

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
"Дніпровська політехніка"**



Кафедра електротехніки



Хілов В.С.

**Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ, ЧАСТИНА 2**
(розділи: «Нелінійні електричні кола постійного і змінного струмів»,
"Магнітні кола", "Перехідні процеси в колах з нелінійними елементами"»)

**для студентів спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

**Дніпро
2021**

Рекомендовано до видання навчально-методичним відділом (протокол № від за поданням науково-методичної комісії зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (протокол № 21/22-01 від 30.08.2021 р.)

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 3 (розділи: «Нелінійні електричні кола постійного і змінного струмів», "Магнітні кола", "Перехідні процеси в колах з нелінійними елементами") для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка /В.С. Хілов; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка» – Д.: НТУ "ДП", 2021. – 36 с.

Автор:

Хілов В.С., докт.техн.наук, проф. каф. Електротехніки

Методичні вказівки призначено для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 3 (розділи: «Нелінійні електричні кола постійного і змінного струмів», "Магнітні кола", "Перехідні процеси в колах з нелінійними елементами"). В інструкціях до виконання лабораторних робіт наведено основний матеріал, який викладається на протязі двох чвертей семестру та відповідає затвердженій програмі. Кожна лабораторна робота складається з назви, мети, програми та етапів виконання, методичних вказівок, контрольних запитань.

© Хілов В.С. 2021.

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2021

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки призначені для студентів електротехнічних і електромеханічних спеціальностей, які вивчають курс “Теоретичні основи електротехніки” на базі кафедри електротехніки електротехнічного факультету, інституту Електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Курс вивчається на протязі трьох семестрів на першому й другому роках навчання.

Метою експериментального практикуму є кількісне і якісне дослідження нестационарних електромагнітних процесів у лінійні і стаціонарні процеси в нелінійних колах. Теоретичною базою експериментальних досліджень є наукові положення, що викладаються в лекційній частині курсу. Результатом досліджень є виявлення кількісних і якісних закономірностей, які проявляються в різних режимах роботи електричних кіл.

Методичні вказівки охоплюють теоретичний матеріал, що викладається в третьому й четвертому модулі дисципліни “Теоретичні основи електротехніки”, а саме перехідні процеси в лінійних колах і стаціонарні процеси в нелінійних колах.

У лабораторних роботах присвячених нестационарним процесам експериментально досліджуються закони комутації і закономірності електромагнітних процесів, що виникають у колах з різнорідними накопичувачами енергії. Залежні і незалежні початкові умови одержують експериментальне підтвердження. Досліджується принципово різний характер якості перехідного процесу при наявності декількох накопичувачів енергії в колі. Оцінюється демпфуюча дія втрат енергії в резистивних елементах на якість перехідних процесів. Експериментально досліджується явище перенапруги при включенні котушки індуктивності на змінну напругу. Перевіряється зв'язок між моментом комутації живлячої напруги, параметрів кола і величини кидка напруги на накопичувачі енергії.

У циклі дослідження стаціонарних процесів у нелінійних електричних колах експериментально встановлюються кількісні і якісні співвідношення як у колах постійного, так і змінного струмів. Установлюються значення і знаки статичних і динамічних опорів. Виявляються параметри схеми заміщення котушки з ненасиченим і доведеним до насичення феромагнітним осердям при її включенні на змінну напругу. Показуються кількісні і якісні зміни в кривій струму досліджуваної котушки. Аналізуються енергетичні параметри об'єкта дослідження. Досліджується явище, що проявляється тільки в нелінійних колах змінного струму - ферорезонанс напруг для якого експериментально перевіряються умови його виникнення і способи подавлення.

Перед початком циклу проведення лабораторних робіт необхідно провести інструктаж з техніки безпеки при проведенні лабораторних робіт.

ОСНОВНІ ПРАВИЛА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

1. До проходження лабораторного практикуму допускаються лише студенти, що ознайомлені з правилами техніки безпеки в електричних лабораторіях університету.

2. Перед проходженням чергового циклу практикуму в електричних лабораторіях університету студенти повинні вивчити інструкцію з техніки безпеки і одержати додатковий інструктаж перед початком робіт у кожній наступній лабораторії. Студенти після ознайомлення з правилами техніки безпеки та проведеного інструктажу мусять розписатись у журналі обліку за дотриманням правил техніки безпеки й відповідальність при їх порушенні.

3. Під час роботи в електричних лабораторіях забороняється без дозволу викладача, що веде лабораторний практикум, вмикати лабораторні стенди під напругу, робити будь-які вмикання або перемикання в основній розподільній шафі, змінювати запобіжники, і після автоматичного вимикання їх захисною апаратурою робити повторне вмикання.

4. Складання електричних схем і всі зміни в електричних схемах повинні виконуватися при вимкненій напрузі. Не можна включати схему в роботу до перевірки її справності.

5. Забороняється залишати провідники під напругою чи без неї у проходах між робочими місцями. Забороняється робити які-небудь перемикання в колах живлення дослідницьких стендів.

6. Користуватись провідниками для складання схем можливо тільки за умови достатньої площі їх перерізу передбаченим значенням струмів. Провідники повинні бути непошкодженою ізоляцією та наконечниками. Особливу обережність варто дотримувати при дослідженні кіл із послідовними з'єднаннями індуктивностей і ємностей, оскільки в таких колах можливі резонансні перенапруги.

7. Варто пам'ятати, що відключений конденсатор може зберегти небезпечний залишковий заряд, тому його необхідно розрядити перед включенням у ланцюг. Забороняється доторкатись до неізольованих струмоведучих частин електричних кіл, що знаходяться або можуть знаходитися під напругою.

8. Якщо під час проведення лабораторної роботи на стенді з'явився характерний запах паленої пластмаси, сильне гудіння електрообладнання, поява диму, або раптове зашкалювання стрілок вимірювальних приладів, необхідно негайно вимкнути напругу й повідомити про це викладача.

9. При виникненні аварійної обстановки - влученні людини під напругу, короткому замиканні на стенді, обриві струмоведучих проводів, загорянні - насамперед тумблером відключається стенд від джерела живлення, а при необхідності кнопкою «Выкл. 95» відключається електропостачання навчальної аудиторії. Кнопка «Выкл. 95» перебуває в розподільній шафі.

Вогнище загоряння гаситься вуглекислотним вогнегасником, що перебуває на робочому місці чергового лаборанта. Там же є аптечка з ліками для надання першої медичної допомоги.

Лабораторна робота № ТОЕ-3/1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи

Визначення експериментальним шляхом вольт-амперних характеристик розгалуженого нелінійного кола постійного струму

Програма роботи

1. Складання досліджуваного кола.
2. Експериментальне визначення вольт-амперних характеристик кола.
3. Побудова вольт-амперних характеристик.
4. Розрахунок вхідних динамічного й статичного опорів кола.
5. Побудова залежності ($R_{cm}(U)$, $R_{din}(U)$).
6. Розрахунок струмів і напруг нелінійного кола методом еквівалентного генератора
7. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Складання досліджуваного кола.

Зібрати на складальному полі учбово-дослідницького стенда коло відповідно до рис.1.1.

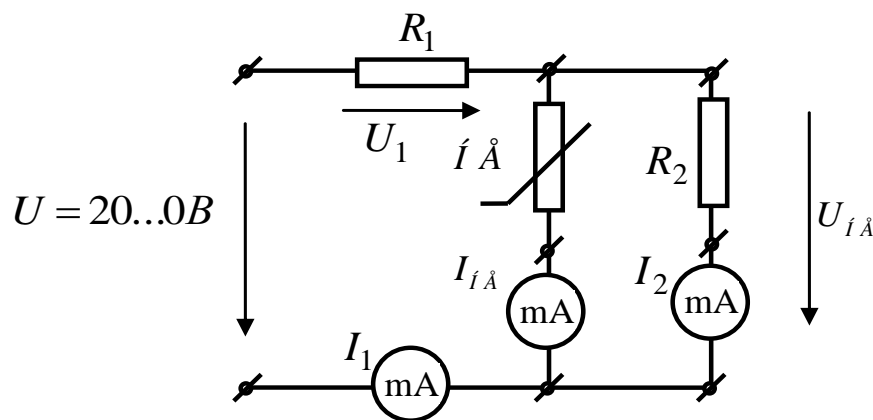


Рисунок 1.1. – Схема досліджуваного кола

Як елементи схеми використовуються:

- джерело регульованої постійної напруги із блоку постійних напруг;
- резистор R_1 вибирається номіналом близько 250 Ом, а R_2 близько 750 Ом;
- як нелінійний елемент використовується напівпровідниковий двоанодний діод КС, що працює в режимі стабілізації напруги.

1.2. Після перевірки електричної схеми включити живлення.

Етап 2. Експериментальне визначення вольт-амперних характеристик кола.

- 2.1. Встановити максимальне значення вихідної напруги джерела регульованої постійної напруги із блоку постійних напруг.
- 2.2. Зменшити значення вихідної напруги джерела регульованої постійної напруги до 15 В и заміряти напругу на нелінійному елементі мультиметром. Якщо напруга на нелінійному елементі змінилося більш ніж на 1 В знайти й усунути несправність у схемі.
- 2.3. Установити $U=20$ В значення постійної вихідної напруги джерела постійного регульованої напруги. Заміряти напруги U_1 і $U_{не}$, а також струми $I_1, I_2, I_{не}$. Дані вимірів занести в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Експериментальне визначення напруг і струмів у нелінійному колі

$U, \text{В}$	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	0
$U_1, \text{В}$											
$U_{не}, \text{В}$											
$I_1, \text{мА}$											
$I_2, \text{мА}$											
$I_{не}, \text{мА}$											

- 2.4. Зменшити вихідну напругу джерела на 2 вольти й заміряти напруги $U_1, U_{не}$ й струми $I_1, I_2, I_{не}$. Результат занести в таблицю 1.
- 2.5. Повторити пункт 2.4 до обнуління вихідної напруги джерела регульованої напруги.

Етап 3. Побудова вольт-амперних характеристик.

- 3.1. Вибрати масштаби для побудови вольт-амперних характеристик.

3.2. В одній системі координат побудувати вольт-амперні характеристики $U_{не}(I_2)$, $U_{не}(I_{не})$, $U_1(I_1)$, $U_{не}(I_1)$, $U(I_1)$.

Етап 4. Розрахунок вхідних динамічного й статичного опорів кола.

4.1. За даними таблиці 1.2 розрахувати опори $R_{ст}$, $R_{дин}$.

Таблиця 1.2.

Розрахунок чисельних значень статичних і динамічних опорів

$U, В$	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2
$I_1,$ мА										
$R_{ст},$ Ом										
$R_{дин},$ Ом										

4.2. Значення струму I_1 для відповідної вхідної напруги U береться з табл.1.1.

Етап 5. Побудова залежності ($R_{ст}(U)$, $R_{дин}(U)$).

5.1. Вибрати масштаби графіків.

5.2. В одній координатній сітці побудувати графіки $R_{ст}(U)$, $R_{дин}(U)$ за даними табл.1.2.

Етап 6. Розрахунок струмів і напруг нелінійного кола методом еквівалентного генератора.

6.1. Розрахувати внутрішній опір еквівалентного генератора, щодо вітці з нелінійним елементом.

6.2. Розрахувати ЕДС холостого ходу еквівалентного генератора, щодо вітці з нелінійним елементом при вхідній напрузі 20 В.

6.3. Використовуючи відому нелінійну залежність $U_{не}(I_{не})$ і дані пунктів 6.1, 6.2 знайти графічним методом струм і напругу на нелінійному елементі.

6.4. Зіставити результати вимірів і розрахункових даних.

Звіт повинен містити

1. Номер і найменування роботи.
2. Програму роботи.
3. Таблиці 1, 2.

4. Схему досліджуваного кола.
5. Розрахунок параметрів еквівалентного генератора.
6. Рисунки 2, 3.
7. Аналіз результатів. Висновки по проведених розрахунках і експериментальній перевірці.

Методичні вказівки

Етап 2. Вимір струмів і напруг у схемі робиться для всіх кіл одночасно при встановленій вхідній напрузі.

Етап 4. Вхідний опір визначається в кожній робочій точці за даними таблиці 2

$$R_{CT} = \frac{U}{I_1}, \text{ Ом.}$$

Значення струму I_1 необхідно перевести з міліамперів в амperi.

Вхідний динамічний опір визначається на робочій ділянці за даними табл.2

$$R_{дин} = \frac{\Delta U}{\Delta I_1}, \text{ Ом.}$$

Етап 6. При розрахунку не враховуємо внутрішній опір джерела регульованої постійної напруги.

Внутрішній опір еквівалентного генератора, щодо нелінійного елемента

$$R_{BH} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \text{ Ом.}$$

Струм неробочого ходу еквівалентного генератора

$$I_{XX} = \frac{U}{R_1 + R_2}, \text{ А.}$$

де $U=16 \text{ В.}$

ЕДС холостого ходу еквівалентного генератора

$$E_{XX} = I_{XX} \cdot R_2, \text{ В.}$$

Будуємо в одній координатній сітці вольт-амперні характеристики $U_{не}(I_{не})$, $U_{вн}(I_{вн})$. Дані для побудови $U_{не}(I_{не})$ беруться з таблиці 1, а вольт-амперна характеристика лінійного елемента $R_{вн}$ $U_{вн}(I_{вн})$ будується по двох точках. Графічно визначаємо струм і напругу на нелінійному елементі при розрахованому E_{xx} .

Лінеаризуємо у робочій точці нелінійний елемент. Для цього його заміняємо опором $R_{СТ}$ (Рис.1.2) або $R_{ДИН}$ (Рис.1.3) і додатковою ЕДС (E) для лінеаризованої схеми визначаємо струми I_1, I_2 .

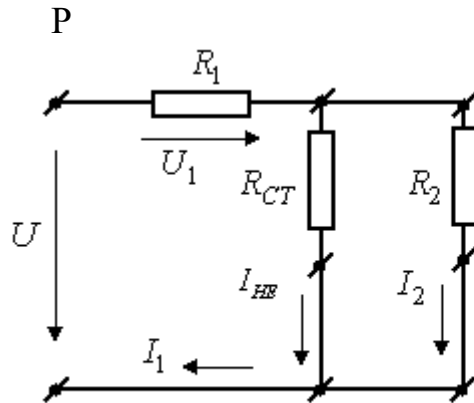


Рисунок 1.3. – Лінеаризація в точці

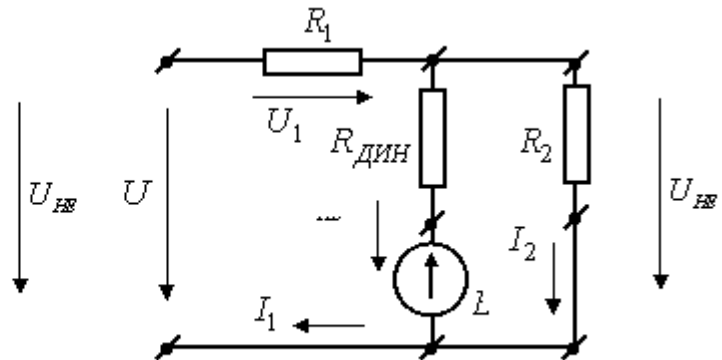


Рисунок 1.4. – Лінеаризація на робочій ділянці

Контрольні питання

1. Чому нелінійні кола не розраховуються методом накладення?
2. У якому випадку можна розрахувати нелінійне коло методом еквівалентного генератора?
3. Що розуміється під статичним опором нелінійного елемента?
4. Що таке динамічний опір нелінійного елемента?
5. Чому статичний опір нелінійного елемента завжди позитивний?
6. При яких умовах динамічний опір нелінійного елемента позитивний, а при яких - негативний?
7. Як графічно розраховується коло з нелійними елементами, включеними послідовно?
8. Які обмеження накладаються на розрахунок кіл, якщо нелінійні елементи включаються паралельно?
9. Які особливості розрахунку ланцюгів з нелійними елементами, включеними паралельно?
10. Як скласти баланс потужностей для нелінійного ланцюга?

Лабораторна робота № ТОЕ–3/2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи

Визначення експериментальним шляхом параметрів схеми заміщення котушки зі сталевим осердям

Програма роботи

1. Складання досліджуваної схеми
2. Осцилографування кривої струму обмотки котушки.
3. Вимір величин струму, напруги, активної потужності.
4. Розрахунок наближеного значення індуктивності контуру намагнічування котушки.
5. Розрахунок уточнених параметрів заступної схеми.
6. Побудова векторної діаграми.
7. Аналіз результатів. Виводи.

Етапи роботи

Етап 1. Складання досліджуваного кола.

Зібрати електричну схему, наведену на рис.2.1.

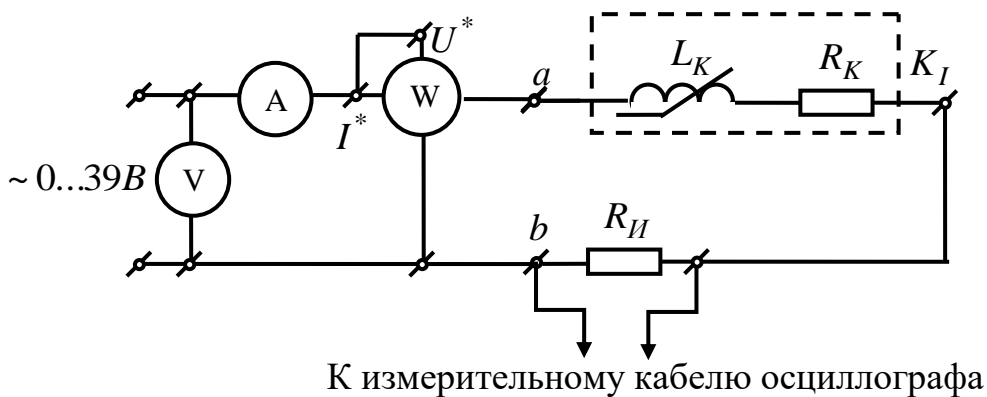


Рисунок 2.1. – Схема досліджуемого кола

У схемі використовуються елементи:

- джерело живлення – напруга однієї фази блоку трифазної напруги (50 Гц, 0...39,9 В);
- котушка зі сталевим магнітопроводом розташована знизу складального поля (для проведення експерименту береться обмотка I котушки);
- вимірювальний опір береться значенням $R_{II}=1...2$ Ом.

1.2. Після перевірки електричної схеми увімкнути живлення.

Етап 2. Осцилографування кривої струму обмотки котушки.

2.1. Вімкнути тумблер електронного осцилографа «мережа» і дати прогрітися осцилографу до появи горизонтальної лінії на екрані.

2.2. Приєднати вимірювальний кабель осцилографа на вихідну напругу вимірювального опору R_{II} .

2.3. Дільником напруги «підсилювач Y » установити зручний масштаб по осі ординат, а перемикачем «розгорнення» сигналу - по осі абсцис.

2.4. Повертаючи ручку «рівень» за годинниковою стрілкою до упору, а потім ручкою «Стаб» домогтися зникнення сигналу з екрана осцилографа. Потім, повертаючи ручку «Рівень» проти годинникової стрілки домогтися чіткого, синхронізованого зображення досліджуваного сигналу.

2.5. Установити вихідну напругу джерела живлення 10 В.

2.6. Приєднати вимірювальний кабель осцилографа до вимірювального опору. Вибрати масштаби.

2.7. Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати з екрана осцилографа криву струму при напрузі джерела 10 В. Записати масштаби по осях ординат і абсцис. (Крива струму синусоїдальна).

2.8. Збільшити вхідну напругу до значення $U=39,9$ В.

2.9. При необхідності змінити масштаб по осі ординат кривої струму.

2.10. Зафіксувати з екрана осцилографа або сфотографувати криву струму при напрузі джерела 39,9 В. (Крива струму несинусоїдальна).

Етап 3. Вимір величин струму, напруги, активної потужності.

3.1. Установити вихідна напруга джерела живлення 39,9 В.

3.2. Визначитися із ціною поділок електровимірювальних приладів – міліамперметра і ватметра.

3.3. Напругу виміряти мультиметром; зняти показання зі шкал міліамперметра і ватметра. Дані занести в таблицю 1.

Таблиця 2.1.

Вимірені та розраховані результати дослідження

Обмірено				Обчислено												
U	I	P	R_M	L_S	U_Φ	ψ_Φ	P_M	P_C	g_{CT}	I_n	I_μ	ψ_μ	L_μ	Q_μ	Q_S	Φ
B	A	$Вт$	$Ом$	$Гн$	B	<i>град</i>	$Вт$	$Вт$	$См$	A	A	<i>град</i>	$Гн$	<i>вар</i>	Var	$Bб$

3.4. Відключити джерело живлення, від'єднати котушку зі сталевим магнітопроводом від схеми й замірити мультиметром резистивний опір котушки R_M . Результат виміру занести в таблицю 1.

3.5. Відключити стенд.

Етап 4. Розрахунок параметрів спрощеної заступної схеми.

4.1. За даними таблиці 1 зробити розрахунок параметрів спрощеної заступної схеми.

4.2. Результати розрахунків занести в таблицю 2.1.

Етап 5. Побудова спрощеної векторної діаграми.

5.1. За даними таблиці 1 побудувати спрощену векторну діаграму.

Етап 6. Розрахунок уточнених параметрів заступної схеми.

6.1. Приймаючи, що потік розсіювання становить не більш, як 10% стосовно основного потоку, розрахувати чисельне значення індуктивності розсіювання.

6.2. За вихідним даними таблиці 1 зробити розрахунок уточнених параметрів заступної схеми котушки зі сталевим осердям.

Етап 7. Побудова уточненої векторної діаграми.

7.1. За розрахунковими результатами таблиці 1 побудувати уточнену векторну діаграму напруг, сполучену з векторною діаграмою струмів.

Звіт повинен містити

1. Номер і найменування роботи.
2. Мета роботи.
3. Програма роботи.
4. Рис.1, табл.1.
5. Розрахунок параметрів спрощеної й уточненої заступних схем .
6. Векторні діаграми відповідним спрощеним і уточненим заступним схемам.
7. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 2. Тому що магнітний потік пропорційний прикладеній напрузі, то при збільшенні напруги магнітопровід котушки насичується, що призводить до зменшення індуктивності контуру й зменшення індуктивного опору. Тому при збільшенні напруги магнітопровід насичується (Рис.2.2,а) і струм у котушці починає змінюватися не по синусоїді (Рис.2.2,б), що спостерігається на осцилограмах струму (Рис.2.2, с, d).

До етапу 4. Для розрахунку електричних кіл змінного струму з нелінійним індуктивним елементом (котушкою зі сталевим осердям), останні замінюються послідовною або паралельною заступною схемою (Рис. 2.3, 2.4).

У схемах опір R_M є резистивним опором обмотки котушки (опір міді котушки). У спрощених заступних схемах магнітними потоками розсіювання зневажають. Тому індуктивність розсіювання й індуктивний опір контуру розсіювання дорівнюють нулю. Резистивний опір R_{CT} і відповідна провідність G_{CT} ураховують наявність активних втрат у сердечнику магнітопроводу (опір стали котушки враховує наявність активних втрат на перемагнічування магнітопроводу). Реактивний опір x_μ і провідність b_μ ураховують наявність основного магнітного потоку, що замикається по магнітопроводу.

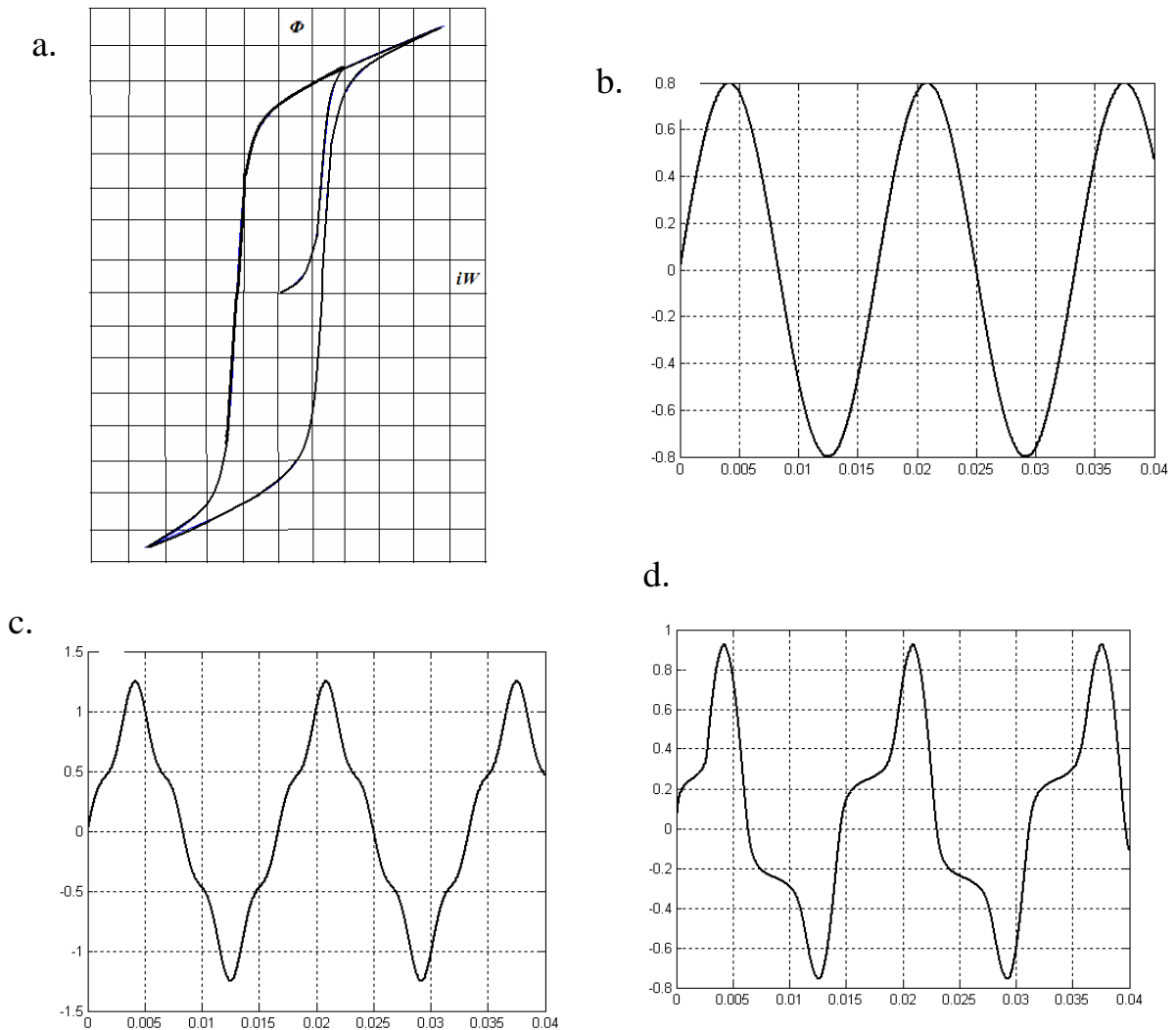


Рисунок 2.2. – Гістерезисна крива намагнічування осердя (а), криві струму котушки зі сталевим осердям при ненасиченому осерді (b), початкове (c) та глибоке (d) насичення осердя магнітопроводу

Для розрахунку параметрів схеми заміщення робиться припущення, що в колі протікає еквівалентний синусоїдальний струм, величина якого визначена амперметром.

Зневажаємо індуктивністю розсіювання (наближений розрахунок)

$$x_s = 0.$$

Реактивна потужність, що виділяється в індуктивності, обумовлена основним потоком

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \text{ вар,}$$

де $S=UI$, ВА – повна споживана потужність; U, I, P – обмірювані значення напруги, В, еквівалентного струму, А, активної потужності, Вт.

Наближене значення реактивного опору котушки

$$x'_\mu = \omega L'_\mu = \frac{Q}{I^2}, \text{ Ом.}$$

Наближене значення індуктивності котушки

$$L'_\mu = \frac{x'_\mu}{\omega}, \text{ Гн}$$

де $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота живлячої напруги, $f = 50$ Гц – кутова частота.

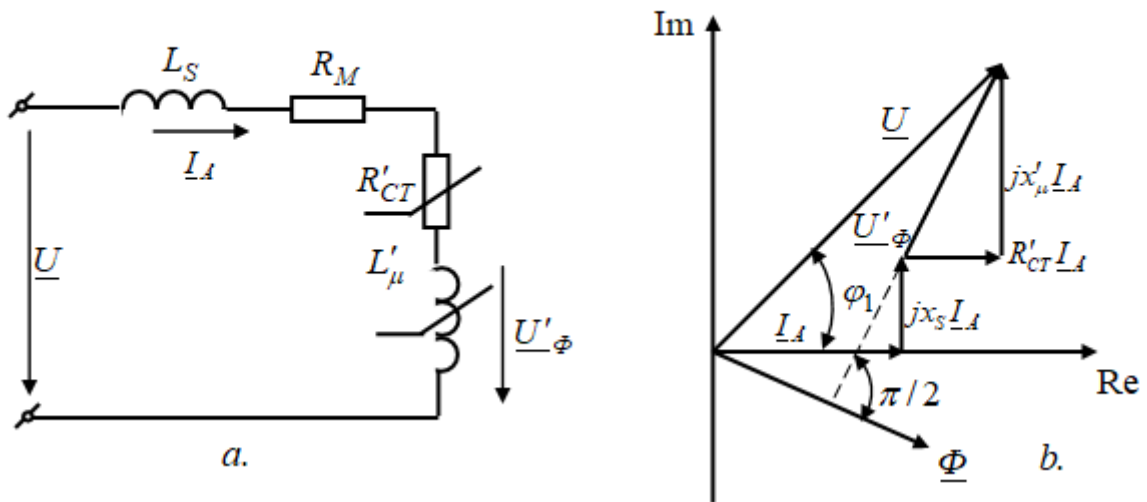


Рисунок 2.3. – Послідовна заступна схема (а) та векторна діаграма (б) котушки зі сталевим осердям

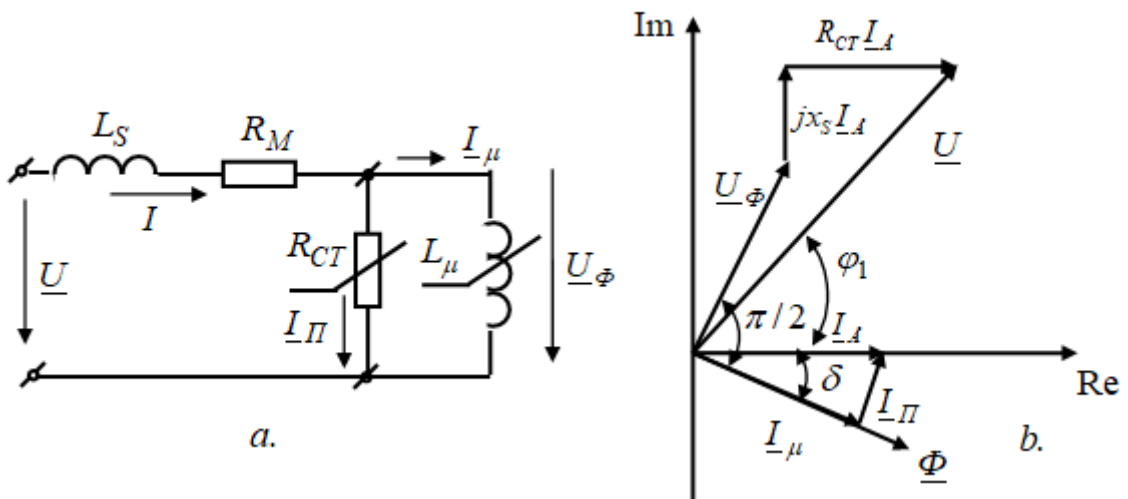


Рисунок 2.4. – Паралельна заступна схема (а) та векторна діаграма (б) котушки зі сталевим осердям

До етапу 5. Розрахунок уточнених параметрів заступної схеми.

Розрахунок ведемо з урахуванням наявності індуктивності від потоків розсіювання. Приймаємо значення потоку розсіювання, який дорівнює 10% від основного потоку, що замикається по магнітопроводу. При такому допущенні індуктивність розсіювання визначається

$$L_S = 0,1L'_\mu, \text{ Гн.}$$

Реактивний опір від потоків розсіювання

$$x_S = \omega L_S, \text{ Ом.}$$

Із трикутника потужностей знаходимо кут відставання φ вхідного еквівалентного струму від вхідної напруги

$$\varphi = \arccos \frac{P}{S}, \text{ радіан.}$$

Визначаємо комплексні значення вхідні напруги \underline{U} й еквівалентний струм \underline{I}

$$\underline{U} = U e^{j\psi_U}; \underline{I} = I e^{j\psi_I},$$

де U, I – показання приладів;

ψ_u, ψ_i - фази напруги й струму, зв'язані між собою співвідношенням

$$\psi_u - \psi_i = \varphi.$$

Одна з фаз (ψ_u або ψ_i) приймається за вихідну (наприклад, рівної нулю).

Розраховуємо напругу на контурі намагнічування

$$\underline{U}_\phi = \underline{U} - \underline{I}(R_M + jx_S) = U_\phi e^{j\psi_\phi}, \text{ В.}$$

Далі уточнений розрахунок ведеться для паралельної схеми заміщення (рис.2.3).

Активні втрати в обмотці котушки (в опорі міді котушки)

$$P_M = R_M I^2, \text{ Вт.}$$

Активні втрати на перемагнічування стали магнітопроводу (у провідності стали магнітопроводу)

$$P_C = P - P_M, \text{ Вт.}$$

Провідність стали магнітопроводу котушки

$$G_{CT} = \frac{P_C}{U_\phi}, \text{ См.}$$

Струм у контурі втрат, обумовлений втратами в сталі

$$I_{II} = U_\phi \cdot G_{CT}, \text{ А.}$$

Струм втрат збігається по фазі з напругою на контурі намагнічування, тому його комплексне значення

$$\underline{I}_{II} = I_{II} e^{j\psi_U}, \text{ А.}$$

Комплексне значення струму контуру основного потоку намагнічування магнітопроводу

$$\underline{I}_\mu = \underline{I} - \underline{I}_{II} = I_\mu e^{j\psi_\mu}, \text{ А.}$$

Уточнене значення індуктивної провідності контуру намагнічування

$$L_\mu = \frac{1}{\omega \cdot b_\mu}, \text{ Гн.}$$

Реактивні втрати в контурі намагнічування

$$Q_\mu = \frac{I_\mu^2}{b_\mu}, \text{ вар.}$$

Реактивні втрати в індуктивності потоку розсіювання

$$Q_S = x_S I^2, \text{ вар.}$$

Значення модуля магнітного потоку

$$\Phi = \frac{U_\phi}{4,44 \cdot f \omega}, \text{ Вб,}$$

де $w=100$ - кількість витків обмотки котушки

Магнітний потік відстає від напруги на контурі намагнічування на $\frac{\pi}{2}$, тому його комплексне значення

$$\underline{\Phi} = \Phi \cdot e^{j(\psi_U - \frac{\pi}{2})}, \text{ Вб.}$$

Результати розрахунку занести в таблицю 1.

Аналогічні розрахунки можна провести й для послідовної схеми заміщення, рисунок 2.2.

До етапу 7. Побудова векторної діаграми напруг, сполученої з векторною діаграмою струмів і потоку.

Як вихідний вектор вибирається один з параметрів: вектори вхідного струму, вхідної напруги або магнітного потоку. Всі інші вектори будуються в масштабах відповідно до знайдених комплексних значень. Вихідні дані для побудови векторної діаграми беруться з таблиці 2.1.

Контрольні питання

1. Від чого залежить несинусоїдальність струму котушки індуктивності зі сталевим сердечником?
2. Які гармоніки присутні в кривій несинусоїдального струму?
3. Поясніть поняття еквівалентної синусоїди?
4. Як розрахувати значення еквівалентної синусоїди струму?
5. Зі збільшенням насичення магнітопроводу реактивний опір котушки індуктивності зміниться чи ні?
6. Чому контур потоків розсіювання не насичується зі збільшенням прикладеної напруги?
7. Яким явищем пояснюється насичення сталевих магнітопроводів?
8. Поясніть, що розуміється під явищем опору стали?
9. Поясніть, що розуміється під явищем опору міді?
10. Які методи розрахунку можна застосувати при заміні вихідної несинусоїдальної кривої струму еквівалентною синусоїдою?

Лабораторна робота № ТОЕ–3/3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА ФЕРОРЕЗОНАНСУ НАПРУГ У ПОСЛІДОВНОМУ КОНТУРІ

Мета роботи

Визначення експериментальним шляхом умов виникнення й особливостей явища ферорезонансу напруг при послідовному з'єднанні котушки зі сталевим осердям і конденсатором

Програма роботи

1. Складання досліджуваної схеми
2. Експериментальне визначення вольт-амперної характеристики котушки зі сталевим магнітопроводом.
3. Визначення величини ємності, необхідної для виникнення явища ферорезонансу напруг у досліджуваному контурі.
4. Зняття вольт-амперної характеристики послідовного з'єднання котушки зі сталлю і ємності.
5. Побудова вольт-амперної характеристики всього контуру й складових елементів.
6. Аналіз результатів. Виводи.

Етапи роботи

Етап.1. Складання досліджуваного кола.

- 1.1. Зібрати електричну схему, наведену на рис.3.1.

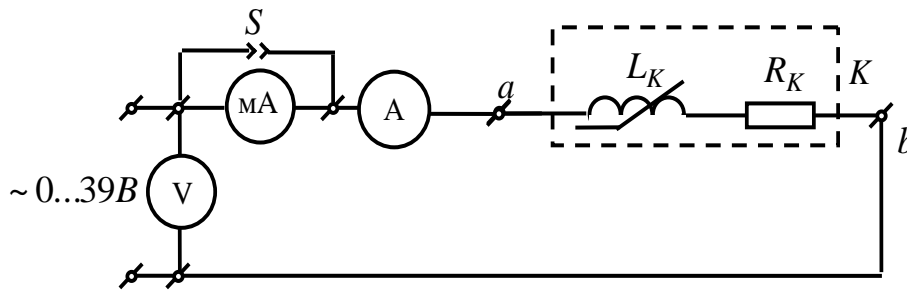


Рисунок 3.1. – Схема експериментального дослідження вольт-амперної характеристики нелінійної котушки

У схемі використовуються елементи:

- джерело живлення – напруга однієї фази блоку трифазної напруги (50 Гц, 0...39,9 В);
- котушка зі сталевим магнітопроводом знаходиться знизу складального поля (для проведення експерименту береться котушка зі сталевим осердям, що розташована в нижньому лівому куті складального поля).

Етап 2. Експериментальне визначення вольт-амперної характеристики котушки зі сталевим магнітопроводом.

Після перевірки електричної схеми включити живлення і зняти залежність струму від напруги. Результати вимірів занести в таблицю 3.1. При струмах, що перевищують межу виміру міліамперметра необхідно його шунтувати зовнішньою перемичкою.

Таблиця 3.1.

Вимірені значення спаду напруги та струму котушки зі сталевим осердям

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_K, В$	4	8	12	16	20	24	28	30	32	34
I_K, mA										

Етап.3. Визначення величини ємності, необхідної для виникнення явища ферорезонансу напруг у досліджуваному контурі.

3.1. Побудувати залежність $U_K = f(I_K)$ за даними таблиці 3.1.

3.2. Користуючись кривою $U_K = f(I_K)$ і припускаючи, що $U_K = U_{LK}$, визначити величину ємності C , необхідну для виникнення ферорезонансу (струм у колі повинен бути не більше 1А).

3.3. Визначити найбільше значення ємності C_{KP} при котрій ще можливий ферорезонанс.

Етап 4. Зняття вольт-амперної характеристики послідовного з'єднання котушки зі сталлю і ємності.

Зібрати схему, наведену на рис. 3.2.

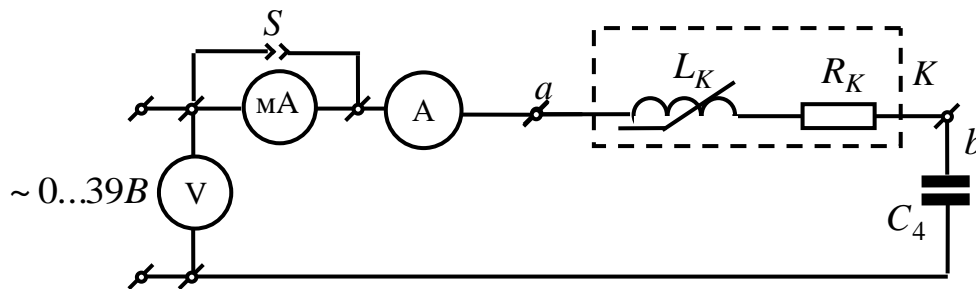


Рисунок 3.2. – Схема експериментального дослідження вольт-амперної характеристики явища ферорезонансу напруг

Встановити за допомогою декадних перемикачів величину розрахункової по пункті 3.2. ємності $C = C_4$, необхідну для ферорезонансу.

Зняти експериментальним шляхом вольт-амперну характеристику всього кола, що складається з котушки зі сталевим осердям і конденсатора, включаючи й область після стрибка струму. Результати вимірів внести в таблицю 3.2.

Зростаюча вітка вольт-амперної характеристики знімається при збільшенні підведеної напруги до величини не перевищуючого стрибка напруги.

Перед зняттям зростаючої вітки вольт-амперної характеристики на більших струмах закортити міліамперметр.

Убутну вітку вольт-амперної характеристики знімати при зменшенні підведеної напруги.

Таблиця 3.2.

Вимірені значення спаду напруги та струму котушки зі сталевим осердям і лінійної ємності

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, V										
U_K, V										
U_C, V										
I_K, mA										

4.6. Зростаюча вітка вольт-амперної характеристики знімається при збільшенні підведеної напруги до величини не перевищуючого стрибка напруги.

Перед зняттям зростаючої вітки вольт-амперної характеристики при більших струмах закортити міліамперметр.

4.8. Спадаючу вітку вольт-амперної характеристики знімати при зменшенні підведеної напруги.

Етап 5. Побудова вольт-амперної характеристики всього контуру й складових елементів.

5.1. У загальній системі координат і в одному масштабі побудувати графіки залежностей від струму кола:

- загальної напруги $U = f_1(I_K)$;
- напруги на котушці $U_K = f_2(I_K)$;
- напруги на конденсаторі $U_C = f_3(I_K)$.

5.2. За графіках $U_K = f_2(I_K)$ і $U_C = f_3(I_K)$ побудувати розрахункову криву підведеної напруги $U' = F_1(I_K)$ й зрівняти її із кривою $U = f_1(I_K)$.

Звіт повинен містити

1. Номер і найменування роботи.
2. Мету роботи.
3. Програму роботи.
4. Рис.3.2, табл.3.1, 3.2.
5. Графічні залежності $U = f_1(I_K)$, $U_K = f_2(I_K)$, $U_C = f_3(I_K)$, $U' = F_1(I_K)$.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

При послідовному з'єднанні котушки з феромагнітним осердям і конденсатора спостерігається особливе явище, пов'язане з нелінійною характеристикою цього кола, яке називане ферорезонансом. У відмінності від кіл з постійними параметрами, резонансне явище в колі, що досліджується досягається не зміною частоти прикладеної напруги, а його величиною. Це пов'язане з тим, що індуктивність котушки з феромагнітним осердям безпосередньо залежить від величини струму й, отже, варіюється при зміні прикладеної напруги до кола.

Для експериментального вивчення явища ферорезонансу напруг необхідно забезпечити умови його виникнення, що досягається відповідним вибором значень реактивних елементів кола. Для цього на першому етапі досліджень необхідно визначити вольт-амперну характеристику досліджуваної нелінійної котушки індуктивності $U_K = f_2(I_K)$. Ця характеристика подібна кривій намагнічування осердя. На другому етапі досліджень вибираємо характеристику лінійного конденсатора.

Конденсатор – лінійний елемент, тому його вольт-амперна характеристика $U_C = f_3(I_K)$ є прямою лінією. Якщо обидві характеристики $U_K = f_2(I_K)$, $U_C = f_3(I_K)$ звести в одній координатній системі, то точка їхніх перетинання однозначно визначить точку ферорезонансу.

Вибравши точку перетинання вольт-амперних характеристик $U_K = f_2(I_K)$, $U_C = f_3(I_K)$ тим задаємо параметри елементів. Якщо параметри в даній лабораторній роботі котушки індуктивності незмінні, то значення ємнісного елемента ми можемо вибирати у відповідності з розрахунком. Для одержання фізично реалізуемого значення ємності вибираємо точку резонансу безпосередньо за коліном перегину кривій $U_K = f_2(I_K)$. Обрана точка N визначається координатами U_N , I_N (Рис. 3), які належать як нелінійній характеристиці котушки зі сталлю $U_K = f_2(I_K)$ так і характеристиці лінійного конденсатора $U_C = f_3(I_K)$. Звідси ємність конденсатора повинна бути

$$C = I_N / (U_N \cdot \omega),$$

де ω – кутова частота, що відповідає промисловій напрузі із циклічною частотою $f = 50$ Гц.

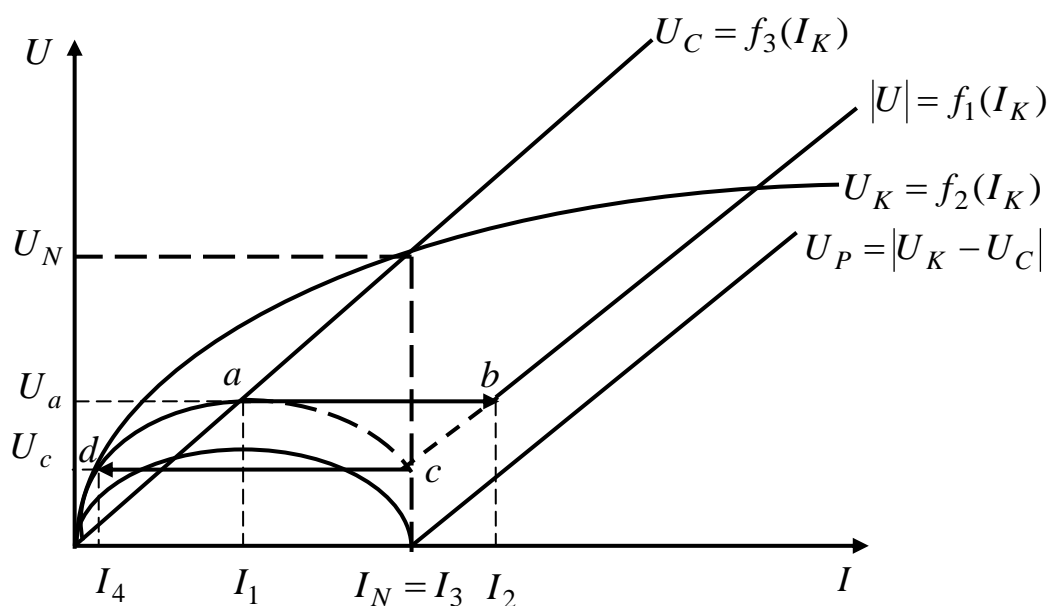


Рисунок 3.3. – Вольт-амперна характеристика явища ферорезонансу напруг

Якщо вольт-амперні характеристики $U_K = f_2(I_K)$, $U_C = f_3(I_K)$ не перетинаються, то в колі явища ферорезонансу не виникає. У граничному випадку графік характеристик $U_C = f_3(I_K)$ є дотичним до характеристики $U_K = f_2(I_K)$ на початку координат. Цьому випадку відповідає критична ємність C_{KP} . Якщо ємність конденсатора дорівнює або менше критичної ємності C_{KP} , то явища ферорезонансу не виникає. Тобто для виникнення явища ферорезонансу в досліджуваному ланцюзі необхідно й достатньо, щоб значення ємності конденсатора було не менше критичної ємності C_{KP} .

Якщо резистивним опором котушки індуктивності зі сталевим осердям можливо знехтувати, так як воно мало стосовно реактивного опору цієї котушки, то напруга на ємнісному елементі зміщена по фазі на кут 180° відносно напруги на котушці. При такому співвідношенні вхідна напруга всього кола є алгебраїчною різницею напруг на індуктивності і ємності. Ординати графічної залежності $U = f_1(I_K)$ знаходяться як різниця ординат $U_K = f_2(I_K)$ і $U_C = f_3(I_K)$

$$U_P = U_K - U_C.$$

Тому що досліджуються діючі значення напруг кола, вольт-амперні характеристики розглядаються безвідносно від знаків у першому квадранті, тобто частина характеристики $U = f_1(I_K)$, що потрапляє у четвертий квадрант розглядається в першому квадранті. Для цього береться її дзеркальне відбиття щодо осі абсцис, тобто беремо модуль характеристики $U = f_1(I_K)$.

Якщо не можна зневажити резистивним опором котушки індуктивності зі сталевим осердям стосовно реактивного опору цієї котушки, то результуюча характеристика $U = f_1(I_K)$ не впаде до нуля при ферорезонансі напруг і вхідний струм буде відмінний від нуля

$$U = \sqrt{(U_K - U_C)^2 + U_A^2},$$

де U_A – падіння напруги на резистивному опорі котушки індуктивності зі сталевим осердям.

Плавне збільшення підведеної напруги від 0 до U_a призводить до плавного зростання струму кола (Рис. 3), який практично на $\pi/2$ відстає від напруги. У точці a відбувається стрибок струму від значення I_1 до значення I_2 в точці b при незмінній напрузі U_a . Кидок струму відбувається зі зміною фази струму. Струм починає випереджати напругу практично на кут $\pi/2$. Таке явище стрибкоподібної зміни фази в техніці називають перекидом фази. Подальше збільшення напруги призводить до збільшення струму кола.

Зменшення напруги призводить до зменшення струму кола до значення I_2 в точці b (Рис. 3), Надалі напруга й струм продовжують плавно змінюватися до точки z де струм приймає значення I_3 , напруга – значення U_c . У точці z відбувається стрибок струму від значення I_3 до значення I_4 в точці d . На цій ділянці вольт-амперної характеристики так само відбувається явище перекидання фази. Подальше зменшення прикладеної напруги призводить до зменшенні струму кола й система вертається у вихідну точку.

Контрольні питання

1. Поясніть явище перекидання фази.
2. Як зміниться сумарна вольт-амперна характеристика при збільшенні резистивного опору нелінійної котушки індуктивності?
3. Чому в реальних електричних колах у момент резонансу струм не дорівнює нулю?
4. У яких випадках, і яких точках вольт-амперної характеристики кола відбувається стрибкоподібна зміна струму і його фази?
5. За рахунок якого ефекту досягається явище ферорезонансу напруг?
6. Як зміниться напруга на котушці індуктивності при зменшенні прикладеної напруги, якщо до цього в колі переважав ємнісний опір?
7. На якій ділянці вольт-амперної характеристики кола спостерігається від'ємний динамічний опір?
8. Укажіть на вольт-амперній характеристиці точку ферорезонансу.
9. При відомих вольт-амперних характеристиках резистивного опору, ємності й котушки зі сталлю як знайти результуючу вольт-амперну характеристику всього кола?
10. Чому не розглядається результуюча вольт-амперна характеристика в четвертому квадранті?

Лабораторна робота № ТОЕ–3/4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО АВТОКОЛИВАЛЬНОГО КОЛА

Мета роботи

Визначення параметрів нелінійного кола, при яких виникає автоколивальний режим.

Програма роботи

1. Ознайомлення з макетом кола.
2. Вимір значень резистивних опорів.
3. Зняття вольт-амперної характеристики нелінійного елемента.
4. Експериментальне визначення напруги при якому генеруються автоколивання.
5. Аналіз впливу значення ємнісного опору на частоту й амплітуду автоколивань.
6. Аналіз впливу резистивного опору на частоту й амплітуду автоколивань.
7. Розрахунок частоти релаксаційних коливань.
8. Аналіз результатів. Виводи.

Етапи роботи

Етап 1. Ознайомлення з макетом кола.

Схема зібрана на макеті, рис.4.1.

Постійна напруга подається на виводи схеми 1, 2. Причому полярність, що зазначена на рис.4.1, необхідно дотримувати.

Зовнішня ємність приєднується до виводів 3, 4.

Етап 2. Вимір значень резистивних опорів.

Виміряти мультиметром значення опорів розташованих на макеті, результати занести в таблицю 4.1.

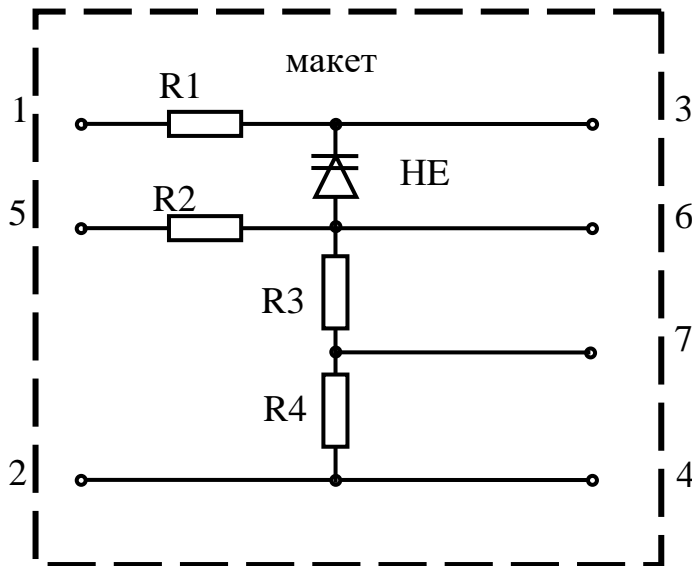


Рисунок 4.1. – Схема макету досліджувального кола

Таблиця 4.1.

Чисельні параметри омичних опорів макету

R1, кОм	R2, кОм	R3, кОм	R4, кОм

Етап 3. Зняття вольт-амперної характеристики нелінійного елемента.

Зібрати схему по рис.4.2, напругу джерела живлення встановити рівною нулю.

Як джерело живлення використовувати вихідну напругу регульованого джерела постійної напруги.

Плавнo збільшуючи вихідну напругу від нульового значення знайти струм вмикання нелінійного елемента $I_{вкл}$.

Зібрати схему по рис.4.3, напругу джерела живлення встановити рівною нулю.

Плавнo збільшуючи вхідну напругу визначити напруга відкриття нелінійного елемента U_0 .

Плавнo зменшуючи вхідну напругу визначити напругу закриття нелінійного елемента U_3 .

Етап 4. Експериментальне визначення напруги при якій генеруються автоколивання.

4.1. Зібрати схему по рис.4.4.

4.4. Зняти осцилограму напруги на ємності C_4 .

4.5. Змінюючи вихідну напругу джерела напруги домогтися виникнення стійких автоколивань напруги на ємності C_4 .

4.6. Зняти з екрана осцилографа криву напруги.

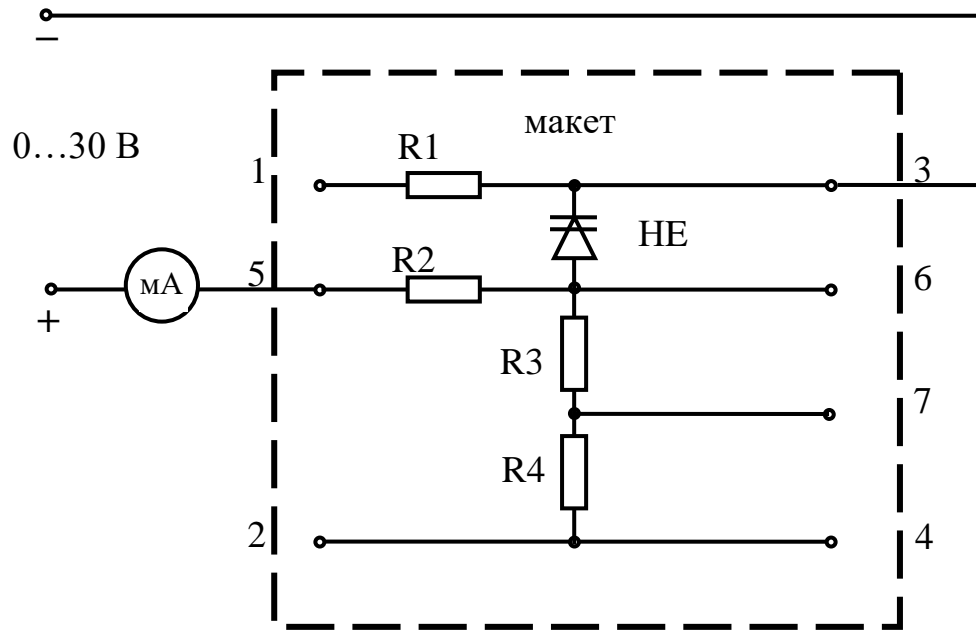


Рисунок 4.2. – Схема дослідження вольт-амперної характеристики нелінійного елемента

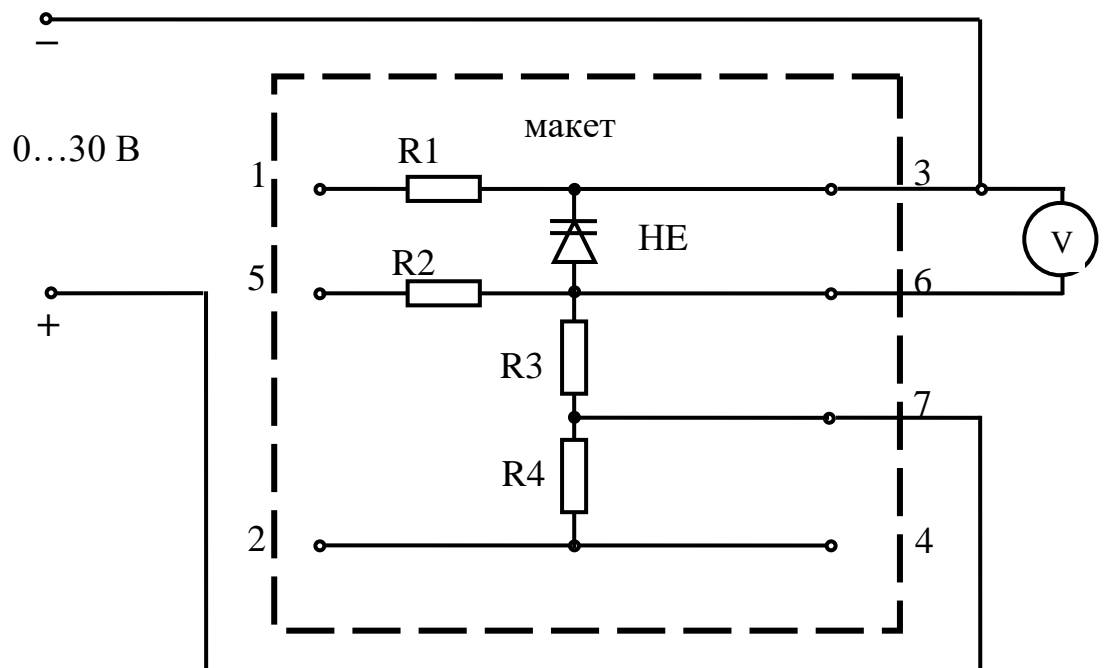


Рисунок 4.3. – Схема дослідження напруги відкриття нелінійного елемента

4.2. Як джерело живлення послідовно з'єднати регульований і нерегульований джерела постійної напруги із блоку постійних напруг.

4.3. Як конденсатор C_4 використовувати регульовану ємність із блоку змінної ємності ($C_4=5\text{мкФ}$).

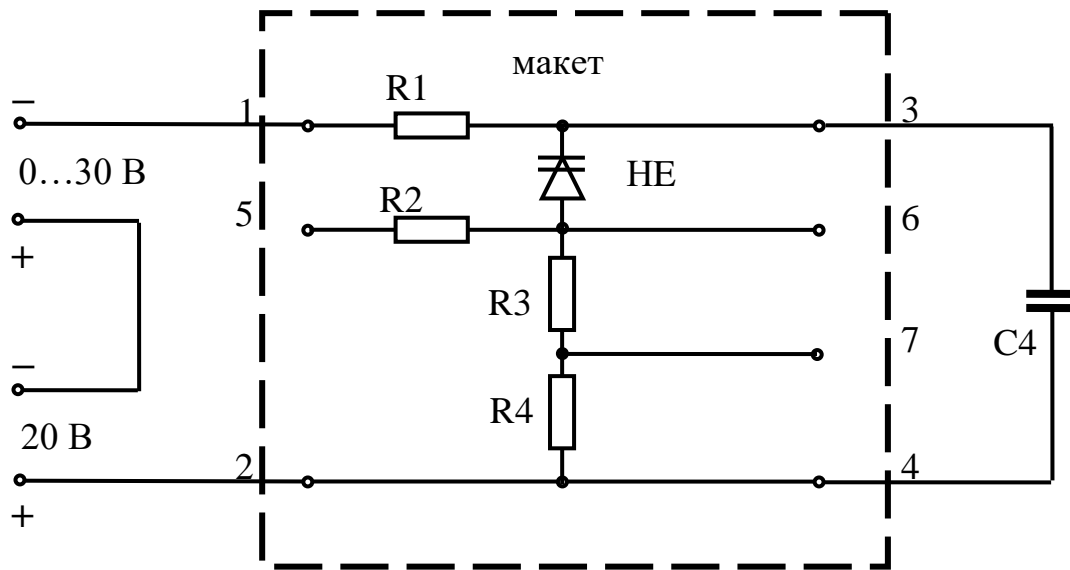


Рисунок 4.4. – Схема дослідження стійких автоколивань у нелінійному колі з від’ємним динамічним опором

Етап 5. Аналіз впливу ємнісного опору на частоту й амплітуду автоколивань.

- 5.1. Збільшити ємність C_4 до значення 10 мкФ.
- 5.2. На екрані осцилографа спостерігати зміни параметрів автоколивань.
- 5.3. Зменшити ємність C_4 до значення 1 мкФ.
- 5.4. На екрані осцилографа спостерігати зміну параметрів автоколивань.

Етап 6. Аналіз впливу резистивного опору на частоту й амплітуду автоколивань.

- 6.1. Установити ємність C_4 рівної 5 мкФ.
 - 6.2. Спостерігати на екрані осцилографа криву напруги на ємності.
 - 6.3. Шунтувати перемичкою (електричним шнуром) резистор R_3 .
 - 6.4. Спостерігати на екрані осцилографа зміни параметрів автоколивань.
7. Розрахунок частоти релаксаційних коливань.
 - 7.1. Розрахувати період заряду й розряду конденсатора.
 - 7.2. Знайти період і частоту релаксаційних коливань.

Звіт повинен містити

1. Номер і найменування роботи.
2. Мета роботи.
3. Програму роботи.
4. Рис.4.4, табл.4.1.
5. Розрахунок частоти релаксаційних коливань.
6. Осцилограму напруги на конденсаторі.
7. Аналіз результатів. Висновки.

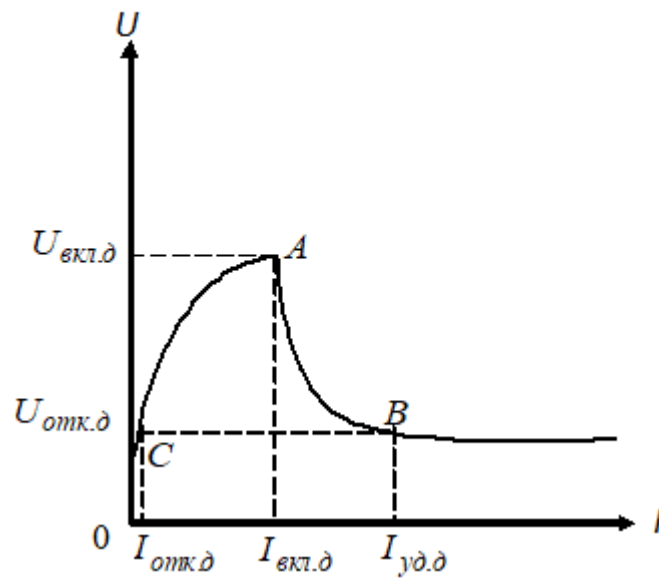


Рисунок 4.4. – Вольт-амперна характеристика нелінійного елемента

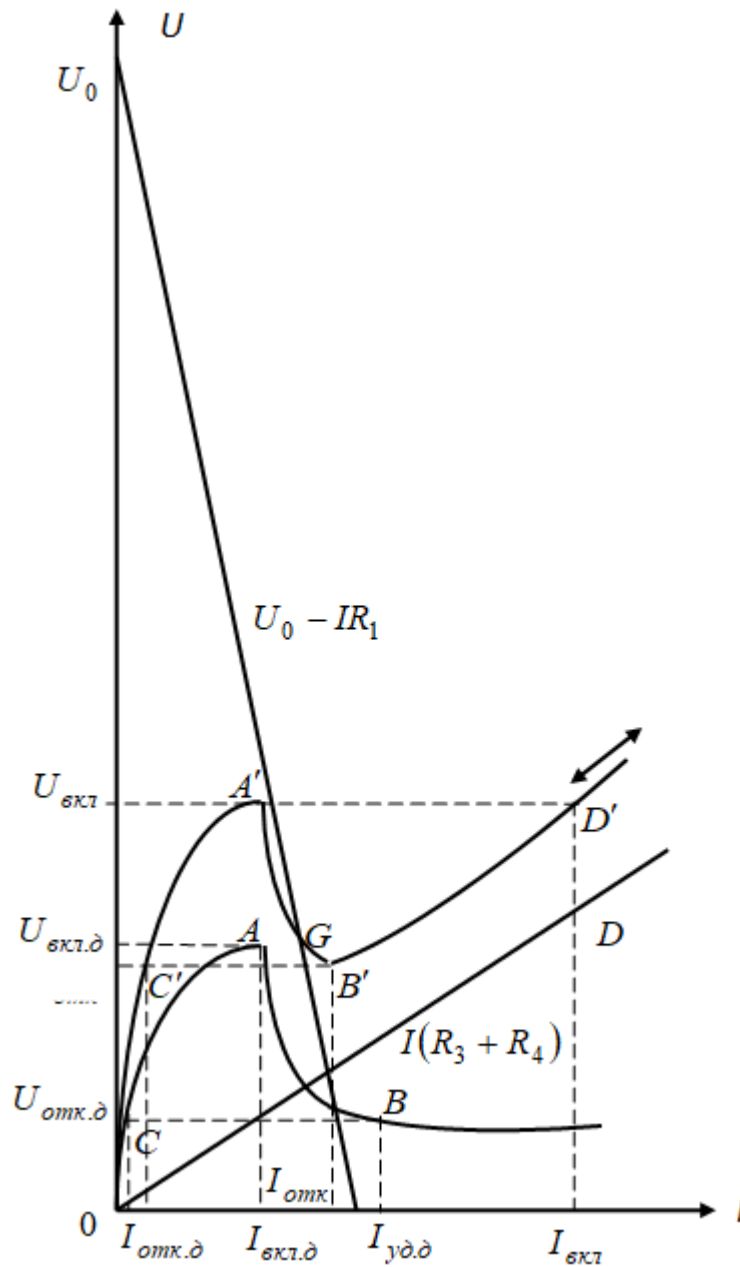


Рисунок 4.5. – Вольт-амперна характеристика нелінійного кола

Методичні вказівки

До етапу 1. Макет зібраний на окремій платі. Схема з'єднань показана на лицьовій панелі макета. Як нелінійний елемент використаний діодний тиристор (діністор) КН102А із від'ємним динамічним опором. Вольт-амперна характеристика діністора показана на рис.4.4.

При підвищенні напруги на діодному тиристорі струм на початку є невеликим й практично не росте, що відповідає ділянці OA вольт-амперної характеристики. У цьому режимі вважається, що діод замикається. При зменшенні струму діодного тиристора менше за значення $I_{уд.д}$ діод стрибком закривається. Відбувається перехід по вольт-амперній характеристиці із точки B у точку C . $U_{отк.д}$ – напруга запирання діода.

До етапу 3. Вольт-амперна характеристика діода визначається за трьома характерними точками A , B , C (рис.4.4). Для зняття точки B використовується джерело напруги. Для зняття крапок A , C використовується джерело струму. При деякому значенні напруги $U_{вкл.д}$, що зветься напругою відкриття (точка A) у діоді виникає лавиноподібний процес і струм діода стрибком зростає до струму включення $I_{вкл.д}$ (точка A) при різкому зменшенні опору діода й падіння на ньому напруги. Діод у точці B відімкнений, опір мал, струм, головним чином, обмежується значенням опору, включеним послідовно із приладом.

До етапу 4. На рис.4.5 наведені вольт-амперні характеристики досліджуваного кола. Характеристика діода представлена відрізками ліній OAB і CB . Послідовно з діодом включений опір R_3 , характеристика якого – пряма лінія OD . Сумарна вольт-амперна характеристика нелінійного елемента й резистора R_3 описується ламаною $OA'D'B'C'O$. Ця характеристика має від'ємний динамічний опір на ділянці $A'B'$. Якщо сумарна вольт-амперна характеристика джерела живлення й резистора R_1 $U_0 - IR_1$ перетинає вольт-амперну характеристику діода й резистора R_3 на нестійкій ділянці $A'B'$ в крапці G , то в колі виникають стійкі автоколивання. Збільшуючи або зменшуючи напругу U_0 можемо вийти за межі ділянки з від'ємним динамічним опором (точка G переміщається за межі відрізка $A'B'$) і автоколивання в колі зриваються, що можна спостерігати на екрані осцилографа.

До етапу 5. Змінюючи значення підключеної до макета ємності переконатися, що розмах напруги автоколивань не змінюється. Зі збільшенням ємності збільшується період і зменшується частота автоколивань.

До етапу 6. Зі зменшенням значення опору підключеному послідовно з діодом збільшується довжина ділянки $A'B'$, що призводить до росту розмаху напруги автоколивань. Зі збільшенням опору послідовно підключеному з нелінійним елементом, розмах напруги автоколивань зменшується. Причому точка G може вийти за ділянку $A'B'$ й автоколивання зривуться. Для поновлення автоколивань при збільшеному опорі необхідно зменшити напругу U_0 .

До етапу 7. Зразковий вид осцилограм перехідних процесів показаний на рис.4.6.

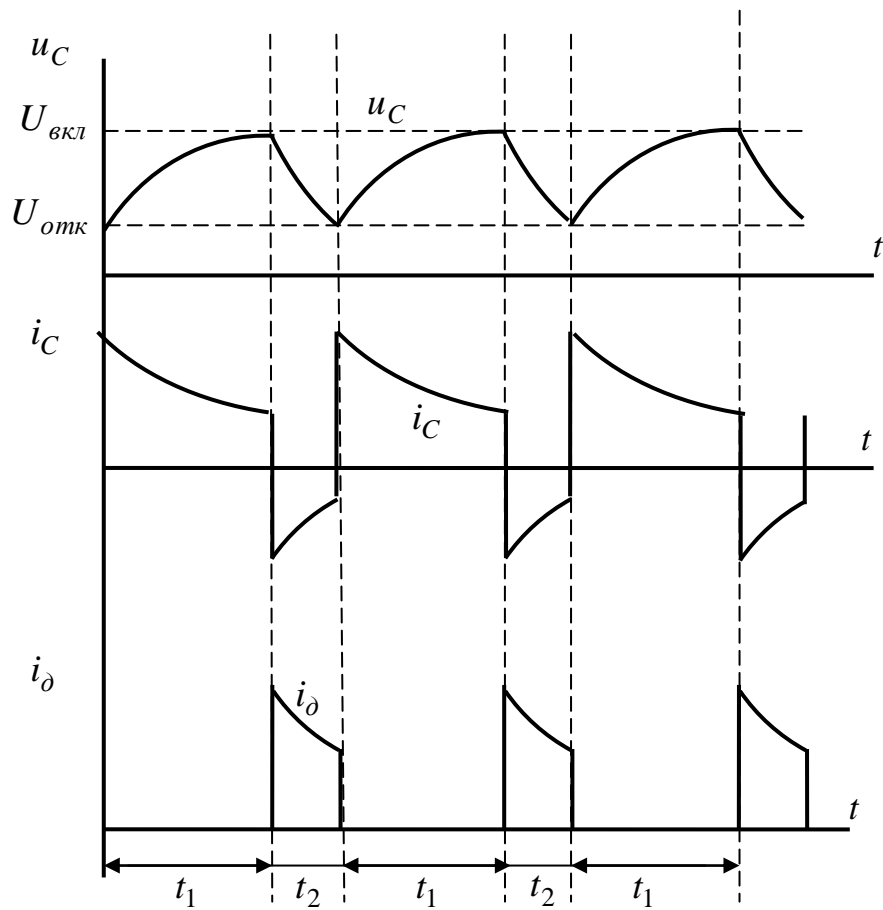


Рисунок 4.6. – Перехідні напруги та струми у автоколивальному нелінійному колі

Час зарядки конденсатора

$$t_1 = \tau_1 \ln \frac{U_0 - U_{вкл}}{U_0 - U_{отк}},$$

$$\tau_1 = R_1 \cdot C_4.$$

Час розряду конденсатора

$$t_2 = \tau_2 \ln \frac{U_{отк}}{U_{вкл}},$$

$$\tau_2 = C_4(R_3 + R_4).$$

Період релаксаційних коливань

$$T = t_1 + t_2, \text{ с.}$$

Частота релаксаційних коливань

$$f = \frac{1}{T}, 1/\text{с.}$$

Контрольні питання

1. Виведіть аналітичні залежності для розрахунку часу наростання напруги на конденсаторі й часу розряду конденсатора.
2. Запишіть умову нестійкості для досліджуваної схеми.
3. Виведіть умову усталеної роботи для схеми, що досліджується.
4. Визначите значення опору R_1 при якому спостерігається граничний коливальний процес, якщо напруга джерела живлення 20 В.
5. Накресліть схему й виберіть прилади для зняття ВАХ нелінійного елемента.
6. Яким чином одержати криву $u_c(t)$ близьку до прямої лінії?
7. Покажіть, як впливає величина опору R_1 на частоту й величину напруги автоколивань?
8. Як впливає ємність на частоту автоколивань?
9. Накресліть еквівалентні схеми для розрахунку струму в колі конденсатора й нелінійного елемента.
10. Покажіть, як впливає величина резистивного опору R_2 на частоту автоколивань.

Список літератури

1. Хілов В.С. Теоретичні основи електротехніки. Київ: видавництво «Каравела», 2021. – 468 с.
2. Khilov V.S. Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering. Dnipro: National Mining University, 2018. – 467 p.
3. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
4. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами : підручник / Ю. О. Карпов, С. Ш. Кацив, В. В. Кухарчук, Ю. Г. Ведміцький ; під ред. проф. Ю. О. Карпова – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 377 с.
5. Теоретичні основи електротехніки: Частина 1. Електричні кола постійного та змінного струму. Чотириполюсники [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ю. В. Перетятко, А. А. Щерба– Електронні текстові дані (1 файл: 21.7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 115 с
6. Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки, частина 1. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2007. 389 с.

Зміст

	Стор.
Передмова	2
Основні правила техніки безпеки при виконанні лабораторного практикуму	3
Лабораторна робота № ТОЕ-3/1. Експериментальне дослідження нелінійного кола постійного струму	4
Лабораторна робота № ТОЕ-3/2. Експериментальне дослідження котушки зі сталевим осердям при змінному струмі	9
Лабораторна робота № ТОЕ-3/3. Експериментальне дослідження явища ферорезонансу напруг у послідовному колі	18
Лабораторна робота № ТОЕ-3/4. Експериментальне дослідження автоколивань у нелінійному колі	25
Список літератури	34

Автор

Хілов Віктор Сергійович

**Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ, ЧАСТИНА 1
(розділи: «Нелінійні електричні кола постійного і змінного струмів»,
"Магнітні кола", "Перехідні процеси в колах з нелінійними елементами"
для студентів спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Друкується в редакції автора.

Підготовлено до виходу в світ
у Національному технічному університеті
«Дніпровська політехніка».
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842
4960050, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19