інвертори, стабілізатори, перетворювачі частоти тощо. Одночасно нелінійності характеристик елементів можуть чинити не тільки позитивний, але і негативний вплив на роботу електротехнічних пристроїв та систем створюючи ряд специфічних проблем. Тому виконання лабораторних робіт з дисципліни «Нелінійна електротехніка» має своєю метою сприяти розширенню і формуванню у здобувачів освіти знань щодо основних явищ притаманних нелінійним системам, принципів їх моделювання, набуттю практичного досвіду проведення експериментальних досліджень нелінійних пристроїв і систем, а також додаткових навичок у розв'язуванні задач аналізу електричних та магнітних нелінійних кіл.

Безумовне додержування правил безпеки під час роботи в електротехнічній лабораторії є необхідною умовою запобігання електротравматизму. Відповідно до лабораторних робіт можуть бути допущені виключно ті студенти, які попередньо пройшли інструктаж із правил електробезпеки та пожежної безпеки. Викладений у даних навчально-методичних рекомендаціях порядок виконання кожної лабораторної роботи разом із усними настановами викладача мають сприяти запобіганню можливим ризикам під час роботи з лабораторним електротехнічним обладнанням.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЛІНІЙНИМ ЕЛЕМЕНТОМ

I. Мета роботи

Експериментальне отримання статичної вольт-амперної характеристики нелінійного елемента. Визначення напруги і струму у нелінійному елементі методом еквівалентного генератора шляхом виконання графічних побудов.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Реостати R_1, R_3 – 100 Ом.
2. Реостати R_2, R_4 – 23 Ом.
3. Ламповий реостат НР.
4. Амперметр магнітоелектричний А – 0...1 А.
5. Вольтметр V – тип Щ-4300.

III. Короткі відомості з теорії

Нелінійність характеристик резистивних елементів, і як результат залежності опору вказаних елементів від їхніх струмів і напруг обумовлюють те, що електромагнітний стан нелінійних кіл постійного струму в усталеному режимі описується нелійними алгебраїчними рівняннями, складеними за законами Кірхгофа.

В залежності від характеру операцій, які необхідно виконати, щоб отримати розв'язок вказаних нелінійних рівнянь усі методи розрахунку усталених (і перехідних) процесів у нелінійних колах умовно можна розділити на графічні, (графо-аналітичні), аналітичні та чисельні.

Під графічними (графо-аналітичними) методами розуміють методи, в яких характеристики нелінійних і лінійних елементів кола представляються графічно, а система рівнянь, що складена за законами Кірхгофа, розв'язується, тобто шукані струми і напруги визначаються шляхом виконання графічних побудов. Графічні методи, які на певному етапі супроводжуються деякими аналітичними перетвореннями і допоміжними чисельними підрахунками, називають графо-аналітичними методами. Перевагами графічних методів є: безпосереднє використання без аналітичної апроксимації дійсних експериментально отриманих кривих характеристик елементів; можливість достатньо швидко одержати усі можливі розв'язки, якщо висока точність не обов'язкова; висока наочність розрахунків і можливість їх виконання незалежно від вигляду і складності графіків нелінійних характеристик елементів. До недоліків графічних методів слід віднести неможливість отримати розв'язок у загальному вигляді, а лише для одного конкретного стану кола, оскільки інший стан кола потребує нових графічних побудов; невисока точність розв'язку, яка залежить від способу побуди і зростає зі збільшенням масштабу графіків, необхідність виконання відносно великої кількості ручних операцій одночасно з низькою придатністю до автоматизації процесу розрахунку.

Найчастіше графічні методи використовують при розрахунках усталених процесів у нелінійних колах постійного струму і у магнітних колах при постійних магнітних потоках. Найбільш уживаними тут графічними методами є: метод еквівалентної або результуючої ВАХ (метод перетворень), метод перетину характеристик, метод двох вузлів, метод еквівалентного генератора, тощо.

Зокрема якщо електричне коло є складним, але містить лише один нелінійний елемент, тоді найбільш ефективним методом його розрахунку є метод еквівалентного генератора. Його застосовують у такому порядку: видаляють вітку з нелінійним елементом, залишена частина кола є лінійною. Цю залишену частину кола замінюють еквівалентним генератором, розрахувавши її однойменним методом, знаходять напругу холостого ходу U_{xx} та опір короткого замикання R_{K3} ; підключають до кола з розрахованим еквівалентним генератором вітку з нелінійним елементом. В результаті отримують просте

коло з послідовним з'єднанням ЕРС з напругою U_{xx} , лінійного резистора R_{K3} та нелінійного резистора НР яке розраховують графічно методом еквівалентної характеристики або методом перетину характеристик.

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Скласти коло (рис. 1.1).

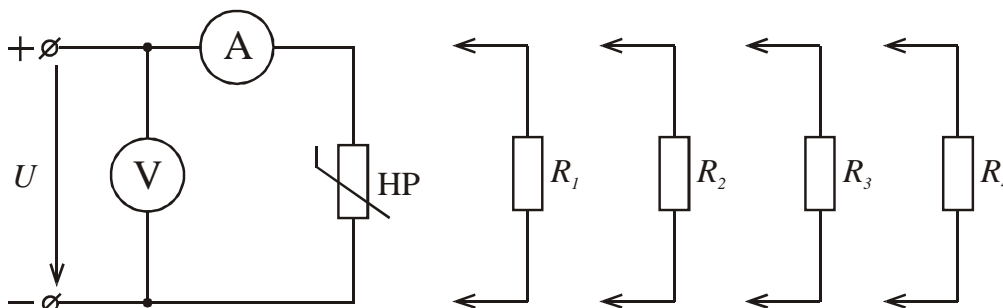


Рисунок 1.1. Схема отримання ВАХ нелінійного резистора НР та опорів лінійних елементів за методом амперметра - вольтметра

2. Зняти вольт-амперну характеристику (ВАХ) нелінійного елемента НР кола. Записати показання приладів у табл. 1.1.

Таблиця 1.1. Статична вольт-амперна характеристика нелінійного елемента кола

$U, \text{В}$									
$I, \text{А}$									

3. Визначити опір реостатів R_1, R_2, R_3, R_4 , користуючись омметром або методом амперметра-вольтметра. Результати вимірів занести до таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Параметри і електричні величини у дослідному колі рис.1.2

Виміряно				Виміряно			Обчислено	
R_1	R_2	R_3	R_4	U_0	$U_{\text{вих}}$	I	$U_{\text{вих}}$	I
Ом	Ом	Ом	Ом	В	В	А	В	А

4. Скласти коло (рис. 1.2).

5. Для заданого значення вхідної напруги U_0 виконати необхідні вимірювання. Показання приладів занести до табл. 1.2.

6. Для кола (див. рис. 1.2) методом еквівалентного генератора розрахувати струм I та вихідну напругу $U_{\text{вих}}$ за заданої вхідної напруги кола U_0 . Результати розрахунків занести до табл. 1.2.

7. Порівняти результати вимірювань з розрахунковими даними.

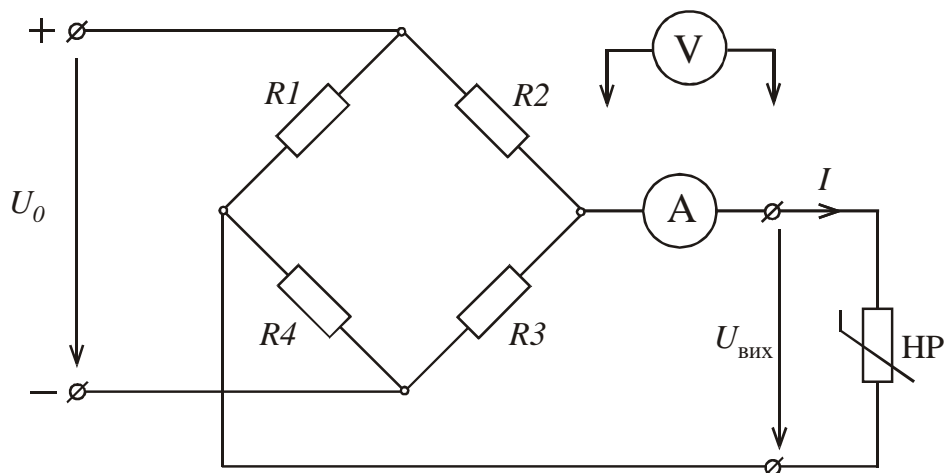


Рисунок 1.2. Схема для експериментальних досліджень у нелінійному колі

Контрольні запитання

1. Для яких випадків розрахунку електричних кіл застосовують метод еквівалентного генератора?
2. Як здійснюють режим холостого ходу еквівалентного генератора?
3. Як здійснюють режим короткого замикання еквівалентного генератора?
4. Як знайти напругу холостого ходу та внутрішній опір еквівалентного генератора?
5. Як знайти струм і напругу на нелінійному елементі графічним методом у простому колі з еквівалентним генератором?

Література

1. [1], 2.1 – 2.5.
2. [2], 4.1 – 4.3.
3. [3], 6.2.2.
4. [4], 9.4.4.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ ПЕТЛІ ГІСТЕРЕЗИСУ ФЕРОМАГНІТНОГО МАТЕРІАЛУ

I. Мета роботи

Дослідження магнітних властивостей феромагнітного матеріалу на основі експериментально отриманих динамічних петель гістерезису.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Трансформатор Т – 220 В/120 В.
2. Міліамперметр електродинамічний mA – 0...250 mA.

3. Реостат $R_1 - 100 \text{ Ом}, 0,5 \text{ А}$.
4. Резистор $R_2 - 2 \text{ кОм}, 100 \text{ Вт}$.
5. Магазин ємностей $C_2 - 60 \text{ мкФ}$.
6. Вольтметр електромагнітний $V_1 - 50 \dots 250 \text{ В}$.
7. Вольтметр електромагнітний $V_2 - 30 \dots 150 \text{ В}$.
8. Вольтметр електромагнітний $V_3 - 5 \dots 30 \text{ В}$.
9. Електронний осцилограф С1-93.

III. Короткі відомості з теорії

Усі матеріали та середовища у відповідності до їх магнітних властивостей розподіляють на дві групи: феромагнітні і не феромагнітні. Феромагнітні матеріали (наприклад, залізо, нікель, кобальт, їх сплави, ферити тощо) легко і сильно намагнічуються. Кількісно ця їхня здатність характеризується високим значенням відносної магнітної проникності μ_r , яка значно перевищує одиницю, досягаючи $10^5 \dots 10^6$, і отже їх абсолютна магнітна проникність є суттєво вищою за магнітну постійну $\mu_a \gg \mu_0$. У не феромагнітних матеріалів, до яких відносять наприклад, повітря, дерево, скло, деякі кольорові метали, $\mu_r \approx 1.0$ і відповідно $\mu_a \approx \mu_0$. Наприклад, для дерева і повітря $\mu_r \approx 1.0$, у платини – $1,00036$, а у вісмуту $\mu_r = 0,99983$. Але для міді та алюмінію величина $\mu_r = 3 \dots 4$.

Задля отримання в елементах пристрою магнітного поля потрібної інтенсивності магнітопроводи кола виконують із феромагнітних матеріалів для яких притаманні нелінійні характеристики. Зокрема властивості феромагнітних матеріалів зазвичай характеризують залежністю між магнітною індукцією B і напруженістю H магнітного поля в матеріалі. Відповідно розрізняють два основних різновиди цих залежностей : криві намагнічування і гістерезисні петлі, які отримують експериментально і задають графічно або у табличній формі.

Динамічною петлею гістерезису називають замкнену криву, яка виражає залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля при періодичному перемагнічуванні з певною частотою феромагнітного матеріалу (рис. 2.1).

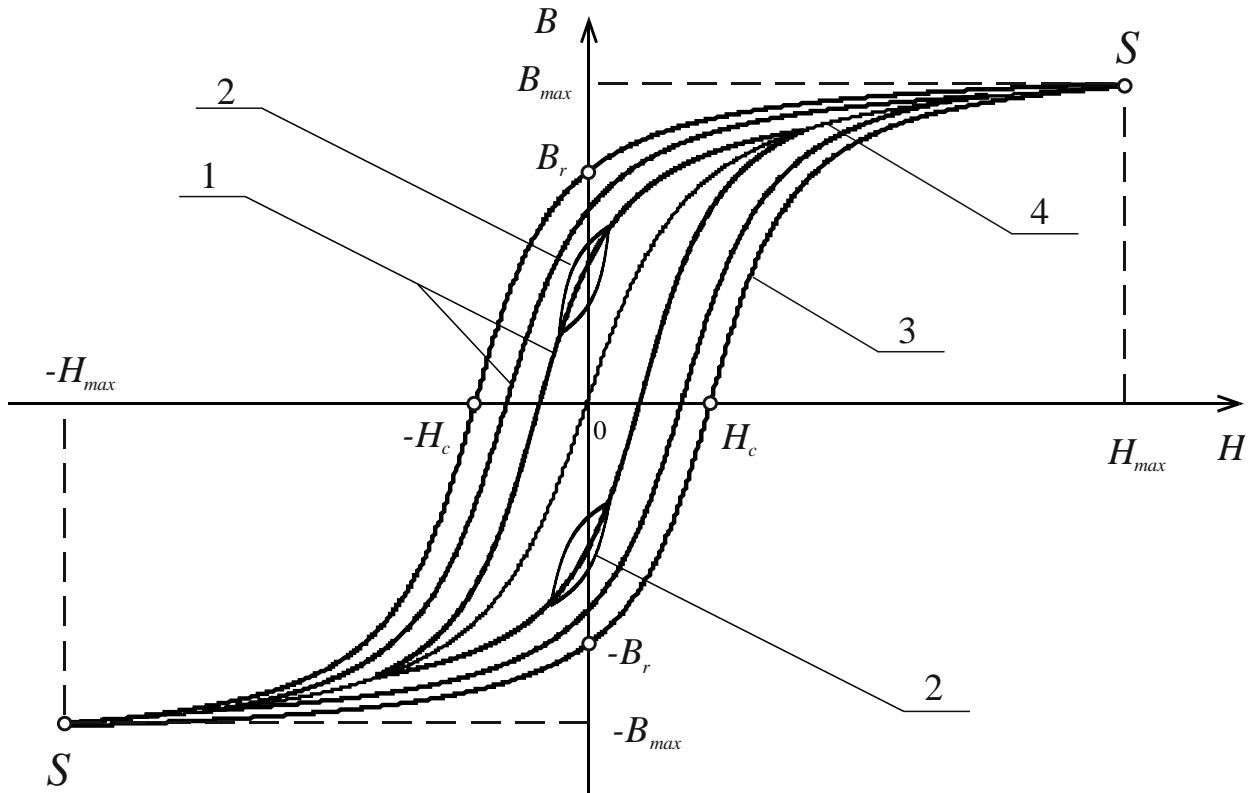


Рисунок 2.1. Зовнішній вигляд сукупності динамічних петель гістерезису ферромагнітного матеріалу

Гістерезисна крива є важливою характеристикою ферромагнітних матеріалів тому що вона через свою форму та певні її розміри відображає його магнітні властивості. Так, наприклад, за величиною площі динамічної петлі гістерезису судять про втрати енергії, які виникають у ферромагнітному осерді від перемагнічування та вихрових струмів, які виникають в осерді.

У залежності від режиму перемагнічування динамічні петлі гістерезису відносно початку координат можуть бути як симетричними (див. рис. 2.1, криві 1), так і несиметричними (див. рис. 2.1, криві 2).

Найбільшу симетричну петлю, в якій вершини заходять в область насичення ферромагнітного матеріалу і відповідають найбільшим значенням магнітної індукції та напруженості магнітного поля, називають граничною петлею гістерезису (див. рис. 2.1, криві 3). Точки перерізу граничної петлі гістерезису з віссю ординат визначають величину залишкової індукції B_r у ферромагнітному осерді, а точки перерізу з віссю абсцис визначають величину коерцитивної сили H_c напруженості поля.

Криву, яка проходить через вершини сімейства симетричних динамічних петель, називають динамічною кривою намагнічування (див. рис. 2.1, криві 4).

Для того, щоб електронний промінь креслив на екрані осцилографа динамічну петлю гістерезису необхідно виконати такі дві умови:

1. Напряга, яка відхиляє промінь по горизонталі, повинна бути пропорційною напруженості магнітного поля:

$$u_x = k_1 H(t). \quad (2.1)$$

2. Напряга, яка відхиляє промінь по вертикалі, повинна бути пропорційною магнітній індукції:

$$u_y = k_2 B(t). \quad (2.2)$$

Для виконання першої умови напругу u_x знімають з активного опору R_1 , увімкненого послідовно з обмоткою намагнічування W_1 (див. рис. 2.4). Тоді

$$u_x = u_{R_1} = R_1 i_1 = R_1 \frac{H(t) l_{cp}}{W_1} = \frac{R_1 l_{cp}}{W_1} H(t) = k_1 H(t), \quad (2.3)$$

де l_{cp} – середня довжина силової лінії магнітопроводу.

Для виконання другої умови напругу u_y знімають з лінійного конденсатора C_2 , який ввімкнений послідовно з резистором R_2 на затискачі вторинної обмотки W_2 (див. рис. 2.4). При цьому, величина опору резистора R_2 повинна бути набагато більшою величини ємнісного опору X_{C_2} . Тоді

$$\begin{aligned} u_y = u_{C_2} &= \frac{1}{C_2} \int \frac{u_2}{R_2} dt = \frac{1}{R_2 C_2} \int (u_2 = -e_2) dt = \\ &= \frac{1}{R_2 C_2} \int W_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{W_2}{R_2 C_2} \int (d\Phi = dB \cdot S_0) = \frac{W_2 S_0}{R_2 C_2} B(t) = K_2 \cdot B(t) \end{aligned}, \quad (2.4)$$

де S_0 – переріз осердя магнітопроводу.

Осцилографічний спосіб дослідження феромагнітних матеріалів дуже зручний і простий для візуального спостереження і реєстрації (у тому числі і шляхом фотографування) динамічних кривих перемагнічування в широкому діапазоні частот (до 100 кГц). Цей спосіб дозволяє також досліджувати вплив різних факторів на форму та розміри динамічних петель, таких як зміна частоти, коливання температури навколишнього середовища, підмагнічування постійним струмом і таке інше.

Точність результатів вимірів цим способом значно обмежена і визначається порядку 10%.

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Накреслити магнітопровід трансформатора, виміряти його геометричні розміри згідно з рис. 2.2 і дані занести до табл. 2.1.

2. Обчислити довжину середньої силової лінії магнітопроводу

$$l_{cp} = 2(a + b - 2c). \quad (2.5)$$

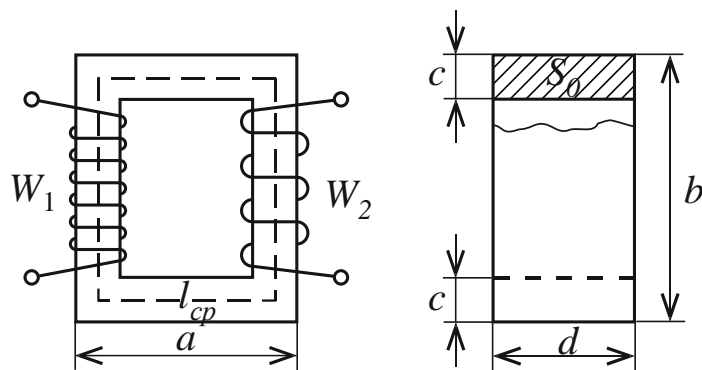


Рисунок 2.2. Схема магнітопроводу дослідного трансформатора

Таблиця 2.1 Основні дані досліджуваного трансформатора

Виміряно								Обчислено			
a	b	c	d	U_1	U_2	U_δ	W_δ	$l_{сер}$	S_0	W_1	W_2
м	м	м	м	В	В	В	вит.	м	м ²	вит.	вит.

3. Обчислити активний переріз магнітопроводу

$$S_o = c \cdot d \cdot k_3, \quad (2.6)$$

де $k_3=0,95$ – коефіцієнт заповнення перерізу сталлю.

4. Зібрати коло (рис. 2.3), підвести до первинної обмотки W_1 трансформатора номінальну напругу 220 В і занести до табл. 1 показання вольтметрів.

5. Обчислити кількість витків первинної

$$W_1 = W_\delta \frac{U_1}{U_\delta} \quad (2.7)$$

та вторинної

$$W_2 = W_1 \frac{U_2}{U_1} \quad (2.8)$$

обмоток трансформатора і дані занести до табл. 2.1.

6. Зібрати схему (рис. 2.4) для дослідження динамічної петлі гістерезису. Для цього:

6.1. Встановити за допомогою ЛАТРа струм у первинній обмотці 250 мА /100 поділок/.

6.2. Встановити за допомогою ручок k_y та k_x зображення петлі гістерезису в межах всієї шкали осцилографа.

6.3. Виміряти в поділках шкали:

u_{max} - пропорційне B_{max} ;

u_r - пропорційне B_r ;

x_{max} - пропорційне H_{max} ;

x_c - пропорційне H_c .

Дані вимірів занести до табл. 2.2

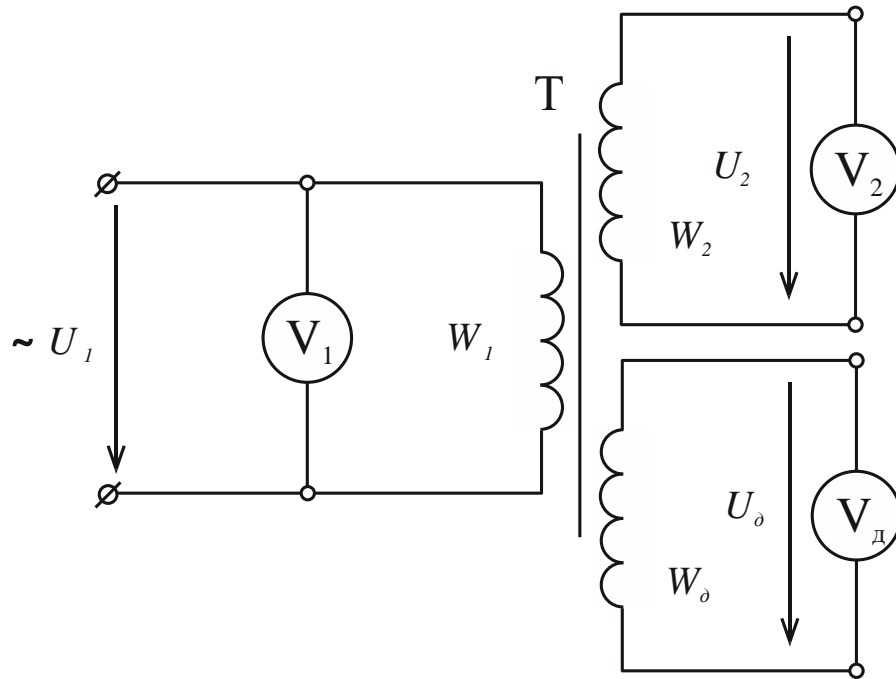


Рисунок 2.3. Схема для дослідного визначення кількості витків трансформатора

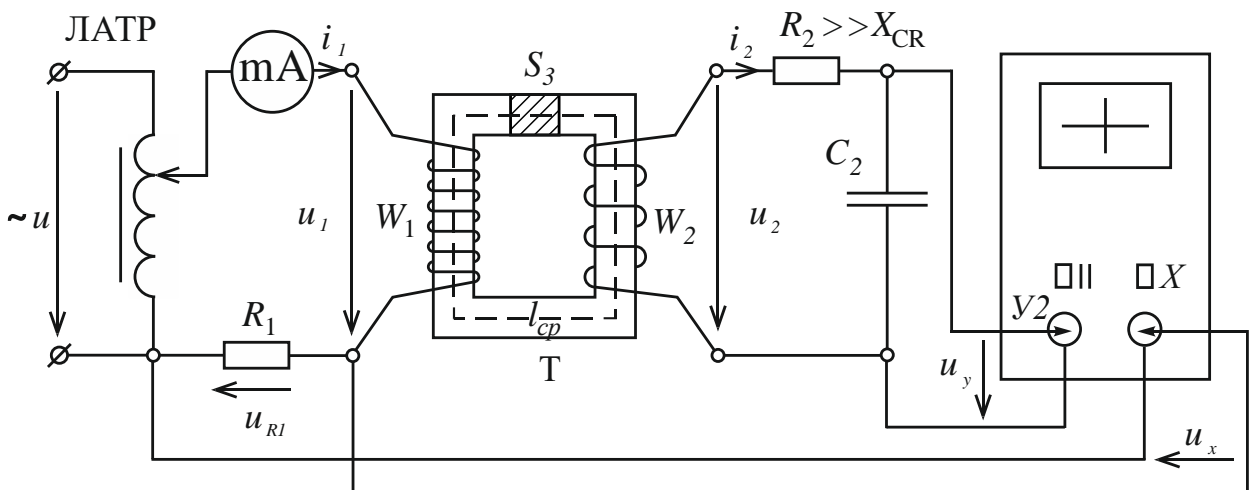


Рисунок 2.4. Схема для експериментально отримання динамічних петель гістерезису дослідного трансформатора

Таблиця 2.2 Значення характерних точок граничної петлі гістерезису

Виміряно					Обчислено				
k_v	I_1	u_{max}	u_r	x_{max}	x_c	B_{max}	B_r	H_{max}	H_c
В/под	А	под	под	под	под	Тл	Тл	А/м	А/м

7. Обчислити максимальне значення індукції в магнітопроводі трансформатора

$$B_{\max} = \frac{R_2 \cdot C_2}{W_2 \cdot S_o} k_U y_{\max} \cdot \quad (2.9)$$

8. Обчислити залишкову індукцію магнітопроводу

$$B_r = \frac{B_{\max}}{y_{\max}} \cdot y_r \cdot \quad (2.10)$$

9. Обчислити максимальне значення напруженості магнітного поля в осерді трансформатора

$$H_{\max} = \frac{\sqrt{2} I_1 W_1}{l_{\text{сер}}} \cdot \quad (2.11)$$

10. Обчислити коерцитивну силу магнітопроводу

$$H_c = \frac{H_{\max}}{X_{\max}} \cdot X_c \cdot \quad (2.12)$$

Дані обчислень занести до табл. 2.

11. За даними табл. 2.2 накреслити в масштабі найбільшу граничну петлю гістерезису та виділити на ній характерні точки

$$(\pm B_{\max}, \pm H_{\max}, \pm B_r, \pm H_c) \cdot \quad (2.13)$$

12. Зняти динамічну криву намагнічування осердя магнітопроводу. Для цього:

12.1. Встановити за допомогою ЛАТРа струм у первинній обмотці 225 мА /90 поділок/ і занести до табл. 2.3 координати вершини $y_i \cdot x_i$ зменшеної петлі гістерезису.

12.2. Провести виміри вершин зменшених петель гістерезису за інших значень струму, вказаних у табл. 2.3.

12.3. Обчислити за формулами значення індукції B_i та напруженості H_i для кожного значення струму. Дані обчислення занести до табл. 2.3.

13. Обчислити для кожного значення струму величину відносної магнітної проникності

$$\mu_r = \frac{B_i}{H_i \cdot \mu_0}, \quad (2.14)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ - абсолютна магнітна проникність повітря, [Гн/м].

14. За даними табл. 2.3 побудувати в масштабі динамічну криву намагнічування $B_i(H_i)$ та криву магнітної проникності $\mu(H_i)$ на одному графіку в межах першого квадранта.

Таблиця 2.3 Значення характерних точок зменшених петель гістерезису

Виміряно	I	под	100	80	60	40	20
		A					
	y_i	под					
	x_i	под					
Обчислено	B_i	Тл					
	H_i	A/под					
	μ_r	в.о					

Контрольні запитання

1. Як класифікують матеріали стосовно їхньої здатності проводити магнітні потоки?
2. Чим обумовлені магнітні властивості феромагнетиків?
3. У чому полягає сутність явища гістерезису у феромагнітних матеріалах?
3. Що таке магнітотверді та магнітом'які матеріали? Як відрізняються їх петлі гістерезису по зовнішньому вигляду?
4. Як пов'язана основна крива намагнічування феромагнітного матеріалу із його сукупністю петель гістерезису?

Література

1. [1], 3.1 – 3.4.
2. [4], 10.1 – 10.4.
3. [5], 6.4.
4. [6], 10.4.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИНУСОЇДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН У КОЛІ ЗМІННОГО СТРУМУ З БЕЗІНЕРЦІЙНИМИ НЕЛІНІЙНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

I. Мета роботи

Дослідити вплив безінерційних нелінійних елементів на несинусоїдність електричних величин у колі двопівперіодного випрямляча. Набути практичних навичок у вимірюванні електричних величин цифровим осцилографом.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Лабораторний щит живлення.
2. Цифровий USB-осцилограф.
3. Осцилографічний щуп-подільник 1:10.
4. Інструкція з експлуатації осцилографа.
5. Ноутбук або стаціонарний персональний комп'ютер з вільним USB портом та встановленим програмним забезпеченням осцилографа.

Примітка. Замість обладнання, вказаного у п.2 та 5, можна використовувати портативний або настільний цифровий осцилограф, обладнаний рідкокристалічним екраном та пристроєм запису даних.

III. Короткі відомості з теорії

Безінерційним називають такий нелінійний елемент, нелінійність характеристики якого обумовлена нетепловими, найчастіше електронними, процесами, що протікають в елементі. Такими елементами, насамперед, являються напівпровідникові елементи (діоди, транзистори, тиристори тощо) та вакуумні електронні лампи, оскільки інерція електронів, що створюють струм, дуже мала. Швидкість електронних процесів значно вища ніж у теплових, тому безінерційні нелінійні елементи проявляють свою нелінійність по відношенню і до миттєвих а не тільки до діючих значень величин. В свою чергу це стає причиною того, що на виході кола з нелінійними безінерційними елементами у разі його живлення від синусоїдного джерела з'являються несинусоїдні електричні величини. Зазначене явище широко застосовується на практиці при створенні випрямлячів, котрі перетворюють вхідну синусоїдну напругу на вихідну несинусоїдну однонаправлену напругу, яку умовно називають постійною. Вказане перетворення досягається за рахунок нелінійності характеристик випрямних діодів, котрі за своєю сутністю представляють собою безінерційні нелінійні елементи яким притаманна властивість односторонньої провідності. Характерним прикладом такої конструкції може служити схема двопівперіодного випрямлення з нульовою точкою (рис. 3.1), яка зокрема застосована у щитах живлення робочих місць електротехнічних ла-

бораторій для вивчення дисципліни «Нелінійна електротехніка».

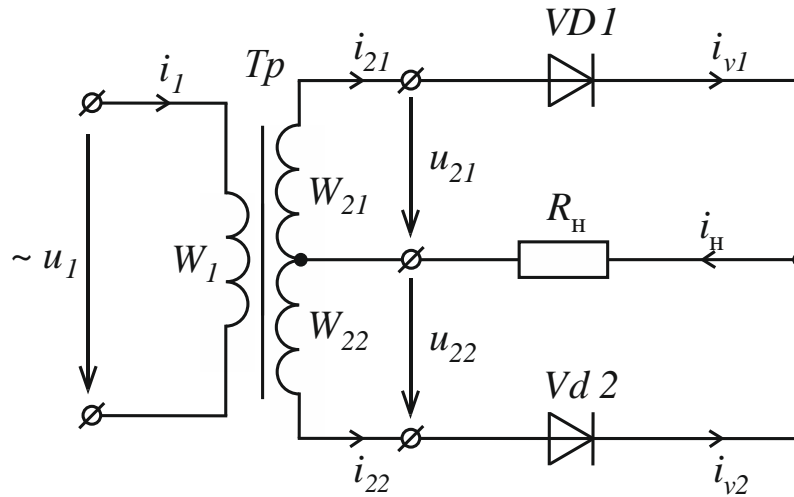


Рисунок 3.1. Принципова схема двопівперіодного випрямляча з нульовою точкою

Часто при розрахунках вважають діоди $Vd1$ та $Vd2$ ідеальними вентилями, тобто такими елементами у яких при прикладенні напруги в прямому напрямку (плюс на анод, мінус – на катод) їх опір дорівнює нулеві, а при зворотному напрямку напруги на вказаних діодах (плюс на анод, мінус – на катод) – нескінченності. Характеристика ідеального вентиля показана на рис. 3.2, залежність 1. За умови такого припущення часові залежності електричних величин у колі рис.3.1 представлено на рис. 3.3.

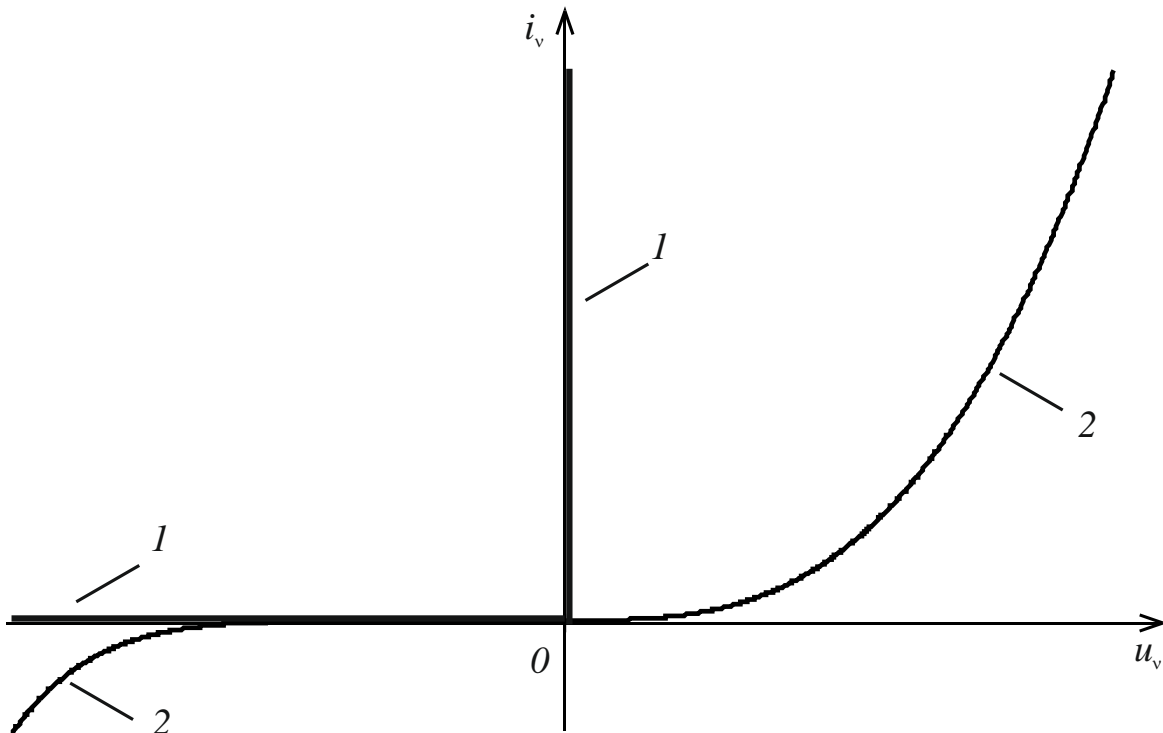


Рисунок 3.2. Ампер-вольтні характеристики випрямного діода

1 – ідеального, 2 – реального.

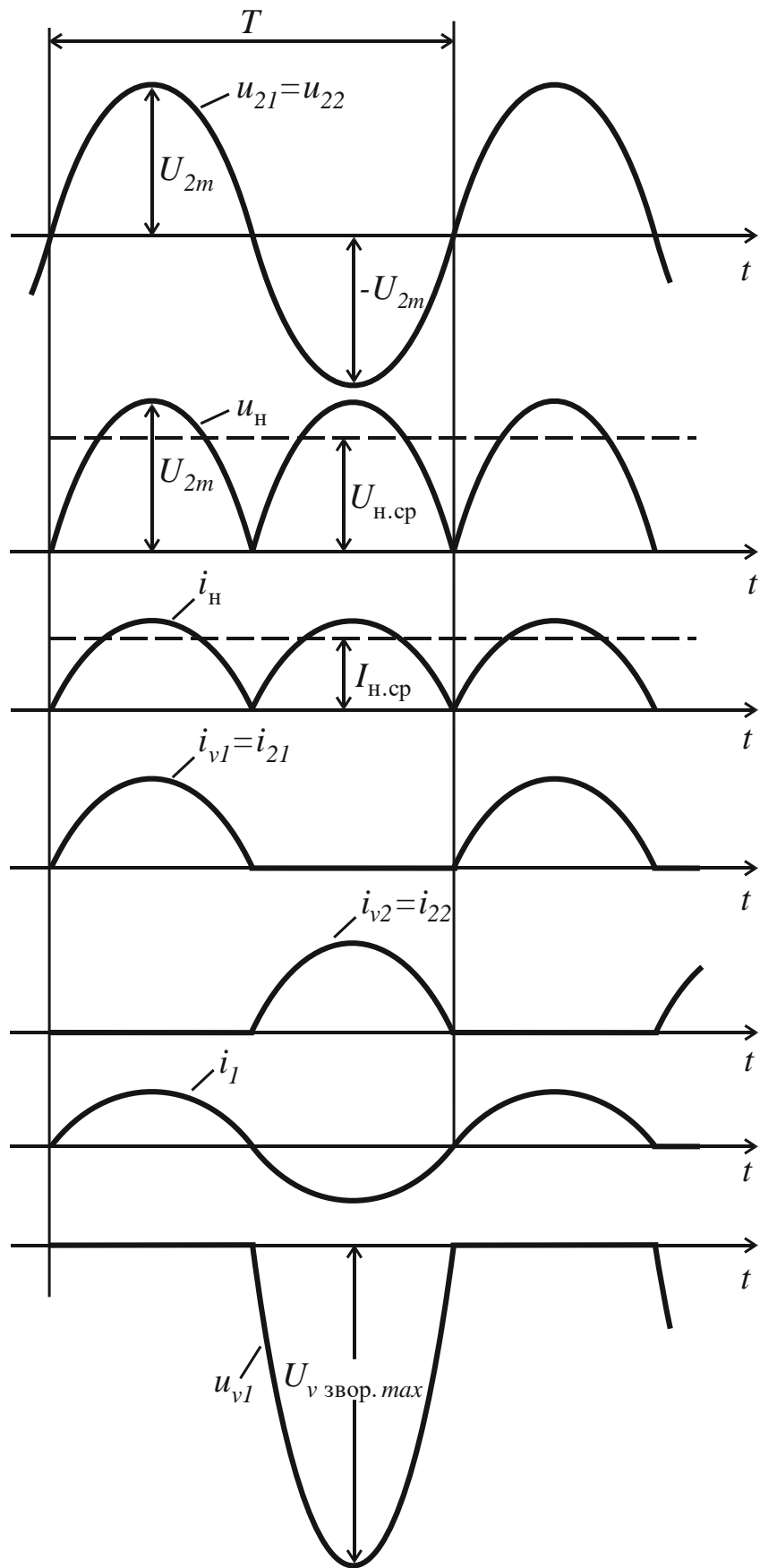


Рисунок 3.3. Часові залежності електричних величин у колі рис.3.1

На основі наведених залежностей можна обчислити основні співвідношення (табл. 3.1), по яким обирають тип діодів і виконують розрахунок трансформатора в залежності від електричних величин які характеризують навантаження навантаження: середнього значення напруги $U_{н.ср}$, струму $I_{н.ср}$, та потужності P_H .

Таблиця 3.1 Співвідношення електричних величин на навантаженні

$\frac{U_{21}}{U_{н.ср}}$	$\frac{I_{21}}{I_{н.ср}}$	$\frac{U_{взвор.мах}}{U_{н.ср}}$	$\frac{I_{вср}}{I_{н.ср}}$	$\frac{S_2}{P_H}$	k_{II}
1,11	0,721	3,14	0,5	1,48	0,67

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Прочитати інструкцію з експлуатації цифрового осцилографа. Розібратись, як здійснюють основні операції з керування даним осцилографом.

2. Зібрати схему досліду, наведену на рис. 3.4. При цьому осцилограф 1 розташувати на поверхні лабораторного стола, а осцилографічний щуп 2 надійно приєднати до клем регульованої напруги лабораторного щита живлення РЩ. Перемикач діапазонів вимірів на щупі-подільнику встановити у положення 1:10. Перемикач SA3 РЩ встановити в положення «-» (постійний струм).

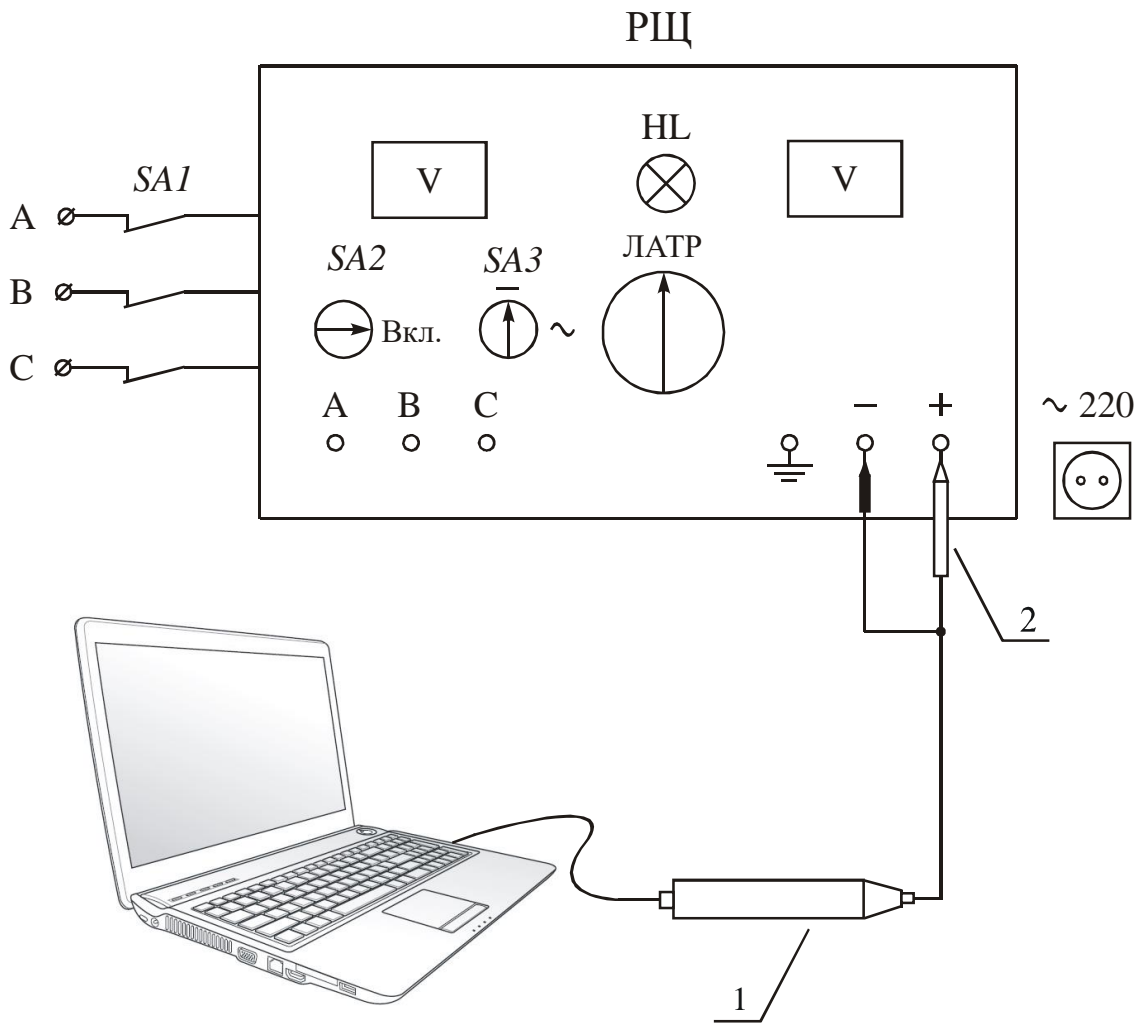


Рисунок 3.4 Схема проведення осцилографічних вимірювань

3. Увімкнути щит живлення і встановити за допомогою ЛАТРу напругу 120 В на затискачах регульованої напруги за показами щитового вольтметра. Увімкнути комп'ютер та запустити на ньому програму керування осцилографом. За допомогою програмного забезпечення перевести осцилограф у режим вимірів та встановити розгортку таким чином, щоб на екрані повністю відображалася 10 ... 15 періодів вимірюваної напруги. Вивести на екран покази вбудованих у програмну оболонку вимірювальних приладів. Зовнішній вигляд головного вікна програмного забезпечення Winoscill цифрового USB-осцилографа марки Oscill подано на рис. 5.5. Часова залежність, показана на ньому представляє собою двопівперіодну випрямлену напругу на вихідних затискачах джерела живлення, яку використовують замість постійної при проведенні відповідних дослідів. Поточні налаштування горизонтальної та вертикальної розгортки складають відповідно 10 мс/под. та 5 В/под. У блоці налаштування каналу CH1 встановлено режим проходження постійної складової вхідного сигналу - DC (відкритий вхід) та усереднення даних від АЦП за інтервал дискретизації - Avg. Вимірювальні прилади викликаються за

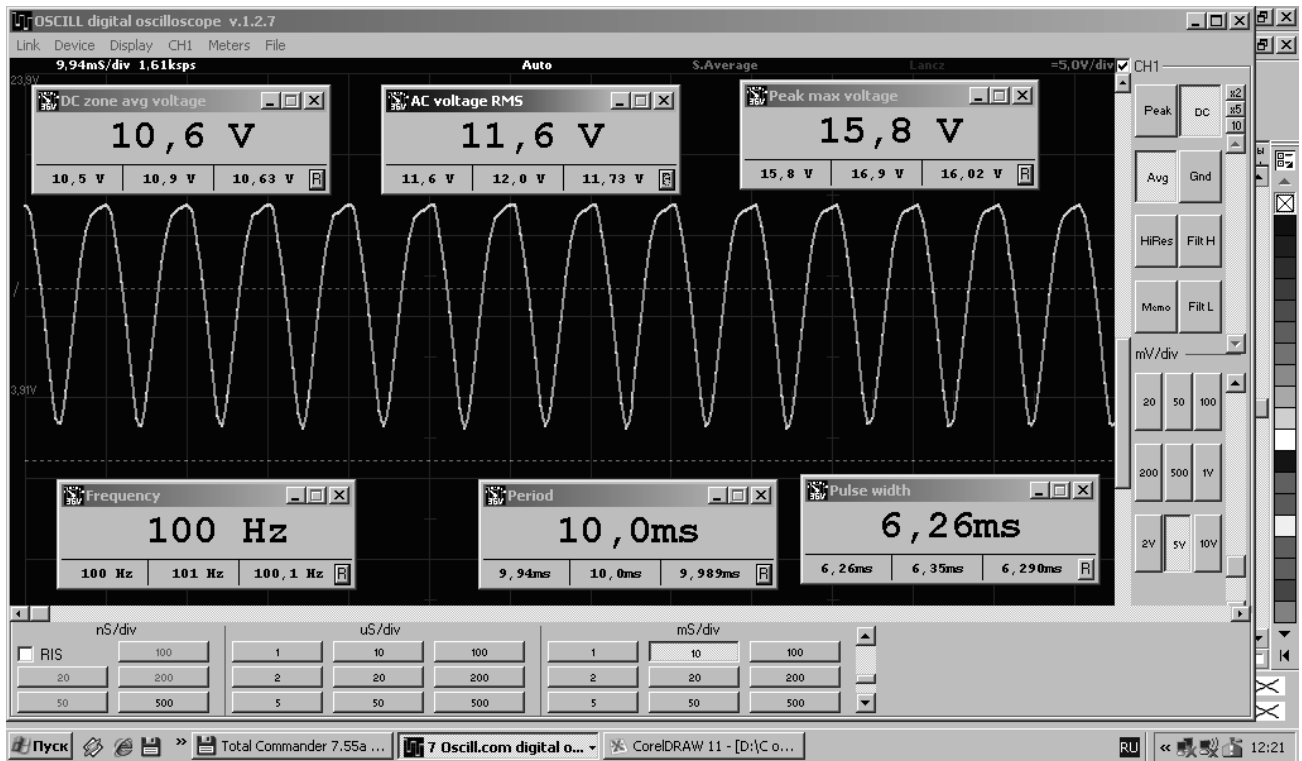


Рисунок 3.5 Зовнішній вигляд екрану з результатами вимірювань

допомогою головного меню розташованого вгорі екрану (опція Meters). Ці прилади наступні.

DC zone avg voltage – вольтметр, який вимірює постійну складову напруги $U^{(0)}$ (її середнє значення у межах області екрану).

AC voltage RMS – вольтметр, який вимірює діюче значення напруги U .

Peak max voltage – вольтметр, який вимірює максимальне значення напруги U_{max} .

Frequency – частотомір, який визначає частоту f , як величину, обернену періоду.

Period – інструмент, який визначає період сигналу T , як середній інтервал між фронтами (спадами) імпульсів напруги.

Pulse width – інструмент, який визначає довжину імпульсу t_{imp} , як інтервал між сусідніми фронтами та спадами імпульсів.

Середні покази приладів за час вимірів (значення у правому нижньому кутку вікна кожного приладу) занести до табл. 5.1. При цьому значення вимірюваної напруги слід помножити на 10 через наявність відповідного щупа-подільника у вимірювальному колі.

Таблиця 3.1 Результати вимірювань електронним осцилографом

Вимірювана величина	$U^{(0)}$	U	U_{max}	f	T	t_{imp}
	В	В	В	Гц	с	с
Середнє за час вимірів згідно показів вбудованого програмного приладу						

4. Встановити розгортку таким чином, щоб три періоди вимірюваної напруги займали увесь екран комп'ютера та приховати усі панелі інструментів у головному вікні програми Winoscill (див. рис. 3.6). Далі утримуючи праву кнопку комп'ютерного маніпулятора вручну виміряти відстань між нижньою штриховою лінією (нульовий рівень) та верхньою штриховою лінією (середнє значення величини) яка представляє собою напругу $U^{(0)}$ у масштабі розгортки. Далі аналогічно виміряти U_{max} , T , $t_{\text{імп.}}$. Частоту f визначити, як $f = \frac{1}{T}$. Точне визначення діючого значення напруги U в ручному режимі ускладнено оскільки потребує великої кількості вимірів. Зберегти осцилограму у вигляді графічного зображення за допомогою опції головного меню File → Save to BMP file.

5. Ознайомитись з можливостями програмного забезпечення осцилографа у режимі аналізатора спектру. Для цього повернути налаштування розгортки осцилографа до встановлених у п. 3 та обрати опцію головного меню Meters → Spectral. В результаті отримуємо екран з частотним спектром вимірюваної напруги (див. рис. 3.7). Цей спектр представлено як у графічній формі так і у вигляді таблиці амплітуд гармонічних складових вимірюваної напруги та їх частот. Вгорі цієї таблиці наведено значення коефіцієнта гармонічних спотворень – THD.

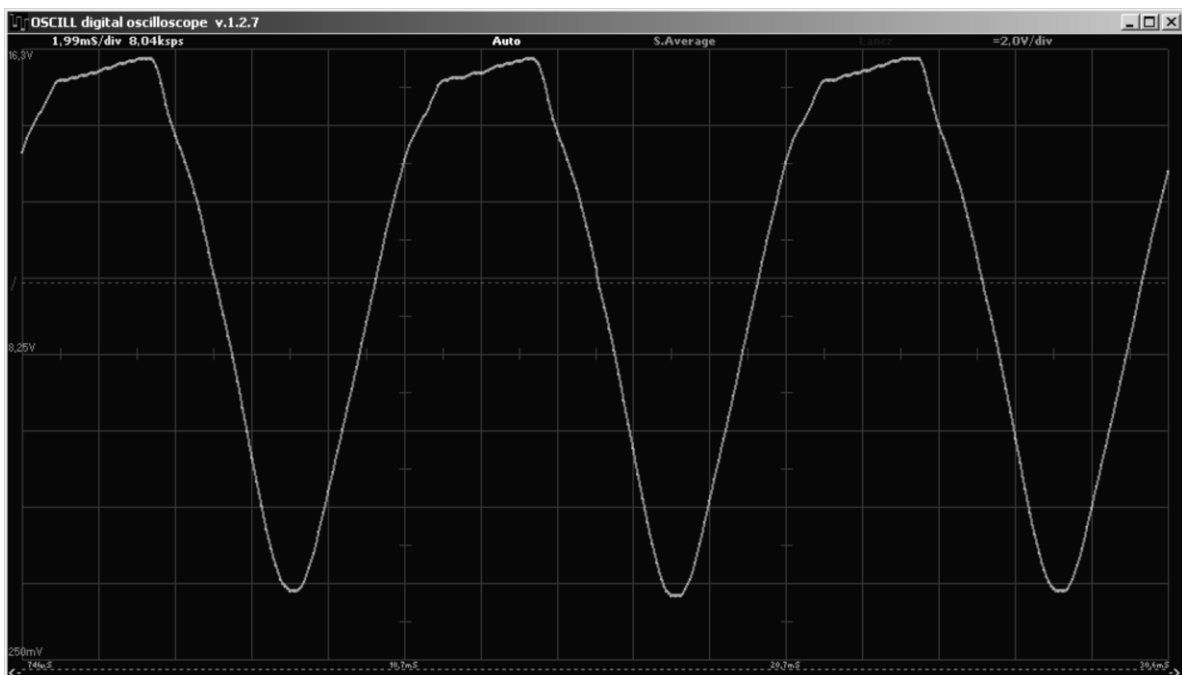


Рисунок 3.6 Приклад осцилограми вихідної напруги випрямляча

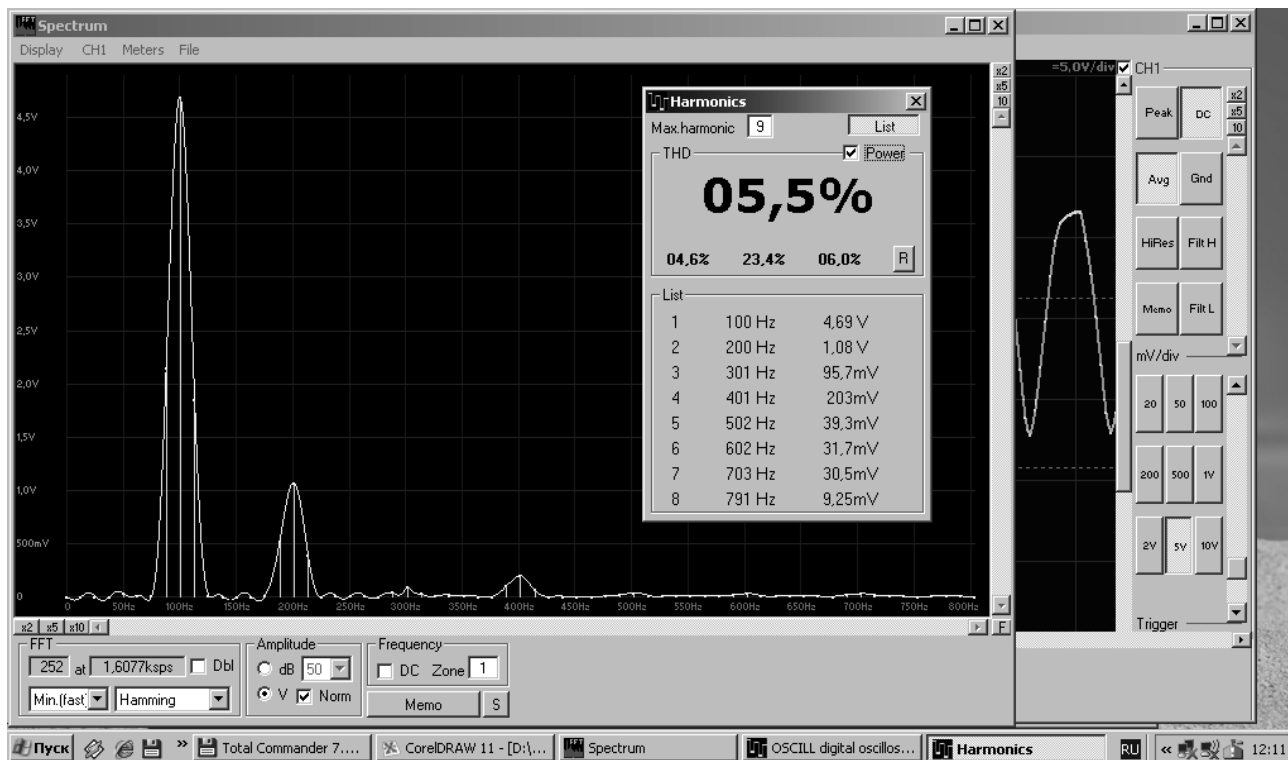


Рисунок 3.7 Приклад частотного спектру вихідної напруги випрямляча

6. Розкласти вхідну двопівперіодну випрямлену напругу в ряд Фур'є (3.1), (3.4) за аналітичними виразами (3.2) – (3.3) або за допомогою системи комп'ютерної математики Mathcad (рис.3.8).

$$\begin{aligned}
 u(t) &= A^{(0)} + B_m^{(1)} \sin \omega t + B_m^{(2)} \sin 2\omega t + \dots + B_m^{(k)} \sin k\omega t + \dots + \\
 &+ C_m^{(1)} \cos \omega t + C_m^{(2)} \cos 2\omega t + \dots + C_m^{(k)} \cos k\omega t + \dots = \\
 &= A^{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} B_m^{(k)} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_m^{(k)} \cos k\omega t = \\
 &= A^{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} (B_m^{(k)} \sin k\omega t + C_m^{(k)} \cos k\omega t), \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

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

$B_m^{(k)}, C_m^{(k)}$ – амплітуда відповідно k -того синусоїдного і косинусоїдного членів ряду;

$\omega = 2\pi/T$ – основна частота (кутова); T – період несинусоїдної функції.

Коефіцієнти $A^{(0)}, B_m^{(k)}, C_m^{(k)}$ ряду визначають за формулами Фур'є:

$$\left. \begin{aligned} A^{(0)} &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d\omega t, \\ B_m^{(k)} &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cdot \sin k\omega t \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot \sin k\omega t \cdot d\omega t, \\ C_m^{(k)} &= \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cdot \cos k\omega t \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cdot \cos k\omega t \cdot d\omega t. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

Після застосування до ряду у формі (1) відомого простого перетворення, що

$$\begin{aligned} B_m^{(k)} \sin k\omega t + C_m^{(k)} \cos k\omega t &= A_m^{(k)} \sin(k\omega t + \psi^{(k)}), \\ \text{де } A_m^{(k)} &= \sqrt{B_m^{(k)2} + C_m^{(k)2}} \quad \text{і} \quad \psi^{(k)} = \arctg \frac{B_m^{(k)}}{C_m^{(k)}}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

ряд (3.1) можна представити у такій іншій формі:

$$\begin{aligned} u(t) &= A^{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} A_m^{(k)} \sin(k\omega t + \psi^{(k)}) = \\ &= A^{(0)} + A_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi^{(1)}) + A_m^{(2)} \sin(2\omega t + \psi^{(2)}) + \dots, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де $A_m^{(1)} \sin(\omega t + \psi^{(1)})$ – основна або перша гармоніка (гармонічна складова);

$A_m^{(1)}$ і $\psi^{(1)}$ – амплітуда та початкова фаза основної гармоніки; усі останні члени виду $A_m^{(k)} \sin(k\omega t + \psi^{(k)})$ при $k > 1$ – вищі гармоніки (гармонічні складові);

$A_m^{(k)}$ та $\psi^{(k)}$ – амплітуда та початкова фаза k -ої гармоніки.

7. Розрахувати середнє та діюче значення вхідної напруги за виразами .

$$U_{\text{cp}} = U^{(0)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d\omega t, \quad (3.5)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2(\omega t) d\omega t}. \quad (3.6)$$

8. Розрахувати амплітуди другої та четвертої гармонік живлячої напруги з використанням виразів (3.1) та (3.2).

9. Розрахувати коефіцієнт нелінійних спотворень (Total Harmonic Distorsions - THD) за виразом .

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=4}^{\infty} \left(\frac{U^{(k)}}{\sqrt{2}}\right)^2}}{U} \cdot 100. \quad (3.7)$$

Розбіжність між виміряними та обчисленими значеннями кожної з величин в табл. 2 обчислено за виразом

$$\gamma \% = \frac{|A_{\text{вим}} - A_{\text{обч}}|}{A_{\text{обч}}} \cdot 100. \quad (3.8)$$

10. Результати вимірювань та розрахунків звести у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 Гармонійний склад вихідної напруги

Електрична величина	U_{\max}	U	$U^{(0)}$	$U_m^{(2)}$	$U_m^{(4)}$	THD
Виміряно						
Обчислено						
Розбіжність						

Приклад розрахунків по величинах представлених в табл. 3.3 виконано в Mathcad і представлено на рис. 3.8.

$$y := \begin{pmatrix} 0 \\ 180 \\ 360 \end{pmatrix} \cdot \frac{\pi}{180}$$

$$u(x) := \begin{cases} 16.02 \cdot \sin(x) & \text{if } y_0 \leq x \leq y_1 \\ -16.02 \cdot \sin(x) & \text{if } y_1 \leq x \leq y_2 \end{cases}$$

$$n := 6 \quad k := 0..n$$

$$C_k := \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} u(x) \cdot e^{-i \cdot k \cdot x} dx \quad B_k := \begin{cases} 0 & \text{if } k = 0 \\ (C_k \cdot 2) & \text{otherwise} \end{cases} \quad A_k := \begin{cases} C_0 & \text{if } k = 0 \\ 0 & \text{if } |C_k| < 0.0001 \\ |B_k| & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{matrix} a_k := \operatorname{Re}(B_k) \\ b_k := -\operatorname{Im}(B_k) \end{matrix}$$

$$\beta_k := \begin{cases} \operatorname{sign}(a_k) \cdot \operatorname{acos}\left(\frac{b_k}{|B_k|}\right) & \text{if } |C_k| > 0.0001 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\psi_k := \begin{cases} 0 & \text{if } |\beta_k| < 0.0001 \\ \left(\beta_k \cdot \frac{180}{\pi}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

k =	A _k =	ψ _k =
0	10.199	0
1	0	0
2	6.799	-90
3	0	0
4	1.36	-90
5	0	0
6	0.583	-90

$$u_n(x) := A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \cdot \sin(k \cdot x + \beta_k)$$

$$\operatorname{RMS} := \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} u(x)^2 dx}$$

$$\operatorname{RMS} = 11.328$$

$$\operatorname{THD} := \frac{\sqrt{\sum_{k=4}^n \left(\frac{A_k}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\operatorname{RMS}} \cdot 100$$

$$\operatorname{THD} = 9.235$$

Рисунок 3.8 Розрахунки гармонік несинусоїдної напруги в середовищі Mathcad

Контрольні запитання

1. Поясніть різницю між інерційним та безінерційним нелінійним елементом.
2. Поясніть механізм виникнення вищих гармонік електричних величин кола при наявності нелінійних безінерційних елементів у ньому.
3. Якими шляхами можна визначити діюче значення несинусоїдної напруги?
4. Що таке ідеальний діод? Як виглядає його вольт-амперна характеристика?
5. Які існують методи розрахунку нелінійних кіл з безінерційними нелінійними елементами?

Література

1. [1], 4.3 - 4.4.
2. [4], 9.5.
3. [5], 6.7.
4. [6], 11.1 – 11.2.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ КОНДЕНСАТОРА ТА КОТУШКИ ЗІ СТАЛЕВИМ ОСЕРДЯМ

I. Мета роботи

Дослідження особливостей процесів, що відбуваються у колі з послідовним з'єднанням конденсатора та котушки зі сталевим осердям у режимі ферорезонансу напруг.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Джерело живлення – розподільчий щит, синусоїдну напругу на затискачах якого можна плавно змінювати від 0 до 220 В.
2. Котушка із замкненим сталевим осердям.
3. Вольтметри електромагнітні $V1, V2$ – 50...250 В.
4. Вольтметр електромагнітний $V3$ – 10...50 В.
5. Амперметр електромагнітний $A1$ – 0,4...2 А.
6. Амперметр електромагнітний A – 1...5 А.
7. Фазометр електродинамічний φ – 5 А, 150 В.

III. Короткі відомості з теорії

Нехай задано електричне коло змінного струму, котре складається з послідовно з'єднаних котушки з феромагнітним осердям (нелінійним дроселем) та ідеального ємнісного елемента C (рис. 4.1). Струм у такому колі та спади напруг

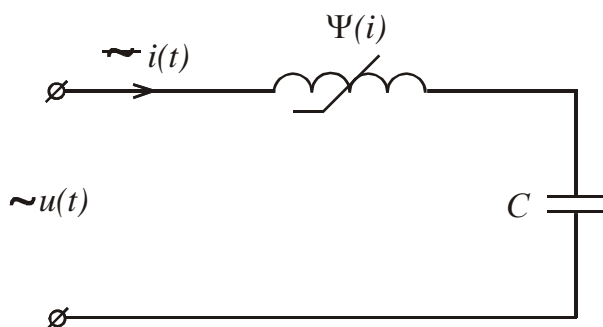


Рисунок 4.1 Принципова схема дослідного кола з ідеальним дроселем

на його елементах є несинусоїдними і тому для подальшого аналізу методами розрахунку кіл однофазного синусоїдного струму замінимо відповідні струм та спади напруг еквівалентними синусоїдами. Окрім цього, оскільки нелінійний дросель є реальним, то він може бути заміщений лінійним резистором R та нелінійним індуктивним елементом. Тоді схема кола рис. 4.1 набуває вигляду схеми кола рис. 4.2, для якої згідно з другим законом Кірхгофа можна записати:

$$\underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = \underline{U}. \quad (10.1)$$

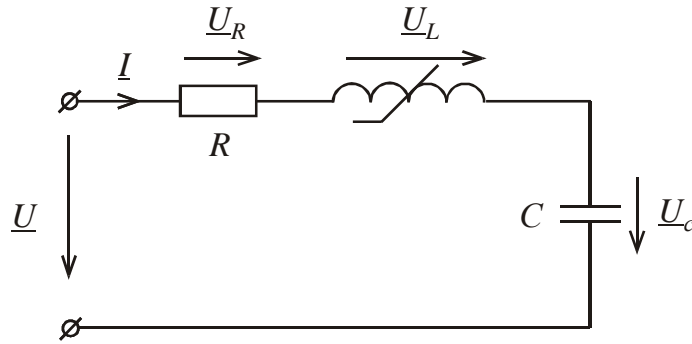


Рисунок 4.2 Принципова схема дослідного кола з реальним дроселем

Кожна складова в (4.1) залежить від струму кола і тому це рівняння можна формально записати у вигляді суми вольт-амперних характеристик (ВАХ) відповідних елементів

$$U_R(I) + U(I) + (-U_C(I)) = U(I), \quad (4.2)$$

де $U(I)$ – результуюча ВАХ або ВАХ усього кола рис. 4.2.

Знак „мінус” перед U_C в (4.2) обумовлений тим, що спади напруги на індуктивності U_L та на ємності U_C знаходяться, як відомо, у протифазі.

Якісний вигляд ВАХ резистора $U_R(I)$, нелінійної індуктивності $U_L(I)$, ємності $U_C(I)$ та всього кола $U(I)$ показано на рис. 4.3. При цьому результуюча ВАХ $U(I)$ має вигляд N – подібної кривої з точками 0-1-2-3-4-5-6-7-0. Такою вона може бути отримана, якщо ВАХ індуктивного та ємнісного елементів перетинаються. Зміна режимів роботи усього кола здійснюється згідно з цією результуючою ВАХ таким чином.

Під час плавного збільшення вхідної напруги U від 0 до U_2 коло рис. 10.2 „працює” на ділянці 0-1-2 (рис. 4.3). При цьому струм I також поступово зростає від 0 до значення I_2 . У разі подальшого збільшення U , навіть на незначну величину ΔU_2 , відбувається стрибкоподібне збільшення струму від I_2 до I_3 . Під час подальшого підвищення напруги U знов відбувається плавне зростання струму від I_3 до деякого значення I_4 згідно ділянці 3-4 ВАХ усього кола.

При зворотній зміні напруги живлення, тобто при зменшенні U до U_6 струм плавно зменшується від I_4 до I_6 згідно ділянці 4-3-5-6 результуючої ВАХ. При подальшому зменшенні U , навіть на незначну величину ΔU_6 , струм знов стрибком зменшується від значення I_6 до I_7 . У подальшому з точки 7 у точку 0 струм плавно змінюється разом з напругою живлення.

Явище, що виникає у колі з послідовним з’єднанням нелінійної індуктивності та лінійної ємності, за якого повільна плавна зміна вхідної змінної напруги призводить до стрибкоподібної зміни струму та перевертання фази між вхідними напругою та струмом, називають явищем ферорезонансу напруг (а іноді і тригерним ефектом). Точку 6 (рис. 4.3), котра відповідає рівно-

сті $U_L = U_C$, називають точкою ферорезонансу.

На кривій результуючої ВАХ $U(I)$ є спадаюча ділянка 2-6, яка є областю нестійких режимів роботи кола. Жодна точка на цій ділянці не може бути експериментально отримана у разі живлення кола рис. 4.2 від джерела напруги, це можливо тільки за умови живлення від джерела заданого струму.

На рис. 4.3 область I є дорезонансною, у ній $U_L > U_C$ і тому вхідна напруга \underline{U} випереджає струм \underline{I} ; цій області відповідає векторна діаграма рис. 4.4, а. Область II є післярезонансною, у ній $U_L < U_C$ і тому \underline{U} відстає від \underline{I} ; цій області відповідає векторна діаграма рис. 4.4, б.

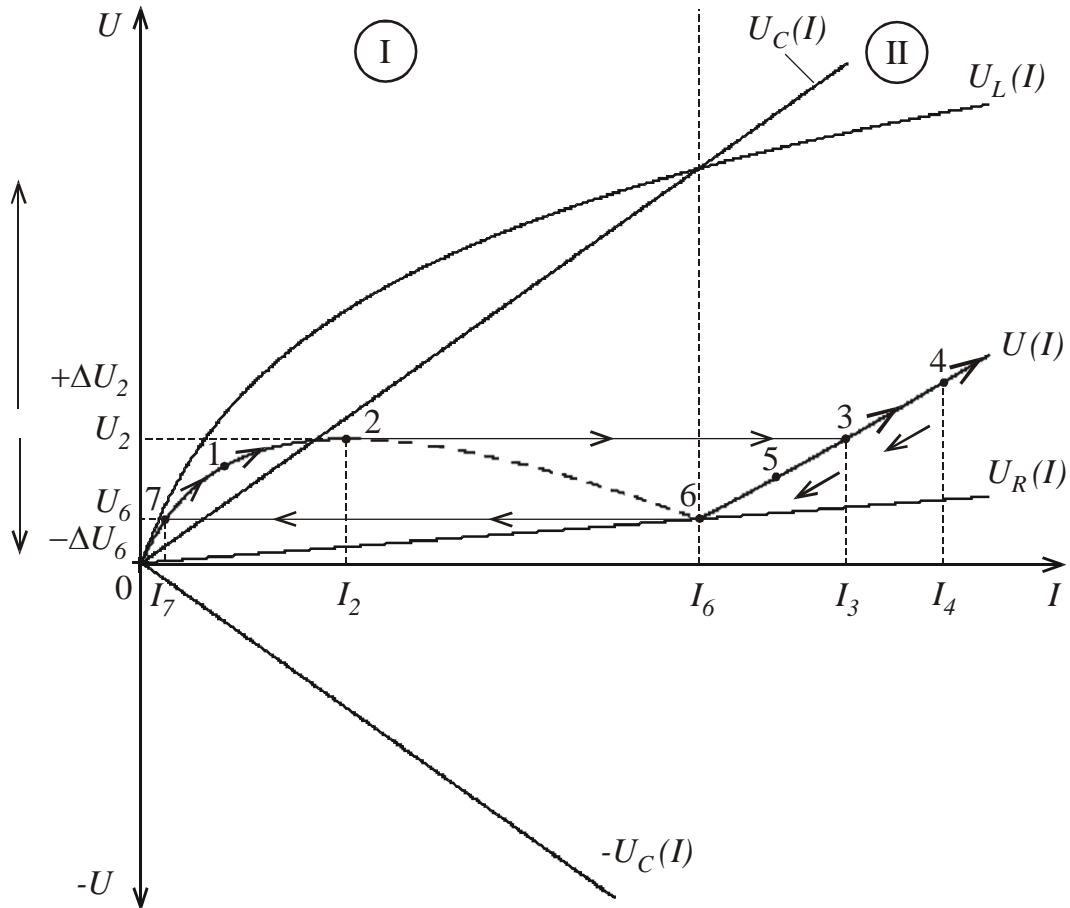


Рисунок 4.3 Вольт-амперні характеристики досліджуваного кола та його елементів

З аналізу векторних діаграм витікає, що в режимі ферорезонансу відбувається зміна фази між \underline{U} та \underline{I} на зворотну, тобто так зване перевертання фази.

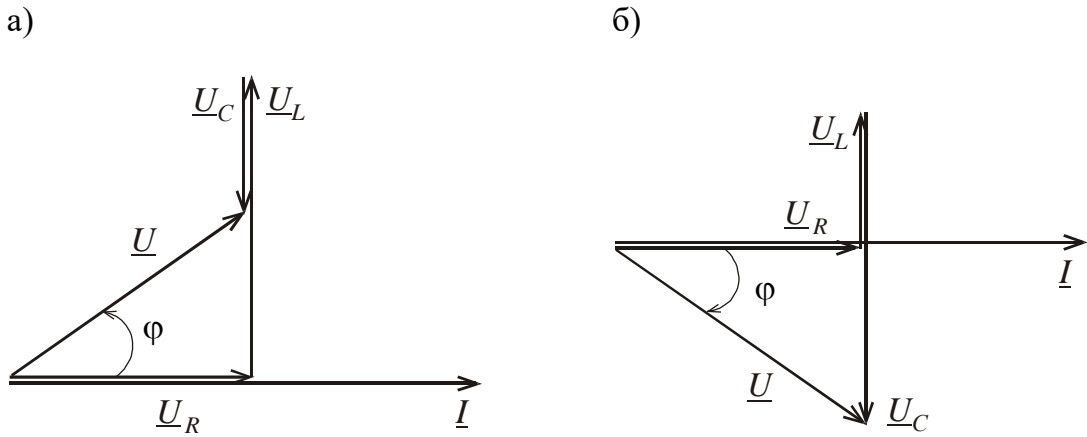


Рисунок 4.4 Векторна діаграма для еквівалентних синусоїд величин кола рис. 4.2

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Скласти коло рис. 4.5. Як котушку індуктивності використовувати лише одну секцію. Межі вимірювальних приладів вказано у розділі „Необхідні прилади”. При цьому в подальшому у процесі виконання роботи ключ S , що шунтує амперметр $A1$, повинен бути завжди замкнений, окрім випадків, коли амперметр A на $5A$ показує струм менший, ніж $1 A$. Тільки тоді необхідно розімкнути ключ S , визначити струм за амперметром $A1$ і після цього знов замкнути ключ.

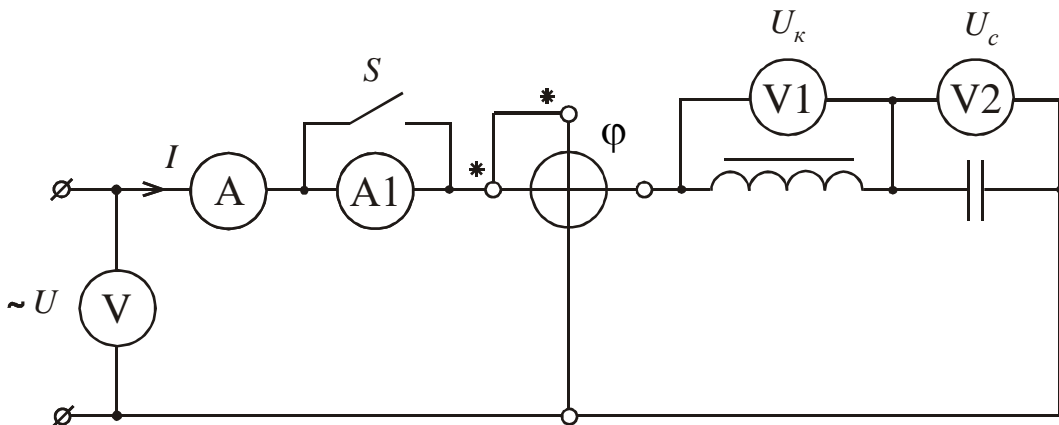


Рисунок 4.5 Схема для досліджень у ферорезонансному колі

2. Виконати так звану настройку кола лабораторної роботи. Для цього за допомогою викладача підібрати ємність конденсатора, за якої струм під час стрибка змінюється не більше ніж на $3A$. Для цього після кожного встановлення ємності конденсатора необхідно поступово збільшувати вхідну напругу від нуля до напруги стрибка струму. При цьому необхідно визначити, за якого значення вхідної напруги відбувається цей стрибок, тим самим попередньо визначають точку 2, рис. 4.3.

3. Далі встановлюють режими кола у кожній точці (рис. 4.3). Значення вхідної напруги в точці 1 встановлюють приблизно на 30% меншим, ніж у точці 2. Результати вимірів слід записати у перший рядок табл. 4.1.

4. Повільно підвищуючи напругу і не припускаючи стрибка струму, встановити режим, найбільш близький до точки 2, і записати показання приладів у рядок 2 табл. 4.1. Якщо вольтметр V1 або V2 показує напругу, меншу ніж 50 В, то напругу на клеммах цього вольтметра слід виміряти вольтметром V3 за допомогою щупів.

5. Плавно підняти вхідну напругу на величину, не більшу, ніж 1 В, здійснивши режим стрибка струму; записати показання приладів до рядка 3 табл. 4.1.

6. Підвищити вхідну напругу до граничного значення одного з вольтметрів; записати показання приладів до рядка 4 таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Результати експериментальних досліджень у колі рис. 4.5

Номер точок	U , В	I , А	U_C , В	U_K , В	φ , град.	Примітка
1						Ділянка 0-1 під час підвищення напруги
2						В момент перед стрибком струму I_2
3						В момент після стрибка струму до I_3 під час підвищення напруги
4						Ділянка 3-4 (рис. 3).
5						Ділянка 3-5-6 під час зниження напруги
6						В момент перед стрибком струму I_6 під час зниження U
7						У момент після стрибка струму до I_7

7. Плавно знижуючи вхідну напругу, встановити таке її значення, за якого кут зсуву фаз між \underline{U} та \underline{I} набуває значення, що приблизно дорівнює $4^\circ - 6^\circ$; при цьому слід не допустити стрибка струму з точки 6 в точку 7. Визначивши таким чином точку 6, розташувати точку 5 між режимами в точках 3 та 6; занести показання приладів у рядок 5 табл. 4.1.

8. Повільно зменшуючи далі вхідну напругу, здійснити режим кола стрибка струму з точки 6 до точки 7. При цьому стрілка фазометра буде повільно та довго змінювати своє положення, тому що струм кола є малим. Таким чином вимірювання фази стає невизначеним (неможливим). Показання решти приладів занести до рядка 7 табл. 4.1.

9. Скласти схему рис. 4.6 для зняття ВАХ котушки індуктивності; показання вольтметра та амперметра занести до табл. 4.2.

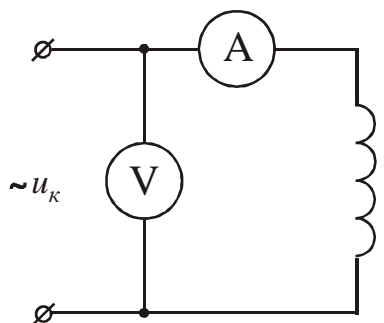


Рисунок 4.6 Схема для експериментального отримання ВАХ нелінійного дроселя

Таблиця 4.2 Результати експериментального отримання ВАХ у колі рис. 4.5

$U_K, \text{В}$	0					
$I, \text{А}$	0	1	2	3	4	5

10. За даними вимірів побудувати графіки, подібні до рис. 4.3. Для цього за даними табл. 4.2 побудувати ВАХ котушки індуктивності. За значеннями U та I рядка 6 табл. 1 відкласти точку 6 на площині. З'єднавши її з початком координат, отримуємо ВАХ $U_R(I)$. За значеннями U_C та I рядка 4 табл. 4.1 відкласти точку 4 на площині. З'єднавши її з початком координат, отримуємо ВАХ $U_C(I)$. За значеннями U та I рядків 1, 2 та 7 відкласти відповідні точки. З'єднавши ці точки плавною кривою з початком координат, отримаємо одну з віток N- подібної ВАХ. З'єднавши плавною (без зламу у точці 2) кривою точку 2 з точкою 6, отримаємо падаючу ділянку 2-6 N- подібної ВАХ. Розташувати на отриманому графіку усі літерні позначення та нумерацію точок (згідно з рис. 4.3).

11. Побудувати векторні діаграми, подібні рис. 4.4, для до- та післярезонансних областей за однакових значень вхідної напруги.

Контрольні запитання

1. В яких колах є можливим режим ферорезонансу напруг?
2. Який режим роботи кола називають ферорезонансним?
3. Чи можливо за будь-якої ємності зміною вхідної напруги досягти ферорезонансного режиму?
4. Як і чому змінюється індуктивність котушки зі сталевим осердям під час збільшення струму в котушці?
5. Як можна експериментально отримати вольт-амперну характеристику кола з плавною зміною струму (без стрибка)?
6. Як змінюється фаза між \underline{U} та \underline{I} у досліджуваному колі?

Література

1. [1], 4.8.
2. [3], 6.3.3.
3. [4], 10.7.
4. [5], 6.10.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ

I. Мета роботи

Дослідження явища стабілізації напруги у послідовному ферорезонансному колі. Отримання релейних характеристик елементів кола.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Джерело живлення – розподільчий щит, синусоїдну напругу на затискачах якого можна плавно змінювати від 0 до 220 В.
2. Рубильник S1.
3. Котушка із розімкненим сталевим осердям L1.
4. Котушка із замкненим сталевим осердям L2.
5. Батарея конденсаторів С.
6. Реостати R_n – 200 Ом, 1200 Ом.
7. Вольтметри електромагнітні V1, V2, V3 – 40...250 В.
8. Амперметри електромагнітні A1, A2 – 0,4...2 А.
9. Амперметри електромагнітні A, A3, A4 – 1...5 А.
10. Фазометр електродинамічний φ – 5 А, 150 В.

III. Короткі відомості з теорії

Згідно з прийнятою електротехнічною термінологією, яка зокрема прийнята при вивченні матеріалу таких спеціальних дисциплін як «Електричні апарати» або «Релейний захист», якщо при певному значенні вхідної величини якогось пристрою має місце стрибкоподібна зміна вихідної величини, то кажуть, що даний пристрій володіє релейними властивостями. Зокрема у тому числі і коло рис.5.1 може розглядатись як безконтактне феромагнітне реле, вхідною величиною якого служить напруга U джерела живлення; а вихідною – одна із величин: I , U_L , U_C . Як детально показано у матеріалі лабораторної роботи №4, коли вхідна напруга U перевищить значення U_1 , реле “спрацює” і вихідна величина зросте стрибком (рис.5.2). Напруга U_3 – це напруга “відпускання” реле. Подібні ферорезонансні реле (тригери) застосовують у пристроях автоматики.

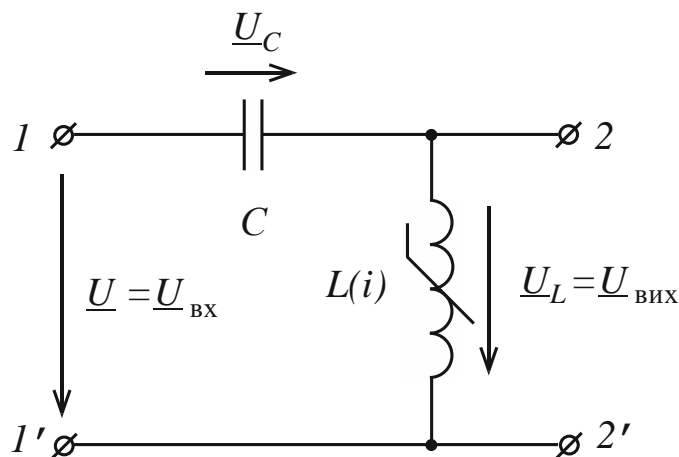


Рисунок 5.1 Принципова схема послідовного кола зі стабілізуючим ефектом

Окрім зазначених реле явище ферорезонансу лежить в основі роботи також пристроїв, які називають ферорезонансними стабілізаторами напруги і під якими розуміють чотириполюсники, в яких значне змінювання напруги на вході $\Delta U_{\text{ВХ}}$ викликає лише незначну зміну напруги на виході $\Delta U_{\text{ВИХ}}$. Дійсно, якщо напругу U джерела живлення вважати вхідною, а напругу на котушці U_L вихідною, то, як показано на рис. 5.1, $\Delta U_L = \Delta U_{\text{ВИХ}} \ll \Delta U_{\text{ВХ}} = \Delta U$. Ефект стабілізації спостерігається, коли напруга джерела $U > U_1$. При цьому осердя нелінійного дроселя (рис.5.1) насичено достатньо глибоко, що, власне, і забезпечує невеликі зміни напруги U_L на котушці. Пристрій, на якому потрібно мати стабілізовану напругу, вмикають до затискачів 2–2' паралельно дроселю (рис. 5.1). Для отримання ефекту стабілізації напруги $\Delta U_{\text{ВИХ}}$ в коло замість конденсатора C можна увімкнути і лінійний дросель, або якийсь інший елемент з активним чи реактивним опором, однак ефект стабілізації у цих випадках буде менше. Вмикання приймача до затискачів 2–2' (рис. 5.1) утворює вітку, що паралельна нелінійному дроселю, в результаті чого струм у котушці дроселя зменшується і взагалі згладжується нелінійність кола, що призводить до зниження коефіцієнта стабілізації у порівнянні з режимом холостого ходу стабілізатора.

Схеми стабілізаторів напруги, які застосовують у практиці, дещо складніші, ніж схема рис. 5.1, бо остання не забезпечує задовільних робочих характеристик стабілізатора.

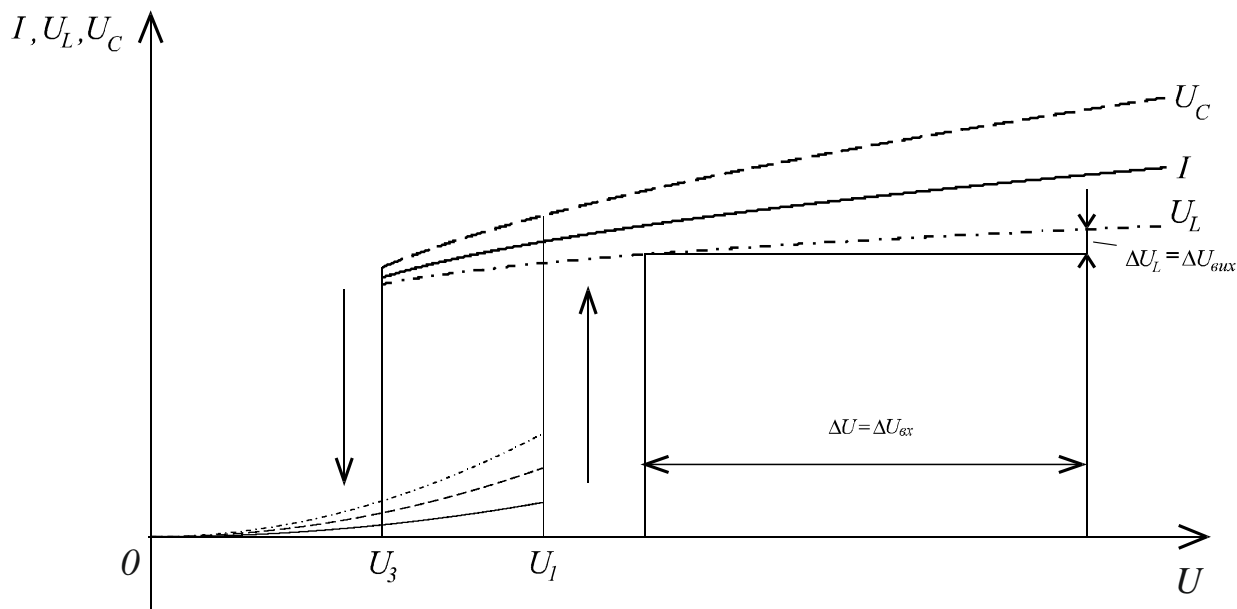


Рисунок 5.2 Релейні характеристики кола рис. 5.1

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1. Скласти схему рис. 5.3 і змінюючи значення вхідної напруги експериментально отримати ВАХ котушки індуктивності із замкненим сталевим осердям; показання вольтметра та амперметра при цьому занести до табл. 5.1.

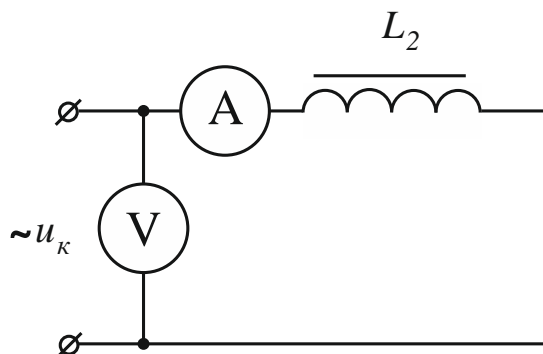


Рисунок 5.3 Схема для експериментального отримання ВАХ нелінійного дрoселя

Таблиця 5.1 ВАХ котушки із замкненим сталевим осердям

$U_{L2}, \text{В}$	0					
$I, \text{А}$	0	1	2	3	4	5

2. Скласти коло рис. 5.4 найпростішого стабілізатора напруги з послідовним з'єднанням конденсатора C і котушки із замкненим сталевим осердям L_2 .

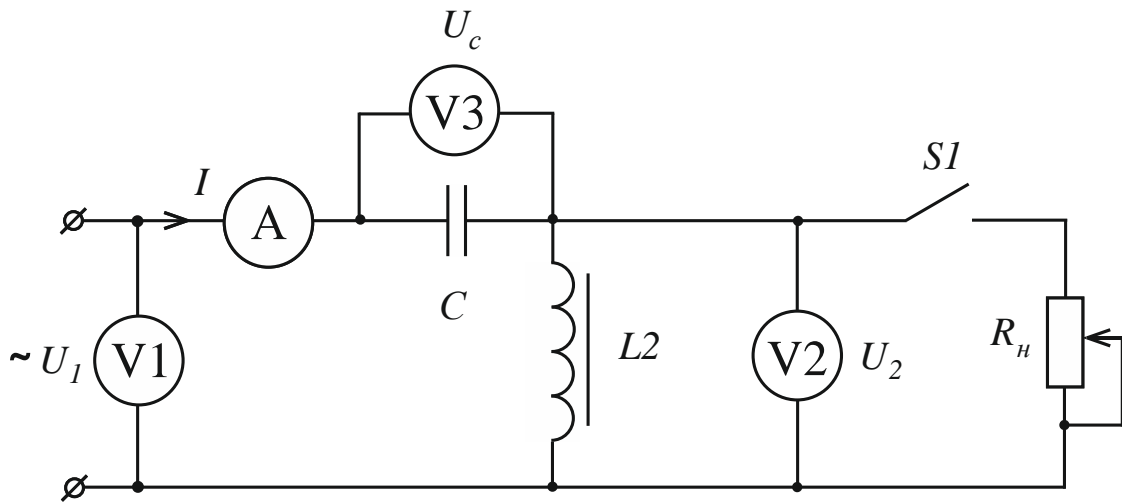


Рисунок 5.4 Схема найпростішого стабілізатора напруги

3. Виконати попереднє визначення потрібної ємності конденсатора з тих міркувань, щоб у режимі після характерного стрибка струму під час підвищення напруги струм у колі не перевищував свого номінального значення. Встановити визначене значення ємності у батареї конденсаторів C .

4. Увімкнути схему кола рис. 5.4 при відключеному рубильнику $S1$. Плавно підвищуючи напругу на вході кола переконатися у наявності тригерного ефекту (стрибка струму) у ферорезонансному колі. Занести покази приладів під час плавного підвищення а потім зниження напруги U_1 на ділянці стабілізації характеристики $U_1(I)$ до табл. 5.2.

5. Повторити виміри при підключеному навантаженні (рубильник $S1$ замкнено) Результати вимірювань занести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2 Результати експериментальних досліджень у колі рис. 5.4

Режим	№ вим.	U_1 , В	U_2 , В	U_C , В	I , А
Холостий хід $R_H = \infty$	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
Режим навантаження $R_H = 200 \text{ Ом}$	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				

6. Побудувати характеристики $U_C(I)$, $U_2(I)$, $U_1(I)$ при $R_H = \infty$ (холос-

тий хід) а також $U_2(U_1)$ при $R_H = \infty$ (холостий хід) та $R_H \neq \infty$ (навантажувальний режим).

7. Скласти коло удосконаленого стабілізатора напруги відповідно до схеми рис. 5.5.

8. Зарєєструвати покази приладів під час підвищення а також зниження напруги U_1 в режимі холостого ходу (рубильник SI розімкнено). Результати вимірювань занести до табл. 5.3.

Таблиця 5.3 Результати вимірювань у схемі рис. 5.4 у режимі холостого ходу

№ п/п	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_{L1}, В$	$I_1, А$	$I_{L2}, А$	$I_C, А$	$I_H, А$

9. Повторити вимірювання напруг U_1 та U_2 при підключеному навантаженні R_H (рубильник SI замкнено). Результати вимірювань занести до табл. 5.4.

Таблиця 5.4 Результати вимірювань у схемі рис. 5.4 у режимі навантаження

$U_1, В$							
$U_2, В$							

10. За даними вимірів побудувати залежності $U_{L1}(I_1)$, $U_2(I_C)$, $U_2(I_{L2})$, $U_2(I_1)$, $U_1(I_1)$. Згідно із вказівками викладача побудувати для порівняння наближену характеристику $U_1'(I_1)$ використовуючи для цього характеристики окремих елементів кола рис. 5.4. Показати на відповідній залежності зміну напруги на вході стабілізатора (ΔU_1) і відповідну їй зміну напруги на виході стабілізатора (ΔU_2) на ділянці що відповідає ефекту стабілізації.

11. Побудувати характеристику $U_2(U_1)$ режимах холостого ходу та навантаження на ділянці прояву ефекту стабілізації.

12. За результатами вимірів визначити коефіцієнти стабілізації досліджуваних схем рис. 5.3 та рис. 5.4. у відповідності із виразом

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вих} / U_{вих}}, \quad (5.1)$$

де $U_{вх}$, $U_{вих}$ - номінальні діючі значення напруг відповідно на вході і виході стабілізатора у якості яких можуть бути використані значення відповідних напруг у режимі холостого ходу;

$\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вих}$ - значення зміни вхідної та вихідної напруги на границі ділянки стабілізації.

13. На основі проведених досліджень зробити висновки про переваги та недоліки досліджуваних схем стабілізаторів напруги.

Контрольні запитання

1. Які пристрої називають стабілізаторами напруги?
2. Чи можливо досягти стабілізуючого ефекту у колі яке містить лише лінійні елементи? Відповідь обґрунтуйте.
3. У чому полягає сутність тригерного ефекту у досліджуваних колах?
4. Чому у якості лінійного елементу стабілізатора доцільним є використання саме ємнісного елемента?
5. Яким чином кількісно характеризують стабілізуючі властивості стабілізаторів напруги?
6. Що розуміють під релейними характеристиками ферорезонансного стабілізатора напруги?

Література

1. [1], 4.8.
2. [3], 6.3.3.
3. [4], 10.7.
4. [6], 11.5.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У НЕРОЗГАЛУЖЕНОМУ НЕЛІНІЙНОМУ КОЛІ

I. Мета роботи

Порівняльне дослідження перехідних процесів у колі під час заряджання конденсатора через лінійний та нелінійний резистивні елементи постійною напругою.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Мікроамперметр магнітоелектричний μA , $0 \dots 200 \text{ мкА}$.
2. Вольтметр електронний V , $0 \dots 150 \text{ В}$.
3. Батарея конденсаторів C , $0 \dots 60 \text{ мкФ}$.
4. Діоди типу Д9Е або Д9Д НР.
5. Лінійний резистор ЛР (R), $400 \dots 1200 \text{ кОм}$.
6. Однополюсний рубильник S.
7. Електронний секундомір.

III. Короткі відомості з теорії

Перехідним процесам, які мають місце в нелінійних колах притаманний ряд суттєвих відмінностей від перехідних процесів у лінійних колах; основні з яких наступні.

1. Будь-яка перехідна величина довільного нелінійного кола не може бути представлена як сума усталеної та вільної складових на відміну від лінійних кіл, оскільки принцип накладання у цьому випадку є незастосовуваним.

2. Для заданого лінійного кола існує i є однаковою для усіх перехідних величин постійна часу τ , у той же час як у нелінійному колі величина i і знак швидкості зміни розглядуваної перехідної величини у різні проміжки часу можуть бути різні і отже одного значення τ практично не існує.

3. Нелінійність характеристики навіть одного із елементів кола може обумовити багаторазове, нехарактерне для аналогічних лінійних кіл, перевищення миттєвих значень величин напруг і струмів на елементах кола в перехідному режимі у порівнянні із усталеним режимом.

4. Якщо в лінійних колах увімкнення джерела постійної чи синусоїдної ЕРС супроводжується деяким загасаючим перехідним процесом, що переходить в усталений режим, частота якого дорівнює частоті напруги джерела, то в нелінійних колах перехідний процес може призвести до виникнення коливань з частотою, що відмінна від частоти напруги джерела. Такі коливання називають автоколиваннями.

5. В залежності від джерел, що діють у нелінійному колі, розрахунки перехідних процесів різні за складністю. Розрахунок кіл з постійними ЕРС (чи струмами) значно простіший, ніж кіл зі змінними ЕРС. Часто в нелінійних колах з джерелами змінних напруг (чи струмів) і усталений режим доцільно розраховувати як ряд перехідних процесів, що послідовно виникають у даному колі при порівняно різких змінах параметрів нелінійних елементів.

6. У колах з зосередженими параметрами енергія електричного поля в конденсаторах визначається їх зарядом Q , а енергія магнітного поля в котушках індуктивності – їх поточечепленням Ψ . В лінійних колах ці величини пропорційні відповідно напрузі u_C ($Q = C u_C$) і струму i_L ($\Psi = L i_L$). Енергія не може миттєво змінитись на кінцеву величину, звідки витікає, що не можуть стрибкоподібно змінюватись як Q та Ψ , так і u_C та i_L . Натомість у нелінійних колах залежності $Q(u_C)$ та $\Psi(i_L)$ є нелінійними і тому для визначення початкових умов перехідних величин потрібно користуватися узагальненими законами комутації.

7. Перехідні процеси в нелінійних колах описують нелінійними диференціальними рівняннями, для розв'язання яких у математиці не існує загальних методів. Для кожної конкретної задачі розрахунку перехідних процесів треба підбирати свій найбільш ефективний спосіб, що обумовило розробку великої кількості аналітичних, графічних та чисельних методів.

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1 Скласти коло (рис. 6.1).

2. Експериментально отримати ВАХ нелінійного елемента. Для цього у

схемі рис 6.1 рубильник S замкнути, вольтметр V підключити на вхід кола, а між точками A та B підключити нелінійний резистор $НР$. Збільшуючи напругу джерела живлення послідовно встановити у колі значення струму вказані у табл. 6.1 та записати покази вольтметра при цих значеннях струму у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 ВАХ нелінійного елемента кола рис. 6.1

$U, В$	0										
$I, мкА$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200

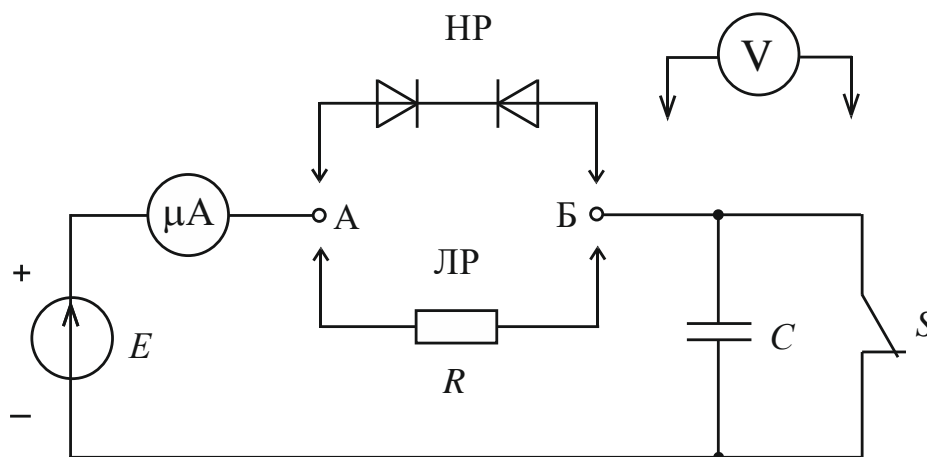


Рисунок 6.1. Схема експериментальних досліджень

3. За даними табл. 6.1 побудувати залежність струму від напруги на нелінійному елементі (АВХ) аналогічно до рис 6.2.

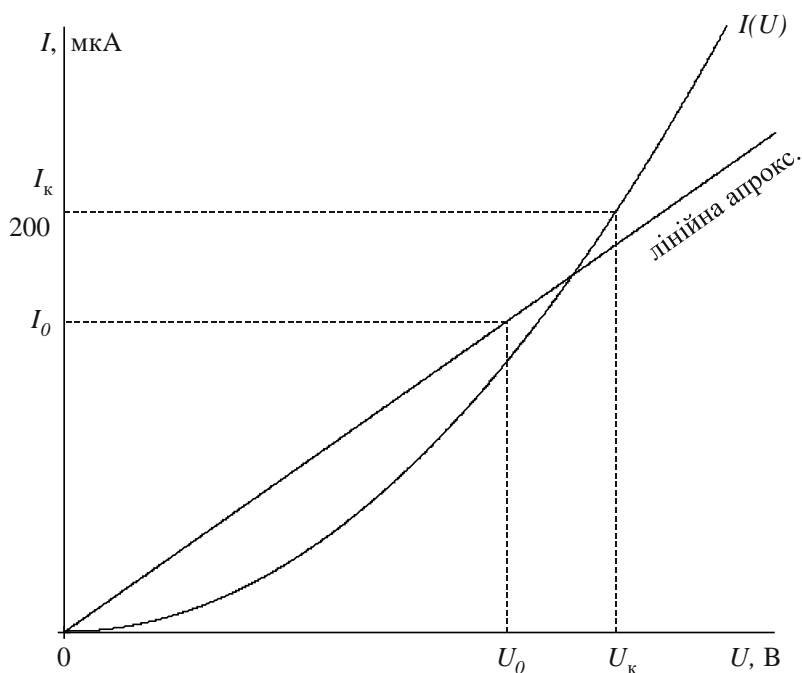


Рисунок 6.2 АВХ нелінійного елемента кола рис. 6.1 та її лінійна апроксимація

4. Виконати лінійну апроксимацію отриманої нелінійної характеристики і визначити відповідний до неї опір лінійного резистора за виразом

$$R_{\text{лр}} = \frac{U_0}{I_0}, \quad (6.1)$$

де U_0, I_0 - координати обраної точки на графіку лінеаризованої характеристики.;

5. Провести вимірювання струму кола і напруги на конденсаторі у процесі його заряджання через нелінійний та лінійний резистивний елементи. З цією метою у колі рис. 6.1 між точками А та Б підключити нелінійний а потім лінійний резистор із опором, який попередньо було визначено у п.4. Перехідний процес у колі запустити розмиканням рубильника S після чого зареєструвати покази мікромаперметра у моменти часу вказані у табл. 6.2. В подальшому підключити вольтметр паралельно конденсатору і зареєструвати напругу на конденсаторі у ті ж моменти часу. Результати вимірювань занести до табл. 6.2.

6. Розрахувати миттєві значення струму у нелінійному колі а також напруги на конденсаторі за формулами

$$i = K \cdot \left(\frac{C \cdot E}{K \cdot E \cdot t + C} \right)^2, \quad (6.2)$$

Таблиця 6.2. Результати вимірювань та розрахунків у колі рис. 6.1

$t, \text{с}$	Виміряно				Обчислено			
	Коло з ЛР		Коло з НР					
	$i, \text{мкА}$	i/i_{max}	$i, \text{мкА}$	i/i_{max}	$u_c, \text{В}$	$i, \text{мкА}$	i/i_{max}	$u_c, \text{В}$
0								
5								
10								
20								
40								
60								

$$u_c = E - \frac{C \cdot E}{K \cdot E \cdot t + C}. \quad (6.3)$$

Вирази (6.2) та (6.3) отримано за методом аналітичної апроксимації за умови, що характеристику нелінійного резистора апроксимовано виразом $i = K \cdot U^2$.

Коефіцієнт K визначають за формулою

$$K = \frac{I_K}{U_K^2}. \quad (6.4)$$

Значення I_K та U_K показано на рис. 6.2.

Підставляючи у вирази (6.2) та (6.3) значення моментів часу вказані у табл. 6.2 заповнити розділ «Обчислено» цієї таблиці.

7. За результатами вимірювань та обчислень наведених у табл. 6.2 побудувати графіки $i(t)$ та $u_c(t)$ у перехідному режимі.

Контрольні запитання

1. Чим перехідні процеси у нелінійних колах відрізняються від перехідних процесів у лінійних системах? Сформулюйте основні відмінності.
2. Як виконати лінійну апроксимацію нелінійного резистора? У яких випадках зробити таку апроксимацію неможливо?
3. З якою метою у схемі рис. 6.1 застосовано зустрічне включення діодів?
4. Чим відрізняються лінійна, кусково-лінійна та аналітична апроксимація?
5. У чому полягає сутність методу аналітичної апроксимації для розрахунку перехідних процесів? Як з його допомогою розрахувати коло рис. 6.1?
6. Чому під час виконання даної роботи є небажаним підключення вольтметра паралельно конденсатору під час вимірювань струму у колі?

Література

1. [1], 5.1, 5.4.
2. [4], 9.7.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗГАЛУЖЕНОМУ НЕЛІНІЙНОМУ КОЛІ RC

I. Мета роботи

Вивчення особливостей форми кривої перехідної напруги на конденсаторі у процесі його заряджання і розряджання в залежності від параметрів кола при дії синусоїдної вхідної напруги. Експериментальне дослідження тривалості перехідного процесу під час розряджання конденсатора.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Звуковий генератор ЗГ.
2. Електронний осцилограф двопроменевий ЕО.
3. Напівпровідниковий діод VD.
4. Магазин опорів P33 R.
5. Магазин ємностей С.

III. Короткі відомості з теорії

Одним із широко застосованих у перетворювальній техніці розгалужених

кіл з нелінійним елементом є коло однопівперіодного випрямляча рис. 7.1 у якому активне навантаження R отримує живлення через випрямний діод VD із додатково встановленим у якості найпростішого фільтру конденсатором C , який заряджається першу чверть періоду живлячої синусоїдної напруги $u_{вх}$ (рис. 7.2) а потім розряджається через навантаження R решту періоду, збільшуючи при цьому середнє значення вихідної напруги на навантаженні u_n . Таким чином перехідні процеси заряду та розряду конденсатора повторюються із початком наступного періоду живлячої напруги і з точки зору повторюваності можуть розглядатися як єдиний процес подібний до усталеного (квазіусталений процес).

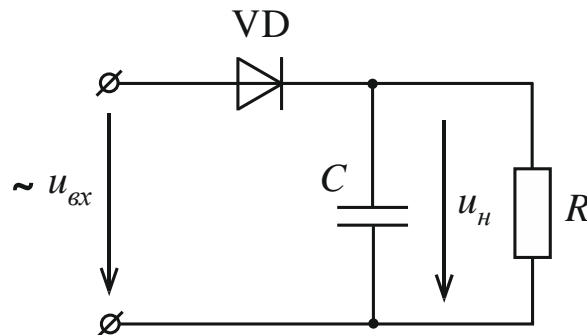


Рисунок 7.1. Дослідна схема кола однопівперіодного випрямляча

Математично зазначений процес у колі рис. 7.1 може бути описаний за допомогою диференціальних рівнянь за законами Кірхгофа складених окремо для режиму заряду та розряду конденсатора. Якщо враховувати нелінійність характеристики діода при подачі напруги на нього напруги у прямому напрямку зазначена система рівнянь може бути зведена до нелінійного диференціального рівняння першого порядку. Одним із аналітичних методів розв'язування таких рівнянь є метод кусково-лінійної апроксимації. За цим методом характеристика нелінійного елемента замінюється відрізками прямих ліній (ламаною лінією, рис. 7.3), рівняння яких підставляються в нелінійні диференціальні рівняння, які описують перехідний процес. При цьому системі вихідних нелінійних відповідає сукупність систем лінійних диференціальних рівнянь, розв'язання яких може бути знайдено відомими методами (класичний, операторний метод, тощо). Постійні інтегрування, які є складовою частиною розв'язку системи лінійних диференціальних рівнянь, визначаються шляхом узгодження розв'язків, отриманих на суміжних лінійних ділянках.

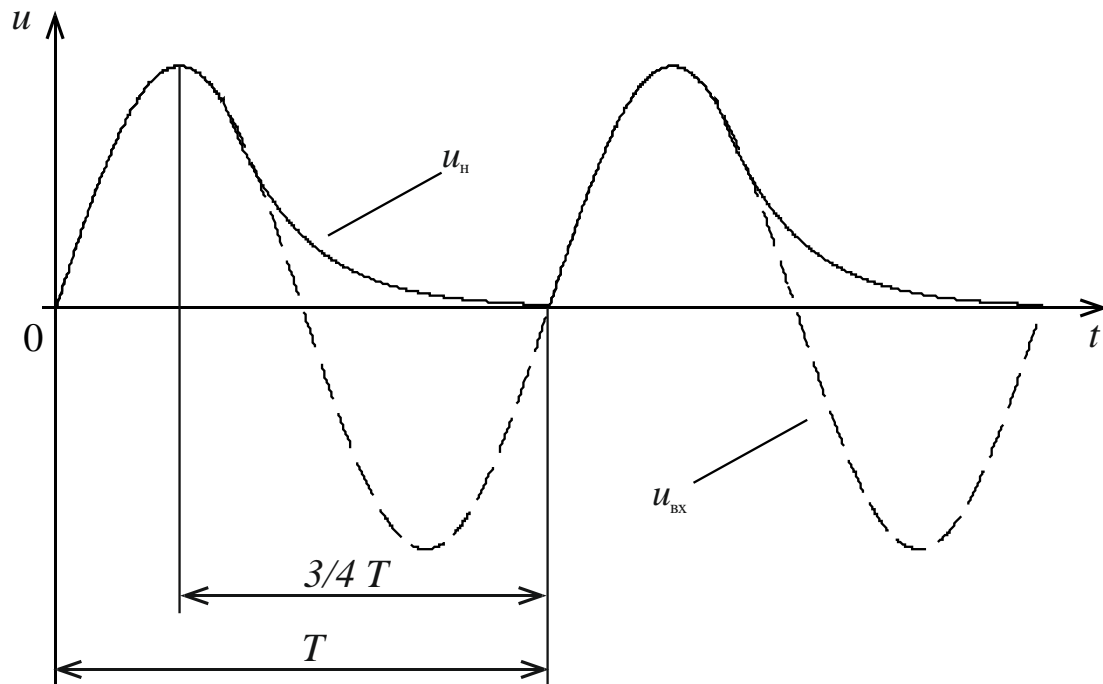


Рисунок 7.2. Загальний вигляд величини напруги на навантаженні у колі рис. 7.1

Одночасно, якщо знехтувати наявністю неосновних носіїв заряду у шарах напівпровідника, можна вважати, що при подачі на діод зворотної напруги він зовсім не пропускає електричний струм і тому коло розряду конденсатора містить виключно лінійні елементи (R та C). Відповідно диференціальне рівняння, що описує процес розрядження конденсатора на протязі зворотного півперіоду живлячої напруги буде лінійним. Таким чином, враховуючи цей факт, а також лінеаризацію характеристики нелінійного елемента можна принаймні оцінити тривалість процесу розрядження конденсатора за допомогою постійної часу ($\tau = RC$), хоча у загальному випадку для нелінійних кіл подібне поняття не є застосовуваним. Проте з практичних у схемі однопівперіодного випрямлення рис 7.1 є дуже важливим, по-перше, мати хоча б наближений вираз, який пов'язує тривалість перехідного процесу із параметрами кола розряду для коректного підбору потрібної величини ємності конденсатора C , а по-друге розуміти наскільки точним є згаданий наближений вираз.

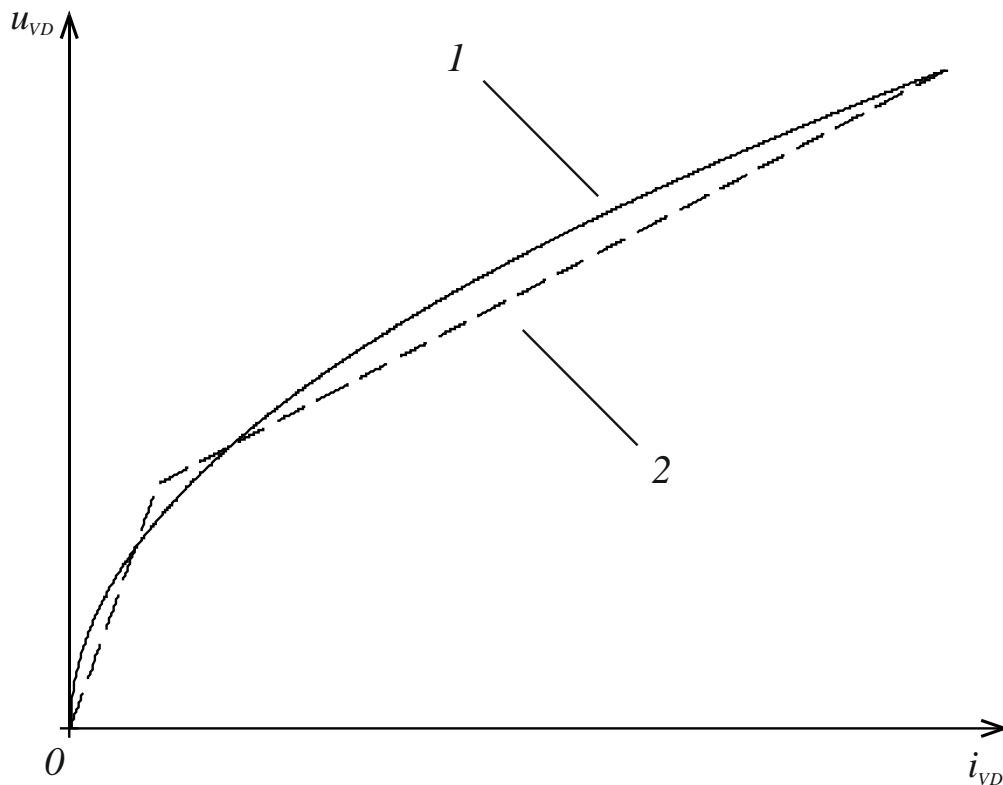


Рисунок 7.3. ВАХ діода (1) та її кусково-лінійна апроксимація (2)

Експериментальна частина а також аналітичні розрахунки, що передбачені порядком виконання цієї роботи мають сприяти кращому розумінню здобувачами освіти зазначених вище питань.

IV. Зміст та порядок виконання роботи

- 1 Скласти коло (рис. 7.4).
2. Увімкнути звуковий генератор та осцилограф. Сумістити обидва промені на екрані осцилографа у одну лінію. Подати від звукового генератора на вхід досліджуваного кола сигнал напругою до 10 В і частотою 1000 Гц.
3. Встановити величини R та C такими, щоб процес розряду:
 - 3.1 повністю завершувався до початку наступного періоду вхідної напруги;
 - 3.2 суттєво не завершувався до початку наступного періоду вхідної напруги;
 - 3.3 завершувався одночасно із початком наступного періоду вхідної напруги.

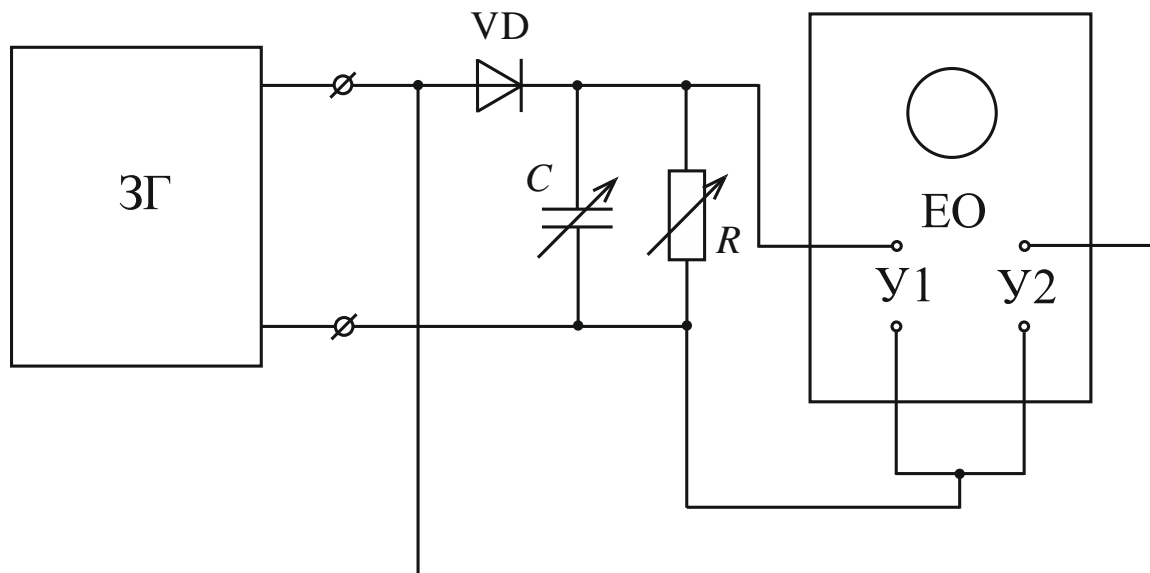


Рисунок 7.4. Схема для проведення експериментальних досліджень

4. Для кожного дослід п.3 зробити ескіз або фото отриманої осцилограми. Наближений вигляд осцилограми для дослід п. 3.3 наведено на рис. 7.2.

5. Для дослід п. 3.3 обчислити постійну часу кола розрядання конденсатора за формулою

$$\tau_{\text{вим}} = \frac{3}{16} T, \quad (7.1)$$

де
$$T = \frac{1}{f}, \quad (7.2)$$

а f – частота вхідної напруги (відраховується за шкалою частот генератора ЗГ)

6. Результати вимірювань та обчислень занести до табл. 7.1.

Таблиця 7.1. Результати вимірювань та обчислень у колі рис. 7.4

Виміряно			Обчислено			
f , Гц	R , кОм	C , мкФ	T , с	$\frac{3}{4}T$, с	$\tau_{\text{вим}}$, с	τ , с

Під час заповнення табл. 7.1 значення R та C занести відповідно до значень встановлених на шкалах магазинів опорів та ємностей, які використовувалися під час проведення дослід п. 3.3. Значення постійної часу розрахувати у відповідності із співвідношенням

$$\tau = RC. \quad (7.3)$$

7. Методом кусково-лінійної апроксимації виконати розрахунок перехідної напруги на конденсаторі використовуючи значення f , R та C які використовувалися при проведенні досліду 3.3. Амплітуду електрорушійної сили синусоїдного джерела живлення прийняти такою, що дорівнює $E_m = 10$ В; характеристику нелінійного елемента побудувати у відповідності із довідниковими даними щодо ВАХ застосованого типу діоду VD.

Контрольні запитання

1. Що називають апроксимацією характеристики нелінійного елемента?
2. У чому полягає сутність методу кусково-лінійної апроксимації при розрахунку перехідних процесів у нелінійних колах?
3. У чому полягають переваги і недоліки методу кусково-лінійної апроксимації при розрахунку перехідних процесів у нелінійних колах? У яких випадках його застосування є доцільним?
4. Яким чином отримано розрахунковий вираз (7.1) для визначення $\tau_{\text{вим}}$? Які припущення та спрощення при цьому застосовано?
5. Наведіть зовнішній вигляд кіл заряду і розряду конденсатора у дослідній схемі рис. 7.4
6. За яких умов напруга на виході кола однопівперіодного випрямляча рис. 7.1 виявиться практично постійною?

Література

1. [1], 5.1, 5.3.
2. [5], 7.2.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА РЕЛАКСАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ

I. Мета роботи

Дослідження характеру коливань, які виникають у нелінійному колі, яке містить неонову лампу та конденсатор під час його живлення від джерела постійної напруги.

II. Необхідні прилади та обладнання

1. Генератор RC- коливань ГК.
2. Магазин ємностей C_ϕ , 60 мкФ.
3. Вольтметр магнітоелектричний V, 0...150 В.
4. Осцилограф електронний С1-54.
5. Звуковий генератор ГЗ-34.

III. Короткі відомості з теорії

В технічних дисциплінах під релаксацією розуміють процес відновлення рівноваги певної системи після деякого збурення. Цей процес може супроводжуватися виникненням у системі коливань релаксаційного характеру. На протязі періоду таких коливань можна виділити два характерні часові проміжки – проміжок порівняно повільного накопичування енергії системи до досягнення певного критичного значення, а також проміжок відносно швидкої віддачі енергії системою.

Прикладом електричних релаксаційних коливань є коливання, які виникають в електричному колі з неонову лампою (рис.8.1).

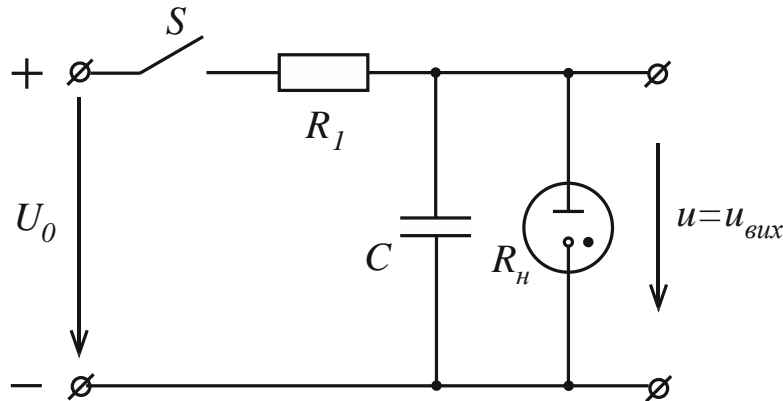


Рисунок 8.1. Принципова схема генератора релаксаційних коливань

При замиканні ключа S конденсатор C паралельно до якого підключено неонову лампу позначену як R_n . починає заряджатися від джерела постійної напруги U_0 через струмообмежуючий резистор з опором R_1 що призводить до одночасного зростання напруги на неоновій лампі, яка представляє собою суттєво нелінійний елемент із характеристикою, представленою на рис. 8.2.

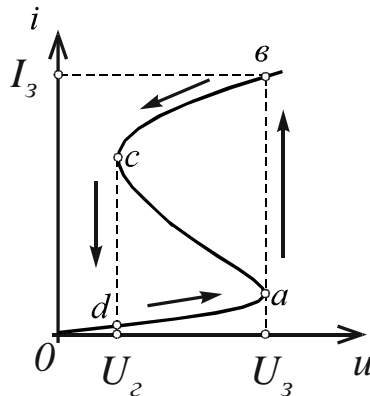


Рисунок 8.2. Ампер-вольтна характеристика неоновї лампи кола рис. 8.1

При досягненні напруги на лампі значення, яке називається напругою запалювання U_3 (точка a характеристики рис. 8.2) відбувається лавиноподібна іонізація атомів неону внаслідок чого її електричний опір різко зменшується а струм через лампу стрибкоподібно зростає до величини I_3 (точка b характеристики рис.

8.2). Конденсатор при цьому швидко розряджається що у свою чергу призводить до зниження напруги на лампі до значення напруги гасіння U_r (точка c характеристики рис. 8.2), після чого лампа згасає і її струм різко зменшується а електричний опір знову стає великим що призводить до відновлення процесу заряджання конденсатора (точка d характеристики рис. 8.2). Таким чином процес буде періодично повторюватися і матиме загальний вигляд представлений на рис. 8.3.

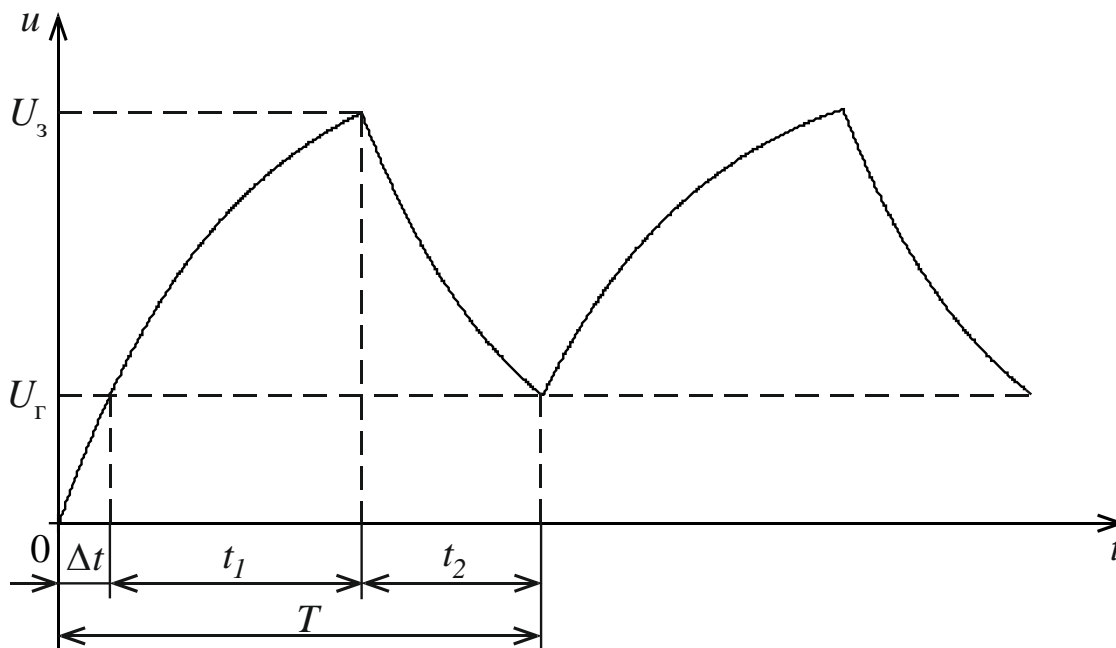


Рисунок 8.3. Загальний вигляд часової залежності напруги на виході генератора релаксаційних коливань

IV. Зміст та порядок виконання роботи

1 Скласти коло (рис. 8.4).

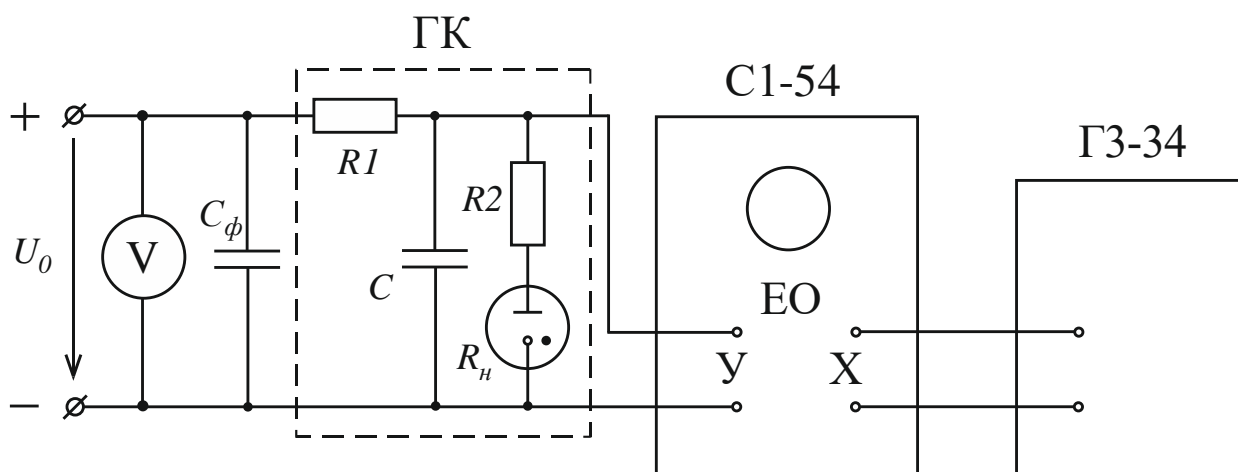


Рисунок 8.4. Схема експериментальних досліджень

2. Увімкнути коло та досягти чіткого і нерухомого зображення на екрані

осцилографа . Провести виміри за допомогою сітки на екрані осцилографа кількість поділок, що відповідає величинам показаним на рис. 8.5: $N_{\Delta U} - \Delta U$; $N_T - T$; $N_{t_1} - t_1$; $N_{t_2} - t_2$. Сфотографувати або зробити ескіз кривої напруги з екрану осцилографа. Виміряти живлячу напругу мережі U_0 . Результати вимірювань занести до табл. 8.1.

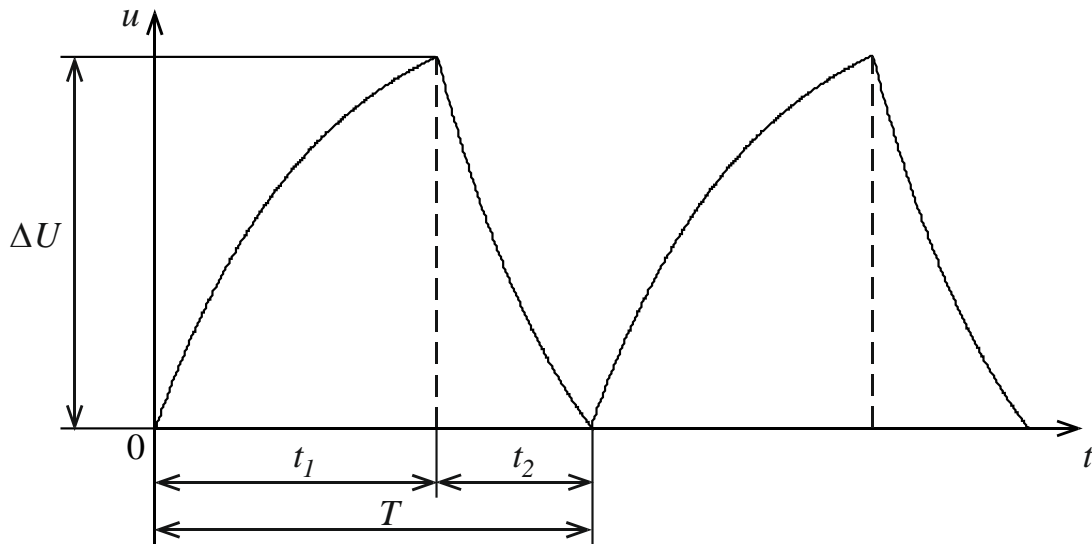


Рисунок 8.5. Вимірювані величини на осцилограмі релаксаційних коливань

3. Підготувати коло до вимірювань частоти релаксаційних коливань з допомогою звукового генератора та осцилографа (за кривими Ліссажу). Для цього на вхід горизонтального відхилення променя осцилографа при умові відключення його внутрішньої розгортки подати напругу від звукового генератора. Плавню змінюючи частоту звукового генератора досягти нерухомого зображення на екрані осцилографа одного періоду синусоїди (рис. 8.6 а). У цьому випадку частота звукового генератора (f_3) дорівнює частоті релаксаційних коливань (f_p). Якщо досягти зазначеного зображення одного періоду не вдається, то можна зафіксувати на екрані зображення двох (рис. 8.6 б) періодів. У цьому випадку частоту релаксаційних коливань можна визначити за виразом

$$f_p = \frac{1}{2} f_3, \quad (8.1)$$

4. Обчислити період релаксації

$$T = \frac{1}{f_p}, \quad (8.2)$$

а також часові інтервали, які відповідають часу накопичення заряду t_1 та розряджанню t_2 конденсатора у генераторі автоколивань

$$t_1 = T \cdot \frac{N_{t1}}{N_T}, \quad (8.3)$$

$$t_2 = T \cdot \frac{N_{t2}}{N_T} \quad (8.4)$$

5. Визначити напругу на конденсаторі у момент запалювання неонові лампи U_3 та у момент її гасіння U_Γ за співвідношеннями

$$U_3 = U_0 \cdot \frac{e^{\frac{t_1}{\tau_3}} - 1}{e^{\frac{t_1}{\tau_3}} - e^{\frac{t_2}{\tau_3}}}, \quad (8.5)$$

$$U_\Gamma = U_3 \cdot e^{\frac{t_2}{\tau_3}}, \quad (8.6)$$

де

$$\tau_3 = R_1 \cdot C, \quad (8.7)$$

$$\tau_p = (R_1 + R_H) \cdot C = \Delta t = \tau_3 \cdot \ln \frac{U_0}{U_0 - U_\Gamma}. \quad (8.8)$$

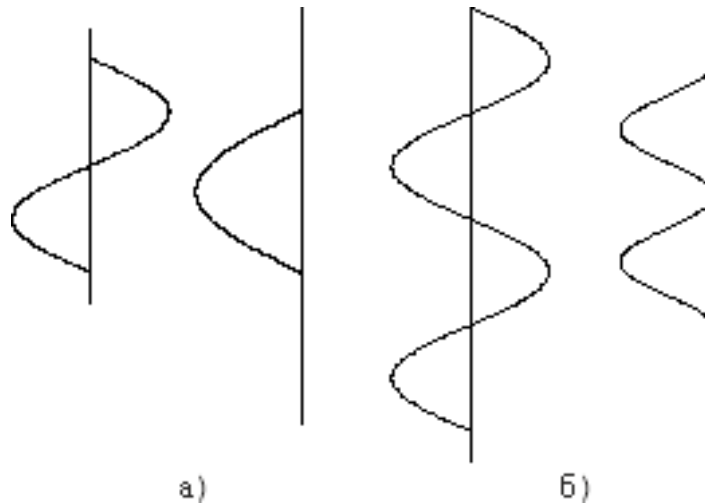


Рисунок 8.6. Осцилограми досліду вимірювання частоти релаксаційних коливань

У виразах (8.7) та (8.8) $R_H \approx (600 \div 800)$ кОм. Результати усіх проведених розрахунків занести до табл. 8.1.

5. Виконати розрахунок та побудову кривої релаксації (загальний вигляд див. рис. 8.3) та порівняти її з кривою отриманою на екрані осцилографа.

Таблиця 8.1 Виміряні й обчислені значення величин у досліджуваному колі

Виміряно						Обчислено					
$N_{\Delta U}$	N_T	N_{t1}	N_{t2}	U_0	f_p	ΔU	T	t_1	t_2	U_3	U_Γ
под.	под.	под.	под.	В	Гц	В	с	с	с	В	В

Контрольні запитання

1. Які коливання називають релаксаційними?
2. Яким чином залежить частота релаксації від параметрів *RC*-генератора?
3. Чому напруга на конденсаторі *RC*-генератора не досягає значення напруги живлячої мережі?
4. Поясніть сутність визначення частоти релаксаційних коливань за допомогою фігур Ліссажу.
5. Надайте приклади використання у техніці генераторів релаксаційних коливань.

Література

1. [1], 5.10, 5.12.
2. [3], 11.1, 11.2.
3. [5], 7.5, 7.6.
4. [6], 11.6.
5. [7], 1.1

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

- *1. Костін М. О., Шейкіна О. Г. Теоретичні основи електротехніки: підручник. Дніпро : Вид-во Маковецький, 2014. Т. 3. Теорія нелінійних кіл. 224 с.
2. Грудська В.П. Методи розрахунку нелінійних кіл постійного струму: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 80 с.
3. Khilov V.S. Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering: textbook. Dnipro: National Mining University, 2018. 467 p.
4. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки: підручник. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. 416 с.
- *5. Карпов Ю. О., Магас Т. Є., Мадьяров В. Г. Теоретичні основи електротехніки: навчальний посібник. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. Ч. 2. 191 с.
6. Теорія електричних кіл : навч. посіб. / В. Д. Косенков та ін. Хмельницький : ХНУ, 2024. 346 с.
7. Nonlinear Circuit Analysis – An Introduction URL: https://nonlinear.eecs.berkeley.edu/chaos/introduction_nonlinear_circuit_analysis.pdf (дата звернення: 10.11.2025).

* наявна остання редакція

Навчально-методичне видання

Бондар Олег Ігорович
Маренич Оксана Леонідівна
Карзова Оксана Олександрівна

НЕЛІНІЙНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Навчально-методичні рекомендації
до виконання лабораторних робіт

Електронне видання

Експертний висновок склав кандидат техн. наук, доцент
Олексій БАЛІЙЧУК

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.851 від 24.12.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка О. І. Бондар

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 3,07. Обл.-вид. арк. 3,11.
Зам. № 140

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 1201, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010