

**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: «Трифазні кола», «Полігармонічні струми й напруги у однофазних і
трифазних колах», «Перехідні процеси у лінійних електричних колах»)**

**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 1 (розділи: «Трифазні кола», «Полігармонічні струми й напруги у однофазних і трифазних колах», «Перехідні процеси у лінійних електричних колах») для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка /В.С. Хілов; Нац. техн. ун-т. «Дніпровська політехніка» – Д.: НТУ "ДП", 2021. – 54 с.

Автор:

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

Методичні вказівки призначено для виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки, частина 2 (розділи: «Трифазні кола», «Полігармонічні струми й напруги у однофазних і трифазних колах», «Перехідні процеси у лінійних електричних колах»). У 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 різномірними 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.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ ТА СИМЕТРИЧНОМУ ДЖЕРЕЛІ ЖИВЛЕННЯ

Мета роботи

Аналіз режимів роботи трифазних кіл при з'єднанні приймача зіркою та симетричному джерелі живлення.

Програма роботи

1. Складання трифазного симетричного джерела живлення за схемою зірки.
2. Складання трифазного приймача за схемою зірки для випадків навантаження:
 - симетричне однорідне без нульового проводу (трипровідна);
 - симетричне однорідне з нульовим проводом (чотирипровідна);
 - несиметричне однорідне без нульового проводу ;
 - несиметричне однорідне з нульовим проводом ;
 - несиметричне неоднорідне без нульового проводу ;
 - несиметричне неоднорідне з нульовим проводом ;
 - несиметричне неоднорідне без нульового проводу при обриві фази А приймача;
 - несиметричне неоднорідне з нульовим проводом при обриві фази А приймача;
3. Експериментальне дослідження трифазного кола при три- та чотирипровідних схемах і з'єднанні приймача зіркою.
4. Побудова векторних діаграм для трифазних кіл при з'єднанні приймача за схемою зірки з нульовим проводом та без нульового проводу.
5. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Складання трифазного симетричного джерела живлення за схемою зірки.

Скласти електричну схему джерела живлення, яка наведена на рис.1. Як основні елементи схеми використаються однофазні джерела з трифазного блока.

Виміряні лінійні та фазні напруги джерела живлення та одержані результати занести до табл. 1.1.

Навантаження блока трифазної напруги зображено у вигляді пасивного чотириполюсника (рис.1.1). На першому етапі виконання роботи навантаження не вмикається.

Етап 2. Складання трифазного приймача за схемою зірки.

2.1. Як фазні опори використовуються елементи:

за \underline{Z}_A в усіх схемах з'єднання береться резистивний опір R_1 з блока регульованих опорів;

за \underline{Z}_B в усіх однорідних симетричних та несиметричних схемах з'єднання береться резистивний опір R_2 з блока регульованих опорів; у неоднорідних схемах з'єднання береться ємність C_2 з блока регульованих ємностей;

за \underline{Z}_C в однорідних симетричних та несиметричних схемах з'єднання береться резистивний опір R_3 з блока регульованих опорів; у неоднорідних схемах з'єднання береться індуктивність L_2 з блока регульованих індуктивностей (резистивний опір котушки вимірюється мультиметром до вмикання котушки у коло).

Значення фазних опорів заносяться до табл. 1.2.

2.2. Скласти електричне коло трифазного приймача, яке наведено на рис. 1.2. Симетричне трифазне джерело живлення представлено активним чотириполюсником, який збирається за схемою рис. 1.1.

1.3. Після перевірки електричної схеми викладачем, вмикаються джерела живлення.

Етап 3. Експериментальне дослідження трифазного кола при три- та чотирипровідній схемах при з'єднанні приймача зіркою.

3.1. Виміряти напруги на фазах приймача U_A, U_B, U_C , лінійні напруги U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , напругу між нейтральними точками $U_{00'}$. Значення напруг занести до табл. 1.2.

3.2. Виміряти струми в електричному колі, рис. 1.2, вмикаючи міліамперметр по черзі у розщеплення лінійних проводів. Значення струмів занести до табл. 1.2.

Етап 4. Побудова векторних діаграм для трифазних кіл при з'єднанні приймача за схемою зірки з нульовим проводом та без нульового проводу.

У вибраному масштабі за даними табл. 1.1, 1.2 побудувати сумісно векторні діаграми електричних струмів та напруг для з'єднання навантаження зіркою у випадках:

- симетричне однорідне без нульового проводу;
- симетричне однорідне з нульовим проводом;
- несиметричне однорідне без нульового проводу;
- несиметричне однорідне з нульовим проводом;
- симетричне неоднорідне без нульового проводу;
- несиметричне неоднорідне з нульовим проводом;
- симетричне неоднорідне без нульового проводу при обриві фази A приймача;
- несиметричне неоднорідне з нульовим проводом при обриві фази A приймача.

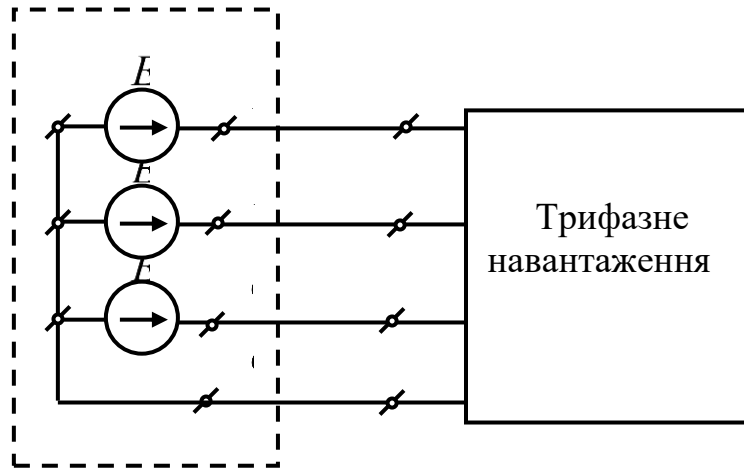


Рис. 1.1. – Чотири провідна трифазна мережа

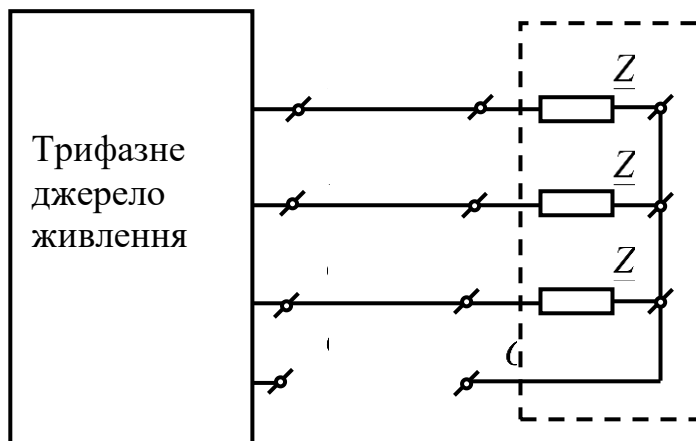


Рисунок 1.2. – Три провідна трифазна мережа

Таблиця 1.1.

Виміряні параметри симетричного трифазного джерела живлення

E_A	E_B	E_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
В	В	В	В	В	В

Звіт повинен містити наступні пункти:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Рис. 1.1, 1.2.
3. Табл. 1.1, 1.2.
4. Розрахункові співвідношення.
5. Векторні діаграми.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Таблиця 1.2.

Значення фазних опорів та виміряні значення напруг і струмів при з'єднанні зіркою

Характер навантаження	Система живлення	Опір фази						Напруга приймача							Струми фаз приймача				
		R_A	X_A	R_B	X_B	R_C	X_C	U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	$U_{00'}$	I_A	I_B	I_C	I_N	
		Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	В	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А	
Симетричний однорідний	3-провідна 4-провідна																		
Несиметричний однорідний	3-провідна 4-провідна																		
Несиметричний неоднорідний	3-провідна 4-провідна																		
Несиметричний неоднорідний, обрив фази А	3-провідна 4-провідна																		

Методичні вказівки

До етапу 1. Для того щоб скласти симетричне трифазне джерело живлення, необхідно та достатньо виконання двох умов: рівність модулів фазних (лінійних) напруг та кут зсуву між фазними (лінійними) напругами повинен бути $2 \cdot \pi / 3$.

Для виконання першої умови до вмикання схеми навантаження мультиметром перевіряються значення фазних ЕРС джерел живлення та декадними перемичками встановлюються напруги порядку 20 В.

З'єднавши однойменні затискачі однофазних джерел живлення (помічені на стенді) у спільну точку, досягають виконання другої умови. Після цього необхідно виміряти лінійні напруги джерела живлення. Якщо джерело живлення симетричне, то модулі лінійних напруг дорівнюють один одному.

Фазні напруги вимірюються між спільною точкою та виводом фази, а лінійні – між виводами відповідних фаз.

До етапу 2. Якщо відомі індуктивність котушки L та ємність конденсатора C , то індуктивний x_L та ємнісний x_C опори визначаються так:

$$x_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L; \quad x_C = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C),$$

де f – промислова циклічна частота живильної напруги, Гц; L – індуктивність, Гн; C – ємність, Ф.

До етапу 4. Рекомендується побудову векторних діаграм починати з фазних та лінійних напруг джерела живлення.

4.1. Векторні діаграми електричного приймача, з'єданого зіркою, без нульового проводу.

Циркулем у масштабі напруг необхідно зробити засічки, які дорівнюють фазним напругам приймача U_A, U_B, U_C , причому кінці цих векторів повинні бути суміщені з кінцями однойменних векторів фазних напруг джерела живлення. Засічки циркулем відкреслюють геометричне місце (трикутник зі сторонами у вигляді дуг). Геометричний центр знайденого трикутника – потенціал загальної точки O' відносно точки джерела живлення O . З'єднавши точки O' та O , знайдемо вектор зсуву напруги нейтралі $U_{OO'}$. З'єднавши геометричний центр трикутника з точками A, B, C на векторній діаграмі, визначимо вектори фазних напруг на приймачі.

Фазні струми відкладаємо на векторній діаграмі за фазами, зсунутими відносно відповідної фазної напруги.

При резистивному опорі струм та напруга співпадають за фазою, а при резистивно – реактивному, зсунуті на кут

$$\varphi = \arctg(x / R),$$

де x – реактивний опір; R – резистивний фазний опір.

4.2. Побудова векторної діаграми електричного приймача, з'єданого зіркою, з нульовим проводом.

У цьому випадку напруги зсуву нейтралі між точками O та O' немає, так як потенціали між нейтральними точками вирівнюються нульовим проводом.

Фазні напруги на приймачеві дорівнюють фазним напругам на джерелі живлення. Добудовуються фазні струми приймача, зсунуті за фазою відносно фазних напруг, а струм у нейтральному проводі знаходиться як геометрична сума фазних струмів.

Контрольні запитання

1. За яких умов трифазна система ЕРС буде симетричною?
2. Як виконується з'єднання трифазного джерела зіркою?
3. Яке співвідношення між лінійними та фазними напругами при з'єднанні зіркою?
4. Що таке зсув нейтралі приймача та як він впливає на режим роботи?
5. Для чого вмикається нейтральний провід?
6. Чому дорівнює сума векторів фазних струмів при з'єднанні зіркою?
7. Як обчислити напругу між нейтральними точками джерела живлення та приймача при обриві фази A ?
8. Як знаходиться активна потужність симетричного трифазного кола, з'єданого зіркою?
9. Чим та в яких випадках відрізняються фазні напруги на джерелі та приймачеві при з'єднанні зіркою?
10. Чи потрібен нейтральний провід при симетричному приймачеві, з'єданому зіркою?

Лабораторна робота ТОВ-2/2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧА ТРИКУТНИКОМ ТА СИМЕТРИЧНОМУ ДЖЕРЕЛІ ЖИВЛЕННЯ

Мета роботи

Аналіз режимів роботи трифазних кіл при з'єднанні приймача трикутником та симетричному джерелі живлення.

Програма роботи

1. Складання трифазного симетричного джерела живлення за схемою зірки.
2. Складання трифазного приймача за схемою трикутника для випадків навантаження:
 - симетричне однорідне;

- несиметричне однорідне;
- неоднорідне;
- неоднорідне при обриві фази А приймача.

3. Експериментальне дослідження трифазного кола при з'єднанні приймача за схемою трикутника.

4. Побудова векторних діаграм для досліджуваних трифазних кіл при з'єднанні приймача за схемою трикутника.

5. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Складання трифазного симетричного джерела живлення за схемою зірки.

Скласти електричну схему джерела живлення, яка наведена на рис. 2.1. Як основні елементи схеми використовуються однофазні джерела з трифазного блока.

Виміряні лінійні та фазні напруги живлення та одержані результати занести до табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Виміряні напруги симетричного джерела трифазної енергії

E_A	E_B	E_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
В	В	В	В	В	В

Навантаження блока трифазної напруги зображено на рис. 2.1 у вигляді пасивного триполюсника. На першому етапі роботи навантаження не вмикається.

Етап 2. Складання трифазного приймача за схемою трикутника.

2.1. Як фазні опори використовуються елементи:

– в усіх схемах з'єднання береться резистивний опір R_2 з блока регульованих опорів;

– в однорідних симетричних та несиметричних схемах з'єднання береться резистивний опір R_2 з блока регульованих опорів; в неоднорідних схемах з'єднання береться ємність C_2 з блока регульованих ємностей;

– в однорідних симетричних та несиметричних схемах з'єднання береться резистивний опір з блока регульованих опорів; в неоднорідних схемах з'єднання береться індуктивність з блока регульованих індуктивностей (резистивний опір котушки вимірюється мультиметром до вмикання котушки в електричне коло).

Значення фазних опорів заносяться до табл. 2.2.

2.2. Скласти електричне коло трифазного приймача, наведеного на рис. 2.2.

Симетричне трифазне джерело живлення надано активним чотириполюсником, який збирається за схемою, яка наведена на рис. 2.1

2.3. Після перевірки електричної схеми викладачем, увімкнуті джерела живлення.

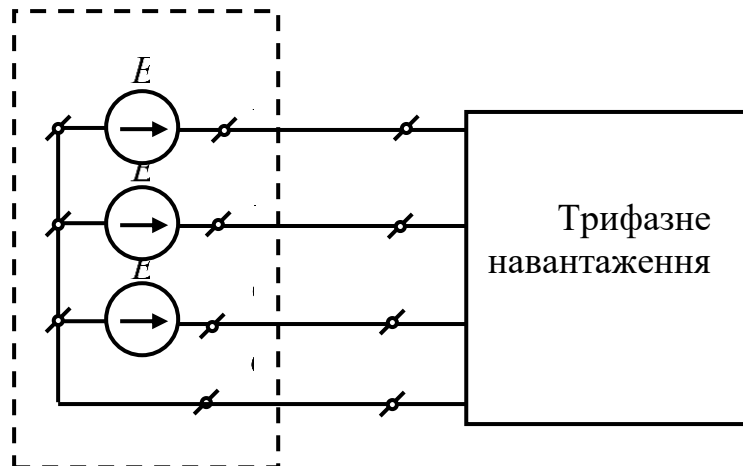


Рисунок 2.1. – Чотири провідна трифазна мережа

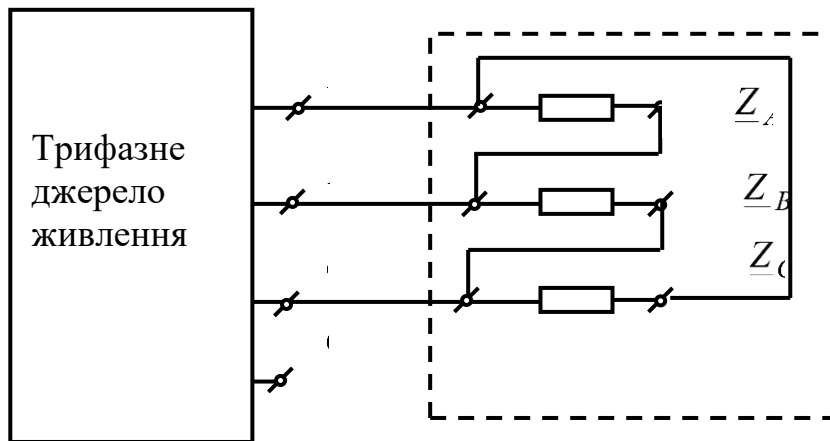


Рисунок 2.2. – Три провідна трифазна мережа

Етап 3. Експериментальне дослідження трифазного кола при з'єднанні приймача за схемою трикутника.

3.1 Виміряти фазні (лінійні) напруги приймача U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} . Знайдені значення занести до табл. 2.2.

3.2. Виміряти струми у вітках трифазного кола (рис. 2.2), вмикаючи міліамперметр по черзі у розщеплення лінійних та фазних проводів. Значення струмів занести до табл. 2.2.

Етап 4. Побудова векторних діаграм для досліджуваних трифазних кіл при з'єднанні приймача за схемою трикутника.

Таблиця 2.2.

Значення фазних опорів та виміряні значення напруг і струмів при з'єднанні трикутником

Характер навантаження	Опір фази						Напруга приймача			Фазні струми			Лінійні струми		
	R_{AB} , Ом	x_{AB} , Ом	R_{BC} , Ом	x_{BC} , Ом	R_{CA} , Ом	x_{CA} , Ом	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	I_{AB} , А	I_{BC} , А	I_{CA} , А	I_A , А	I_B , А	I_C , А
Симетричний однорідний															
Несиметричний неоднорідний															
неоднорідний															
Неоднорідний при обриві фази А приймача															

У вибраному масштабі за даними табл. 2.1, 2.2 побудувати сумісні векторні діаграми електричних струмів та напруг при з'єднання навантаження трикутником у випадках:

- симетричне однорідне;
- несиметричне однорідне;
- неоднорідне;
- неоднорідне при обриві фази A приймача.

Звіт повинен містити наступні пункти:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Рис.2.1, 2.2.
3. Табл.2.1, 2.2.
4. Розрахункові співвідношення.
5. Векторні діаграми.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 4. Рекомендується побудову векторних діаграм починати з фазних та лінійних напруг джерела живлення.

Так як лінійні напруги джерела живлення прикладені до фаз приймача, то побудову векторів напруг джерела живлення можливо обмежити тільки лінійними напругами. Для побудови векторів фазних струмів необхідно розрахувати кут зсуву між фазними струмом та напруги. З урахуванням знайдених кутів на векторній діаграмі у масштабі будуються вектори фазних струмів. Причому, початки векторів напруг та струмів (U_{AB} та I_{AB}) співпадають з точкою B на векторній діаграмі, U_{CA} та I_{CA} - з точкою A , U_{BC} та I_{BC} - з точкою C . Лінійні струми знаходяться як геометрична сума відповідних фазних струмів, тобто

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

Контрольні запитання

1. Чи дорівнює нулю сума миттєвих значень лінійних струмів?
2. Чи дорівнює нулю геометрична сума векторів лінійних струмів?
3. Яке співвідношення між лінійними та фазними струмами при симетричному приймачеві, з'єднаному у трикутник?
4. Як зміниться лінійний струм, якщо спочатку опори фаз навантаження були однаковими, а потім стався розрив кола фази A ?

5. Як зв'язати між собою лінійні та фазні струми при несиметричному навантаженні? Справедливі ці співвідношення при симетричному навантаженні, чи ні?
6. Як зміниться векторна діаграма при несиметричному навантаженні, якщо ємнісний опір у фазі *BC* замінити ідеально індуктивним опором, що дорівнює йому за значенням?
7. Як обчислити активну потужність при симетричному приймачеві, з'єднаному трикутником, через лінійні струм та напругу?
8. Як обчислити реактивну потужність при несиметричному та симетричному навантаженнях, з'єднаних трикутником?
9. Як обчислити повну потужність кола при з'єднанні трикутником та симетричному навантаженні?
10. Як обчислити повну потужність кола при з'єднанні трикутником та несиметричному навантаженні?

Лабораторна робота ТОЕ-2/3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ ПРИ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ ТА НЕСИМЕТРИЧНОМУ ДЖЕРЕЛІ ЖИВЛЕННЯ

Мета роботи

Дослідження методом симетричних складових несиметричних режимів роботи трифазних кіл.

Програма роботи

1. Складання трифазного несиметричного джерела живлення.
2. Приєднання до несиметричного джерела живлення симетричного трифазного приймача за схемою зірка без нульового проводу.
3. Вимірювання фазних струмів симетричного трифазного приймача за схемою зірка без нульового проводу.
4. Приєднання до несиметричного джерела живлення симетричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.
5. Вимірювання фазних струмів симетричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.
6. Приєднання до несиметричного джерела живлення несиметричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.
7. Вимірювання фазних струмів та струмів у нульовому проводі несиметричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.
8. Розрахунок струмів у трифазному колі при несиметричному джерелі живлення та приймачеві, з'єднаному за схемою зірка.

9. Побудова векторних діаграм.
10. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Складання трифазного несиметричного джерела живлення.

1.1. Використовуючи з блока трифазних напруг три джерела ЕРС, скласти за схемою зірка симетричне джерело трифазної напруги ($U_{\phi}=20$ В), рис. 3.1.

1.2. Змінивши початок та кінець будь-якої фази симетричного трифазного джерела живлення, одержати несиметричне джерело за схемою зірка. Виміряти фазні та лінійні напруги, дані занести до табл. 3.1.

Етап 2. Приєднання до несиметричного джерела живлення симетричного трифазного приймача за схемою зірка без нульового проводу.

Використовуючи нерегульовані опори блока активних опорів, скласти симетричний трифазний приймач за схемою зірка без нульового проводу, рис. 3.2. Симетрію фазних опорів перевірити мультиметром, працюючим у режимі вимірювання опорів. Значення опорів не повинні відрізнятися один від одного більш ніж на 5 %, в іншому разі додатковими опорами вирівняти значення опорів. Значення фазних опорів записати.

Етап 3. Вимірювання фазних струмів симетричного трифазного приймача за схемою зірки без нульового проводу.

Вмикаючи по черзі міліамперметр у розщеплення лінійних проводів, виміряти струми ліній I_A, I_B, I_C та їх значення занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.1.

Виміряні напруги несиметричного джерела трифазної енергії

E_A	E_B	E_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
В	В	В	В	В	В

Етап 4. Приєднання до несиметричного джерела живлення симетричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.

Не змінюючи схему, складену на етапі 2 (рис. 3.2), з'єднати нульові точки джерела живлення O та навантаження O' .

Етап 5. Вимірювання фазних струмів симетричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.

Міліамперметром виміряти струми ліній I_A, I_B, I_C та нульового проводу I_N . Одержані дані занести до табл. 3.2.

Етап 6. Приєднання до несиметричного джерела живлення несиметричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.

У схемі, складеній на етапі 4, збільшити значення одного з фазних опорів (приблизно у два рази). Значення фазних опорів записати.

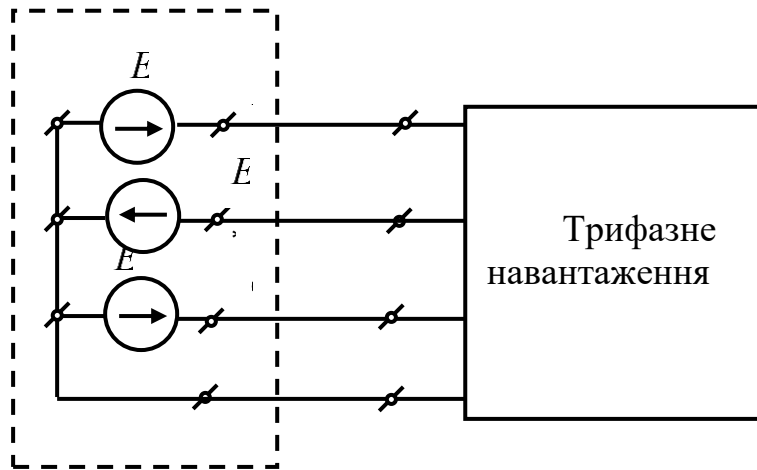


Рисунок 3.1 – Чотири провідна мережа з несиметричним трифазним джерелом живлення



Рисунок 3.2. – Чотири провідна мережа з несиметричним трифазним джерелом живлення та симетричним активним навантаженням

Етап 7. Вимірювання фазних струмів у нульовому проводі несиметричного трифазного приймача за схемою зірка з нульовим проводом.

Вмикаючи міліамперметр у лінійні проводи та в нульовий провід, виміряти струми. Одержані значення занести до табл. 3.2.

Етап 8. Розрахунок струмів у трифазному колі при несиметричному джерелі живлення та приймачеві, з'єднаному за схемою зірка.

8.1. Розрахувати симетричні складові: нульову, пряму та зворотну послідовності несиметричного трифазного джерела живлення. За початкові дані беруться значення напруг фаз, що зведені у табл. 3.1.

Знайдені значення прямої \dot{E}_{A1} , зворотної \dot{E}_{A2} та нульової \dot{E}_{A0} складових фазних напруг занести до табл. 3.2.

8.2. За знайденими симетричними складовими фазних напруг обчислюються симетричні складові фазних струмів та струму нульової послідовності при:

- симетричному навантаженні без нульового проводу;

Таблиця 3.2.

Розраховані та вимірні параметри трифазної мережі з несиметричним джерелом живлення

Схема навантаження	Виміряно				Розраховано									
	I_A	I_B	I_C	I_N	E_{A1}	E_{A2}	E_{A0}	I_{A1}	I_{A2}	I_{A0}	I_A	I_B	I_C	I_N
	A	A	A	A	B	B	B	A	A	A	A	A	A	A
Симетрична зірка без нульового проводу														
Симетрична зірка з нульовим проводом														
Несиметрична зірка з нульовим проводом														

- симетричному навантаженні з нульовим проводом;
- несиметричному навантаженні з нульовим проводом.

Результати розрахунку занести до табл. 3.2.

8.3. За одержаними симетричними складовими знайти фазні струми та струм у нейтральному проводі. Одержані дані записати до табл. 3.2. Розрахунок виконати для симетричного навантаження з нульовим проводом.

Етап 9. Побудова векторних діаграм.

У масштабі побудувати сумісно векторні діаграми струмів та напруг для дослідження трьох видів навантаження.

Звіт повинен містити наступні пункти:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Рис. 3.1, 3.2.
3. Табл. 3.1, 3.2.
4. Розрахункові співвідношення.
5. Векторні діаграми для:
 - симетричного навантаження без нульового проводу;
 - симетричного навантаження з нульовим проводом;
 - несиметричного навантаження з нульовим проводом.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1. Для того щоб трифазне джерело живлення було симетричним, необхідно виконання двох умов:

- однакові значення модулів фазних (лінійних) напруг;
- однаковий кут зсуву між фазними векторами.

Якщо в симетричному трифазному джерелі живлення змінити початок та кінець будь-якої фази, то при однакових значеннях модулів фазних напруг будуть неоднаковими модулі лінійних напруг та кут зсуву між векторами фазних напруг.

Зміна початку та кінця фази розвертає вектор фазної напруги на кут у 180° .

До етапу 8. Розрахунок струмів у трифазному колі при несиметричному джерелі живлення.

З'єднання приймача за схемою симетричної зірки без нульового проводу.

Струми ліній знаходяться за складовими прямої та зворотної послідовностей:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} = a^2 \cdot \dot{I}_{A1} + a \cdot \dot{I}_{A2}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} = a \cdot \dot{I}_{A1} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2}, \end{cases}$$

де a – поворотний множник з одиничним модулем $a = 1 \cdot e^{j120^\circ}$; $\dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}$ – складові прямої та зворотної послідовностей струмів $\dot{I}_{A1} = \dot{E}_{A1} / \underline{Z}_\phi$, $\dot{I}_{A2} = \dot{E}_{A2} / \underline{Z}_\phi$; $\dot{E}_{A1}, \dot{E}_{A2}$ – складові прямої та зворотної послідовностей ЕРС джерела трифазної напруги $\dot{E}_{A2} = (\dot{U}_A + a^2 \cdot \dot{U}_B + a \cdot \dot{U}_C) / 3$, $\dot{E}_{A1} = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / 3$;

$\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – напруги фаз джерела живлення, модулі яких беруться за даними табл. 3.1, а початкові фази знаходяться відносно фаз симетричного живлення з поворотом на 180° фази, у котрій змінюються початок та кінець.

8.2. З'єднання навантаження симетричною зіркою з нульовим проводом.

Струми фаз у нейтральному проводі знаходяться за складовими:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} = a^2 \cdot \dot{I}_{A1} + a \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} = a \cdot \dot{I}_{A1} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \\ \dot{I}_N = \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{B0} + \dot{I}_{C0} = 3 \cdot \dot{I}_{A0}, \end{cases}$$

де складові нульової, прямої та зворотної послідовностей відповідно $\dot{I}_{A1} = \dot{E}_{A1} / \underline{Z}_\phi$, $\dot{I}_{A0} = \dot{E}_{A0} / (\underline{Z}_\phi + 3 \cdot \underline{Z}_N)$, $\dot{I}_{A2} = \dot{E}_{A2} / \underline{Z}_\phi$, $\dot{E}_{A0} = (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C) / 3$, при обчисленні \dot{E}_{A0} використовуються вектори напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ як і при обчисленні складових $\dot{E}_{A1}, \dot{E}_{A2}$.

8.3. З'єднання навантаження несиметричною зіркою з нульовим проводом.

Складові прямої, зворотної та нульової послідовностей струму фази A знаходяться з розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{E}_{A0} = \dot{I}_{A1} \cdot \underline{Z}'_1 + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}'_2 + \dot{I}_{A0} \cdot \underline{Z}'_0; \\ \dot{E}_{A1} = \dot{I}_{A1} \cdot \underline{Z}'_0 + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}'_1 + \dot{I}_{A0} \cdot \underline{Z}'_2; \\ \dot{E}_{A2} = \dot{I}_{A1} \cdot \underline{Z}'_2 + \dot{I}_{A2} \cdot \underline{Z}'_0 + \dot{I}_{A0} \cdot \underline{Z}'_1, \end{cases}$$

де опори обчислюють за співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \underline{Z}'_0 &= (\underline{Z}_A + \underline{Z}_B + \underline{Z}_C) / 3; \\ \underline{Z}'_1 &= (\underline{Z}_A + a^2 \cdot \underline{Z}_B + a \cdot \underline{Z}_C) / 3; \\ \underline{Z}'_2 &= (\underline{Z}_A + a \cdot \underline{Z}_B + a^2 \cdot \underline{Z}_C) / 3. \end{aligned}$$

За симетричними складовими струмів $\dot{I}_{A0}, \dot{I}_{A1}, \dot{I}_{A2}$ знаходяться вектори струмів:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \\ \dot{I}_B = a^2 \cdot \dot{I}_{A1} + a \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \\ \dot{I}_C = a \cdot \dot{I}_{A1} + a^2 \cdot \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{A0}; \\ \dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3 \cdot \dot{I}_{A0}. \end{cases}$$

До етапу 9. Знаючи модулі та фази напруг і струмів, побудувати у масштабі на комплексній площині сумісно векторні діаграми:

- для симетричного навантаження без нульового проводу;
- для симетричного навантаження з нульовим проводом;
- для несиметричного навантаження з нульовим проводом.

Контрольні запитання

1. Наведіть аналітичні співвідношення для виділення нульової, прямої та зворотної послідовностей, якщо відома вихідна несиметрична трифазна система напруг.
2. Сформулюйте необхідні та достатні умови, при яких трифазна система векторів напруг (струмів) буде симетричною.
3. За відомими вихідними векторами $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}$ побудуйте вектори фазних напруг $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$.
4. Накресліть та поясніть однофазні заступні схеми для нульової складової струмів при симетричному навантаженні за схемою зірка без нульового проводу.
5. Накресліть та поясніть однофазні заступні схеми для фазних струмів при симетричному навантаженні за схемою зірка без нульового проводу.
6. Запишіть систему рівнянь, в якій знаходяться симетричні складові струму фази A при несиметричному трифазному приймачеві та несиметричному джерелі живлення.
7. Як зміниться система рівнянь, що записана згідно з вихідними даними шостого контрольного запитання, при наявності опорів у нульовому проводі?
8. Обчисліть степінь несиметрії досліджуваної трифазної системи.
9. Обчисліть потужність, яка виділяється у симетричному приймачеві при несиметричному джерелі живлення.
10. Чому при симетричному навантаженні в нульовому проводі протікають струми нульової складової?

Лабораторна робота ТОЕ-2/4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК В ОДНОФАЗНИХ КОЛАХ

Мета роботи

Гармонічний аналіз та розрахунок струмів однофазного кола при несинусоїдній вхідній напрузі.

Програма роботи

1. Складання досліджуваного електричного кола.
2. Осцилографування та вимірювання несинусоїдних напруг і струмів ділянок однофазного кола. Вимірювання активної потужності електричного кола.
3. Визначення гармонічного складу вхідної напруги.
4. Розрахунок струмів кола та побудова розрахованих струмів.
5. Розрахунок активної потужності електричного кола.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Складання досліджуваного електричного кола.

1.1. Скласти електричну схему, що наведено на рис. 1. Як основні елементи схеми використовуються:

джерело живлення $e(t)$ – ЕРС однієї фази з блока трифазної напруги (20 В, 50 Гц);

напівпровідниковий діод VD – перетворювач гармонічних складових вхідної ЕРС;

резистори для вимірювання струмів ($R_u = 1 \dots 2$ Ом);

резистивний елемент електричного кола $R = 75 \dots 100$ Ом;

катушка L_2 – нерегульована індуктивність з блока індуктивності.

Величину індуктивності L_k визначено на лицевій панелі стенда. До вмикання індуктивності в електричне коло мультиметром вимірюється внутрішній резистивний опір котушки R_k . Параметри котушки записуються.

1.2. Після перевірки електричної схеми викладачем, увімкнути джерело живлення.

Етап 2. Осцилографування та вимірювання несинусоїдних напруг і струмів ділянок однофазного кола. Вимірювання активної потужності електричного кола.

2.1. Увімкнути живлення осцилографа та приєднати вимірювальний кабель до вхідного роз'єднувача осцилографа. Вимірювальні виводи кабелю

перемкнути поміж собою. Перемикач входу “ \swarrow ” \searrow ” повинен бути у положенні “ \swarrow ” (відкритий вхід).

Добитися сталого зображення посередині екрану осцилографа нульової лінії.

2.2. Вимірювальні виводи осцилографа під'єднати паралельно з опором R . Добитися зручного масштабу для вертикального відхилення променя та ще раз по осі часу перевірити нульову лінію на екрані осцилографа. Після цього перенести криву живильної напруги з екрану осцилографа на кальку (напруги на опорі R) або сфотографувати її. Записати в звіт з лабораторної роботи масштаби по осях часу та вертикального відхилення.

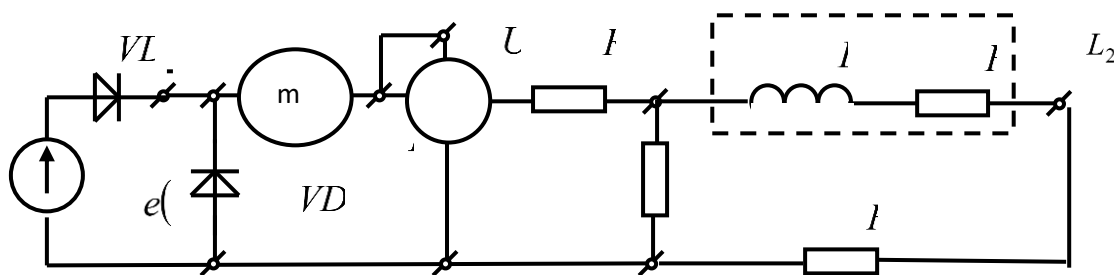


Рисунок 4.1. – Схема експериментального дослідження вищих гармонік у однофазному колі

2.3. Залишивши вимірювальні виводи осцилографа на опорі, переключити перемикач входу з положення “ \swarrow ” (відкритий вхід) у положення “ \searrow ” (закритий вхід). Зсув кривої напруги по вертикальній осі дає в масштабі нульову (постійну) напругу джерела живлення U_0 . Значення нульової напруги записати.

2.4. Вольтметром електромагнітної системи заміряти напругу U на виході джерела живлення. Результати занести до табл. 4.1.

2.5. Міліамперметром електромагнітної системи заміряти струми у вітках і дані занести до табл. 4.1.

2.6. Приєднати вимірювальні виводи осцилографа до резисторів R_u вхідної вітки та у вітці з котушкою. У цих вітках зарисувати (сфотографувати) осцилограми струмів (перемикач входу в положенні “ \swarrow ”).

2.7. Переводячи перемикач входу осцилографа з положення відкритого в положення закритого входу за вертикальним зсувом кривих струмів знайти постійний струм у вітках. Числові значення постійних струмків занести до табл.4.1.

2.8. За показаннями ватметра встановити значення витраченої активної потужності і записати його.

Етап 3. Визначення гармонічного складу вхідної напруги.

Використовуючи графоаналітичний спосіб Перрі, знайти амплітуди та початкові фази гармонік для осцилограми несинусоїдної напруги (коефіцієнти ряду Фур'є). Обчислити нульову, першу, другу та третю гармоніки. Отримані дані занести до табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Виміряні та розраховані значення вищих гармонік у однофазному колі

Вітка	Виміряно				Розраховано						
	$U_{(0)}$, В	U , В	$I_{(0)}$, мА	I , мА	$U_{(0)}$, В	U , В	$I_{(0)}$, мА	$I_{(1)}$, мА	$I_{(2)}$, мА	$I_{(3)}$, мА	I , мА
Вхідна											
Резисти вна											
Резисти вно- індукти вна											

Етап 4. Розрахунок струмів кола, побудова у часі вхідного струму.

4.1. Обчислити опори віток для гармонік живильної напруги.

4.2. Розрахувати від усіх гармонік напруг струми у вітках електричного кола.

Знайдені значення струмів занести до табл. 4.1.

4.3. За обчисленими даними побудувати в функції часу графік струму вхідної вітки.




Етап 5. Розрахунок активної потужності електричного кола.


За отриманими значеннями напруг та струмів віток знайти втрачену активну потужність електричного кола.

Звіт повинен містити наступні пункти:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Рис. 4.1, табл. 4.1.
3. Осцилограми:
 - живильної напруги;
 - струму вхідної вітки;
 - струму вітки з резистром R ;
 - струму вітки з котушкою;
4. Розрахунок коефіцієнтів ряду Фур'є для живильної напруги та струмів віток.
5. Побудований графік струму вхідної вітки.
6. Розрахунок активної потужності.
7. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 2. Перемикач входу осцилографа “” “” у положенні “” (відкритий вхід) передає сигнал на вхід атенюатора (частотно-компенсований

подільник напруги) безпосередньо, а у положенні “” (закритий вхід) - через розділову ємність.

Масштаб струму m_i визначається за масштабом напруги m_u та величиною вимірювального опору R_u , тобто

$$m_i = m_u / R_u .$$

Вольтметр, міліамперметр електромагнітної системи вимірюють діюче значення несунсоїдних напруги та струму.

Постійні складові напруги та струмів можливо виміряти також вольтметром та міліампером магнітно-електричної системи.

До етапу 3. Визначення гармонічного складу вхідної напруги.

Ряд Фур'є відносно напруги на виході несунсоїдного джерела живлення такий:

$$U(\omega \cdot t) = U_{(0)} + \sum_{k=1}^3 U_{(k)m} \sin(k \cdot \omega \cdot t + \varphi_k),$$

де $U_{(0)}$ – постійна складова; k – номер гармоніки; $U_{(k)m}$ – амплітудне значення k -ї гармоніки; φ_k – початкова фаза k -ї гармоніки.

Співвідношення для розрахунку параметрів другої форми запису ряду Фур'є наведено нижче:

$$U_{(0)} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{p=1}^N U(x); \quad U_{(k)m} = \sqrt{(U'_{(k)m})^2 + (U''_{(k)m})^2};$$

$$U'_{(k)m} = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N U(x) \sin(kx); \quad U''_{(k)m} = \frac{2}{N} \sum_{p=1}^N U(x) \cos(kx);$$

$$\varphi_k = \arctg \frac{U''_{(k)m}}{U'_{(k)m}}; \quad x = (p - 0,5) \cdot 2 \cdot \pi / N; k = 1, 2, 3, \dots,$$

де N – кількість інтервалів розбиття періоду (рекомендується для досліджуваної форми напруги прийняти $N=24$); p – поточний номер інтервалу; $x = p \cdot \Delta t$ – дискретний час.

Значення $U(x)$ необхідно брати для середини інтервалу p , що дозволяє зменшити похибку розрахунку початкової фази φ_k .

Для полегшення розрахунків рекомендується використати табл.4.2.

До етапу 4. Розрахунок струмів кола, побудова розрахованих струмів.

Струми розрахувати для нульової, першої, другої та третьої гармонік. Так, для вітки з активно –індуктивним навантаженням миттєве значення струму

Таблиця 4.2.

Розрахунок складових вищих гармонік

Ординати ($N=24$)	$k=1$					$k=2$					$k=3$				
	x	$\text{Sin}(x)$	$\text{Cos}(x)$	$\text{upSin}(x)$	$\text{upCos}(x)$	$2x$	$\text{Sin}(2x)$	$\text{Cos}(2x)$	$\text{upSin}(2x)$	$\text{upCos}(2x)$	$3x$	$\text{Sin}(3x)$	$\text{Cos}(3x)$	$\text{upSin}(3x)$	$\text{upCos}(3x)$
u_1															
u_2															
u_3															
u_4															
u_5															
u_6															
u_7															
u_8															
u_9															
u_{10}															
u_{11}															
u_{12}															
\dots															
u_{22}															
u_{23}															
u_{24}															

$$i(\omega \cdot t) = I_{(0)} + I_{(1)m} \sin(\omega \cdot t + \psi_1 - \varphi_1) + \\ + I_{(2)m} \sin(2 \cdot \omega \cdot t + \psi_2 - \varphi_2) + I_{(3)m} \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \psi_3 - \varphi_3) + \dots$$

де $I_{(0)} = U_0 / R_k$; $I_{(1)m} = U_{(1)m} / \sqrt{R_k^2 + (\omega \cdot L_k)^2}$;

$$I_{(2)m} = U_{(2)m} / \sqrt{R_k^2 + (2 \cdot \omega \cdot L_k)^2}; I_{(3)m} = U_{(3)m} / \sqrt{R_k^2 + (3 \cdot \omega \cdot L_k)^2};$$

$U_{(1)m}, U_{(2)m}, U_{(3)m}, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – амплітуди та початкові значення фази гармонік напруги: $\varphi_1 = \arctg(\omega \cdot L_k / R_k)$; $\omega = 314$ рад/с.

Діюче значення несинусоїдних напруги та струму цієї вітки відповідно:

$$U = \sqrt{U_{(0)}^2 + U_{(1)}^2 + U_{(2)}^2 + U_{(3)}^2}; I = \sqrt{I_{(0)}^2 + I_{(1)}^2 + I_{(2)}^2 + I_{(3)}^2},$$

де $U_{(0)}, U_{(1)}, U_{(2)}, U_{(3)}$ – діючі значення гармонік напруги; $I_{(0)}, I_{(1)}, I_{(3)}, I_{(2)}$ – діючі значення гармонік струму. При побудові часових діаграм гармонік струмів масштаб по осі ординат m_i треба приймати однаковим для всіх гармонік, а масштаб по осі абсцис $m_{\omega \cdot t}$ треба приймати рівним $m_{\omega \cdot t} \cdot k$ (k – номер гармоніки).

До етапу 5. Розрахунок активної потужності електричного кола.

Активна потужність, що витрачається у цьому електричному колі, визначається як сума активних потужностей гармонік:

$$P = \sum_{k=0}^3 (P_{(k)L} + P_{(k)R}),$$

де k – номер гармоніки; $P_{(k)L}$ – активна потужність для k -ї гармоніки у вітці з резистивно-індуктивним навантаженням; $P_{(k)R}$ – активна потужність для k -ї гармоніки у вітці з резистивним навантаженням. Витратами активної потужності у вимірювальних резисторах нехтуємо.

Контрольні запитання

1. Наведіть основні випадки симетрії періодичних функцій та їх вплив на коефіцієнти ряду Фур'є.
2. Напишіть формули для обчислення постійної складової ряду Фур'є.
3. Напишіть основні формули для розрахунку струмів у лінійному колі при несинусоїдній напрузі джерела.
4. Чи можливий при з'єднанні сумісно R, L, C елементів одночасно резонанс напруг та резонанс струмів?
5. Запишіть вирази для розрахунку діючих значень струмів та напруг.

6. Яка різниця між середнім за модулем значенням та постійною складовою струму?
7. Пристроями якої системи можливо виміряти постійну складову?
8. Як змінюється форма кривої струму від навантаження R, L, C ?
9. Якими коефіцієнтами можливо характеризувати несинусоїдні періодичні криві?
10. На якому принципі ґрунтується метод розрахунку струмів у лінійних колах при живленні від несинусоїдного джерела напруги?

Лабораторна робота ТОЕ-2/5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИЩІХ ГАРМОНІК У ТРИФАЗНИХ КОЛАХ

Мета роботи

Гармонічний аналіз напруг та струмів трифазного кола при несинусоїдній напрузі.

Програма роботи

1. Складання трифазного несинусоїдного джерела живлення.
2. Осцилографування лінійних та фазних напруг трифазного несинусоїдного джерела живлення.
3. Приєднання до трифазного несинусоїдного джерела живлення приймача за схемою симетричної зірки без нульового проводу.
4. Дослідження гармонічного складу напруг та струмів у трифазному колі.
5. Приєднання до трифазного несинусоїдного джерела живлення приймача за схемою симетричної зірки з нульовим проводом.
6. Дослідження гармонічного складу напруг у трифазному чотирипровідному колі.
7. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Складання трифазного несинусоїдного джерела живлення.

1.1. Скласти електричну схему, яка надана на рис. 5.1. Як основні елементи схеми використовуються: однофазні джерела живлення $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ – з блоку трифазної напруги ($E_A = E_B = E_C = 30$ В);

1.2. Однофазні трансформатори 1, 2, 3 – знаходяться знизу набірного поля.

1.3. Після перевірки електричної схеми трифазного несиметричного джерела викладачем, увімкнути живлення.

Етап 2. Осцилографування лінійних та фазних напруг трифазного несинусоїдного джерела живлення.

2.1. Увімкнути електронний осцилограф в електричну мережу.

2.2. Приєднаючи вимірювальні виводи осцилографа спочатку на фазні напруги $(\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C)$, а потім на лінійні напруги $(\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA})$ трифазного несиметричного джерела живлення.

2.3. Зарисувати на кальку (або сфотографувати) фазну та лінійну напруги трифазного несинусоїдного джерела живлення з екрану осцилографа.

2.4. На базі форм кривих напруг зробити візуально гармонічний аналіз. Отримані результати аналізу записати до табл. 5.1. При наявності гармоніки у досліджуваній кривій у таблиці проставити “+”; при її відсутності проставити у таблиці “-”.

Етап 3. Приєднання до трифазного несинусоїдного джерела живлення приймача за схемою симетричної зірки без нульового приводу.

3.1. Скласти електричне коло, яке наведено на рис. 2. Як основні елементи схеми використовуються:

- трифазне несинусоїдне джерело живлення, яке складено на першому етапі роботи;
- фазні опори R_1, R_2, R_3 – резистивні опори з блока регульованих опорів ($R_1 = R_2 = R_3$).

3.2. Після перевірки електричної схеми викладачем, увімкнути джерело живлення.

Етап 4. Дослідження гармонічного складу напруг та струмів у трифазному колі.

4.1. Приєднати вимірювальні виводи осцилографа спочатку на фазні напруги, а потім на лінійні напруги приймача.

На базі форм кривих напруг зробити візуально гармонічний аналіз, отримані результати занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Візуальний гармонічний аналіз

Номер гармоніки	Наявність гармоніки							
	Джерело живлення		Трипровідний приймач			Чотирипровідний приймач		
	U_L	U_ϕ	U_L	U_ϕ	U_N	U_L	U_ϕ	I_N
1								
3								

4.3. Приєднати вимірювальні виводи осцилографа між нейтральними точками джерела живлення та приймача. До табл. 5.1 занести гармонічний склад напруги зсуву U_N .

4.4. Електромагнітним вольтметром виміряти лінійні й фазні напруги на джерелі та приймачеві в трипровідному електричному колі.

4.5. Електромагнітним міліамперметром виміряти струми трифазного кола. Значення записати до табл. 5.2.

Етап 5. Приєднання до трифазного несинусоїдного джерела живлення приймача за схемою симетричної зірки з нульовим проводом.

У схемі, складеній на третьому етапі (рис. 5.2), з'єднати точки O та O' через вимірювальний опір $R_u = 1 \dots 2$ Ом.

Етап 6. Дослідження гармонічного складу напруг та струмів у трифазному чотирипровідному колі.

6.1. Приєднати вимірювальні виводи осцилографа на фазні, лінійні напруги приймача, а потім на вимірювальний опір між нейтральними точками джерела та приймача.

6.2. На базі візуального гармонічного аналізу заповнити відповідні рядки табл.1.

6.3. Електромагнітним вольтметром виміряти лінійні та фазні напруги на приймачеві. Значення напруг занести до табл. 5.2.

6.4. Електромагнітним міліамперметром виміряти струми трифазного кола. Значення занести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

Виміряні струми трифазного кола

Джерело живлення		Три провідний приймач				Чотири провідний приймач			
$U_L, В$	$U_\phi, В$	$U_L, В$	$U_\phi, В$	$U_N, В$	$I_\phi, мА$	$U_\phi, В$	$I_N, мА$	$U_L, В$	$I_\phi, мА$

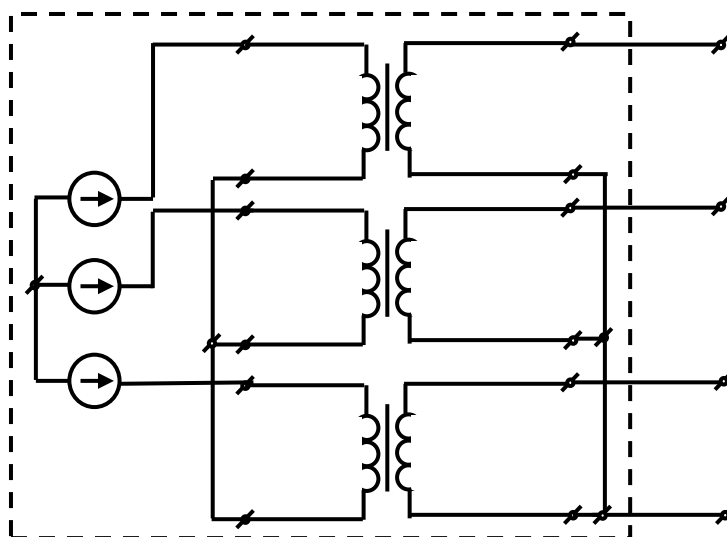


Рисунок 5.1. – Трифазне несинусоїдальне джерело живлення

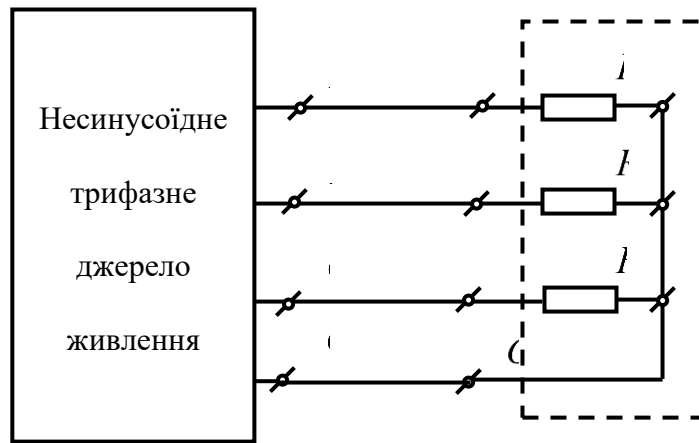


Рисунок 5.2. – Трифазна чотири провідна несинусоїдальна мережа

Звіт повинен містити наступні пункти:

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Рис. 1, 2.
3. Табл. 1, 2.
4. Осцилограми фазної та лінійної напруги трифазного несинусоїдного джерела живлення.
5. Розрахункові співвідношення.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1. Поява третіх гармонік у кривих ЕРС вторинних обмоток трансформаторів обумовлено нелінійністю феромагнітного магнітопроводу. Фізичні основи цього явища вивчаються у розділі “Нелінійні електричні кола при змінних струмах”.

У трифазному несинусоїдному джерелі живлення фазні ЕРС повторюють за формою одна одну із зсувом на третину періоду коливання.

Так як крива фазної ЕРС симетрична відносно осі часу, то при розкладанні у ряд Фур'є будуть тільки парні несинусоїдні складові. З урахуванням того, що в міру збільшення номеру гармоніки її питома вага швидко зменшується, то при дослідженні трифазного електричного кола без великої похибки досить врахувати тільки першу та третю синусоїдні складові.

До етапу 4. При з'єднанні трифазного джерела за схемою зірки лінійні напруги дорівнюють різниці відповідних фазних ЕРС або напруг. Через те, що треті та кратні трьом гармоніки ЕРС (напруг) співпадають за фазою, то їх різниця дорівнює нулю. Отже, у лінійній напрузі відсутні треті та кратні трьом гармоніки.

Діюче значення лінійної напруги

$$U_L = \sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + \dots}$$

Діюче значення фазної напруги

$$U_\phi = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots}$$

Їх співвідношення

$$\frac{U_L}{U_\phi} = \frac{\sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots}} < \sqrt{3}$$

Оскільки гармонічний склад несинусоїдних лінійних та фазних напруг неоднаковий, то відмінна і форма кривих лінійної та фазної напруг.

Напруга між нейтральними точками дорівнює різниці між фазними напругами джерела та приймача. Таким чином, напруга між нейтральними точками дорівнює третій гармоніці фазної напруги джерела.

До етапу 6. Оскільки фазні ЕРС джерела мають той самий гармонічний склад, що й у три провідних колах, то фазні та лінійні напруги джерела відрізняються третіми гармоніками.

Для струмів чотири провідного кола має місце співвідношення

$$i_A + i_B + i_C - i_N = 0$$

або

$$i_{A1} + i_{A3} + i_{B1} + i_{B3} + i_{C1} + i_{C3} - i_N = 0.$$

Перші гармоніки струмів утворюють симетричну систему прямої послідовності, отже

$$i_{A1} + i_{B1} + i_{C1} = 0,$$

звідкіля

$$i_{A3} + i_{B3} + i_{C3} = i_N.$$

Діюче значення струму

$$I_N = 3 \cdot I_3,$$

де I_3 – діюче значення третьої гармоніки лінійного струму.

Фазні напруги приймача несинусоїдні та співпадають с фазними напругами джерела. Напруга між нейтральними точками джерела та приймача дорівнює нулю.

Контрольні запитання

1. Чому гармоніки трифазної системи несинусоїдних струмів, які кратні трьом, утворюють трифазні системи нульової послідовності?
2. Які послідовності утворюють гармоніки не кратні трьом?
3. Чому лінійні струми трипровідного трифазного кола не вміщують гармонік кратних трьом?
4. Чому лінійні струми чотирипровідного трифазного кола вміщують гармоніки кратні трьом?
5. Які гармоніки будуть мати лінійні напруги, якщо фазні напруги джерела вміщують першу, третю, п'яту гармоніки?
6. Чому напруга U_N не містить перших гармонік?
7. Які гармоніки будуть містити струм, якщо опори фаз приймача неоднакові?
8. Як співвідносяться фазні та лінійні напруги при несинусоїдному трифазному джерелі живлення?
9. Як розрахувати струми фаз приймача при несинусоїдному трифазному джерелі живлення?
10. Як розрахувати струм нейтрального проводу при несинусоїдному трифазному джерелі живлення?

Лабораторна робота № ТОЕ-2/6

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВІМКНЕННІ КОЛА З ІНДУКТИВНІСТЮ ДО ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи

Експериментальна перевірка першого закону комутації

Програма роботи

1. Розрахунок значень сталих часу перехідного процесу.
2. Складання генератора прямокутних імпульсів.
3. Осцилографування вихідного сигналу джерела прямокутних імпульсів.
4. Підключення індуктивно-резистивного кола до джерела прямокутних імпульсів.
5. Осцилографування перехідних процесів у колі з індуктивно-резистивними елементами.
6. Аналіз результатів. Висновки.

Етапи роботи

Етап 1. Розрахунок значень сталих часу перехідного процесу.

Виходячи з обмеження, що тривалість перехідного процесу не повинна перевищувати половини періоду частоти промислової напруги й знаючи залежність постійної часу від значення резистивного опору розрахувати величини додаткових опорів R_4 .

Етап 2. Складання генератора прямокутних імпульсів.

Зібрати електричну схему, представлену на рис.6.1. Як основні елементи використовуються:

- джерело нерегульованої постійної напруги із блоку постійних напруг;
- обмежуючий опір $R_{обм}$ приймається порядку 100 Ом;
- замикаючий ключ S береться із блоку електронних ключів.

Включити живлення стола УДЛС, живлення блоку постійних напруг, блок електронних ключів, причому тумблер «синхронізація електронного ключа» перевести в положення «внутрішня синхронізація».

Етап 3. Осцилографування вихідного сигналу джерела прямокутних імпульсів.

3.1. Включити тумблер електронного осцилографа «Мережа» і дати прогрітисся осцилографу до появи горизонтальної лінії на екрані.

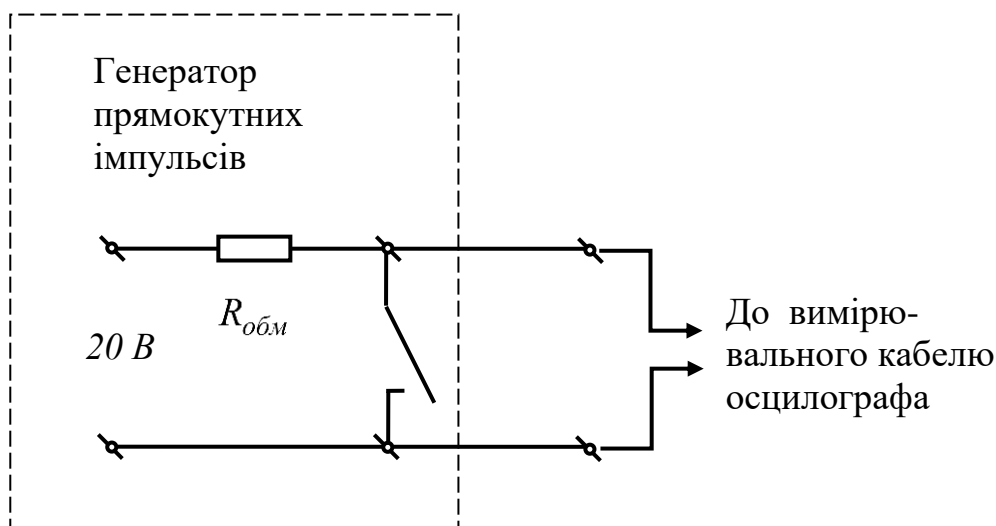


Рисунок 6.1. – Схема джерела прямокутних імпульсів

3.2. Приєднати вимірювальний кабель осцилографа на вихідну напругу генератора прямокутних імпульсів і спостерігати імпульси на екрані.

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

3.4. 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.

Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 4. Підключення індуктивно-резистивного кола до джерела прямокутних імпульсів.

Зібрати електричну схему представлену на рис.6.2. Як основні елементи використовувати:

- змінний резистор R_4 із блоку активних опорів;
- індуктивну котушку L_1 із блоку індуктивностей;
- резистор $R_{вим}$ для осцилографування кривої струму ($R_{вим} = 1...2$ Ом).

Виставити декадними перемикачами значення розрахованого опору R_4 .

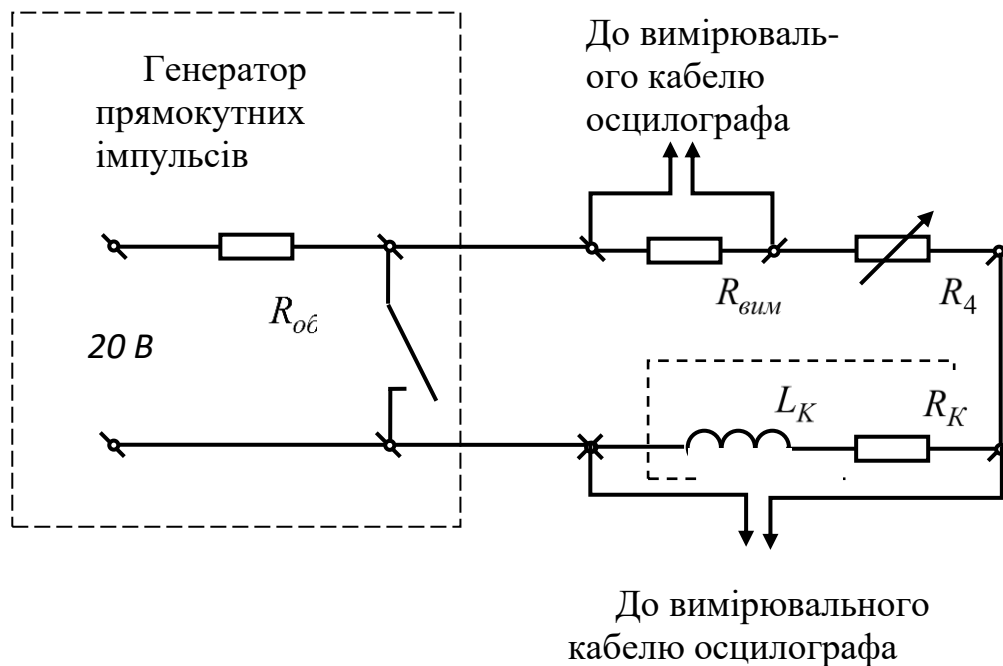


Рисунок 6.2. – Схема проведення екперименту

Етап 5. Осцилографування перехідних процесів у колі із індуктивно-резистивними елементами.

Приєднати вимірювальний кабель осцилографа паралельно котушці L_1 і зняти осцилограму напруги на котушці. Для вибору зручних масштабів сигналу на екрані осцилографа робимо дії пунктів 2.3, 2.4.

Приєднати вимірювальний кабель осцилографа паралельно резистору $R_{вим}$ зняти осцилограму напруги. Так як струм і напруга збігаються за фазою на резистивному опорі, то зафіксована осцилограма в масштабі струмів є осцилограмою струму. Масштаб струму визначається як результат від поділу масштабу напруги на значення вимірювального опору. Масштабування й синхронізація сигналу робиться відповідно до пунктів 2.3, 2.4. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Від'єднати досліджувану індуктивність від джерела прямокутних імпульсів і замірити її резистивний опір R_K мультиметром.

Етап 6. Аналіз результатів.

У колі, що містить послідовне з'єднані резистивний опір і котушку індуктивності, перехідний струм при розмиканні ключа S і нульових початкових умовах, визначається залежністю

$$i(t) = I_0(1 - e^{-t/\tau_1}),$$

де $I_0 = U_0 / (R_4 + R_K + R_{вим} + R_{обм})$ – стале значення струму; U_0 – напруга живлення джерела постійного струму; $\tau_1 = L_K / (R_4 + R_K + R_{вим} + R_{обм})$ – стала часу перехідного процесу.

При замиканні ключа S і ненульових початкових умовах, визначається залежністю

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau_2},$$

де $I_0 = U_0 / (R_4 + R_K + R_{вим} + R_{обм})$ – початкове значення струму; $\tau_2 = L_K / (R_4 + R_K + R_{вим})$ – стала часу перехідного процесу.

Постійну часу перехідного процесу можна визначити із графіків перехідних функцій як довжину дотичної, що виражена у масштабі часу.

Звіт повинен містити

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Програму роботи.
3. Схему кола, що досліджується.
4. Розрахунок опору R_4 .

5. Осцилограми перехідних процесів: прямокутних імпульсів напруги джерела живлення, напруги на резистивному опорі і напруги на котушці індуктивності.
 6. Аналіз результатів. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1. Розрахунок значень постійних часу перехідного процесу.

Ключ перемикається синхронно із частотою живильної мережі. Час замкнутого й розімкнутого стану ключа S джерела прямокутних імпульсів (рис.1) становить $1/50=0,01$ с. При замиканні ключа S на виході блоку прямокутних імпульсів напруга обнуляється, а при розмиканні ключа S на виході з'являється напруга 20 В (Рис. 3).

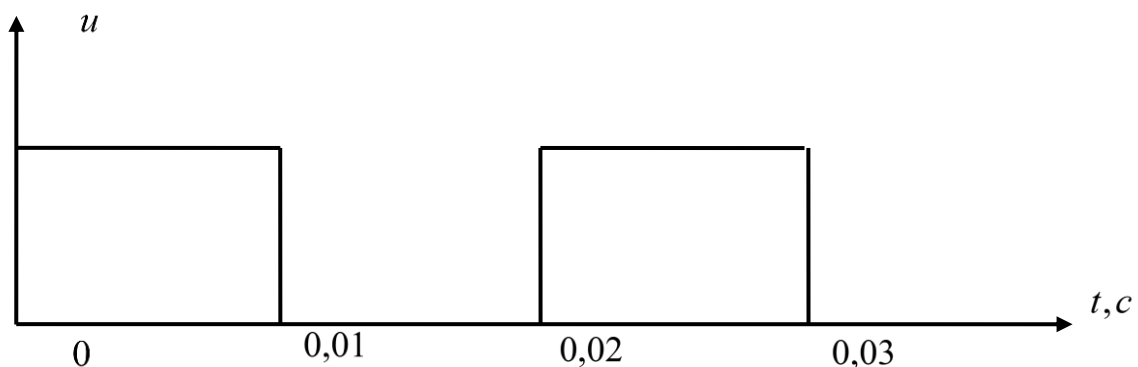


Рисунок 6.3. – Вихідний сигнал генератора прямокутних імпульсів

Вибираємо параметри навантаження джерела прямокутних імпульсів (рис. 6.2, 6.3) з того розрахунку, щоб перехідний процес завершувався за час 0,01 с.

Резистивно-індуктивне навантаження (рис.6.2, рис. 6.4)

$$R_4 = \frac{5 \cdot L_K}{0,01} - R_K - R_{вим} = 500L_K - R_K - R_{вим}, \text{ Ом}$$

де L_K - індуктивність котушки, Гн.

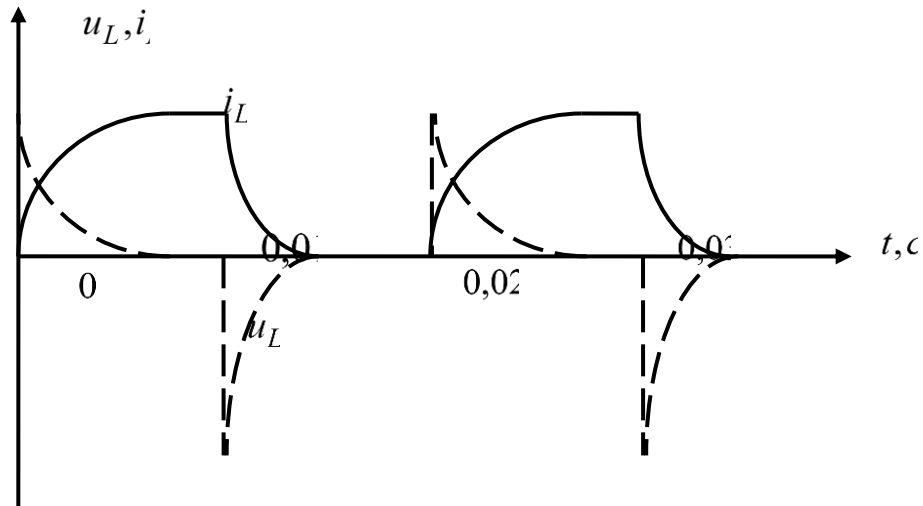


Рисунок 6.4. – Перехідні струм і напруга в колі R-L.

Контрольні питання

1. Сформулюйте перший закон комутації.
2. Як розрахувати незалежні початкові умови при наявності індуктивності в колі?
3. Як розраховуються залежні початкові умови при наявності індуктивності в колі?
4. Сформулюйте правило знаходження коренів характеристичного рівняння.
5. Як аналітично визначити сталу часу перехідного процесу?
6. Чому струм у вітках з індуктивністю стрибком не змінюється?
7. Куди витрачається запасена в накопичувачі енергія при його шунтуванні перемичкою?
8. Як довго триває перехідний процес?
9. Як впливають на тривалість перехідного процесу зміна параметрів кола?
10. Сформулюйте порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом.

Лабораторна робота № ТОВ-2/7

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВІМКНЕННІ КОЛА З ЄМНІСТЮ ДО ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи

Експериментальна перевірка другого закону комутації

Програма роботи

1. Розрахунок значень сталих часу перехідного процесу.
2. Складання генератора прямокутних імпульсів.
3. Осцилографування вихідного сигналу джерела прямокутних імпульсів.
4. Підключення резистивно-ємнісного кола до джерела прямокутних імпульсів.
5. Осцилографування перехідних процесів у колі з резистивно-ємнісними елементами.
6. Аналіз результатів. Виводи.

Етапи роботи

Етап 1. Розрахунок значень сталих часу перехідного процесу.

Виходячи з обмеження, що тривалість перехідного процесу не повинна перевищувати половини періоду частоти промислової напруги й знаючи залежність постійної часу від значення резистивного опору розрахувати величини додаткових опорів R_d .

Етап 2. Складання генератора прямокутних імпульсів.

Зібрати електричну схему, представлену на рис.7.1. Як основні елементи використовуються:

- джерело нерегульованої постійної напруги із блоку постійних напруг;
- обмежуючий опір $R_{обм}$ приймається порядку 100 Ом;
- замикаючий ключ До береться із блоку електронних ключів.

Включити живлення стола УДЛС, живлення блоку постійних напруг, блок електронних ключів, причому тумблер «синхронізація електронного ключа» перевести в положення «внутрішня синхронізація».

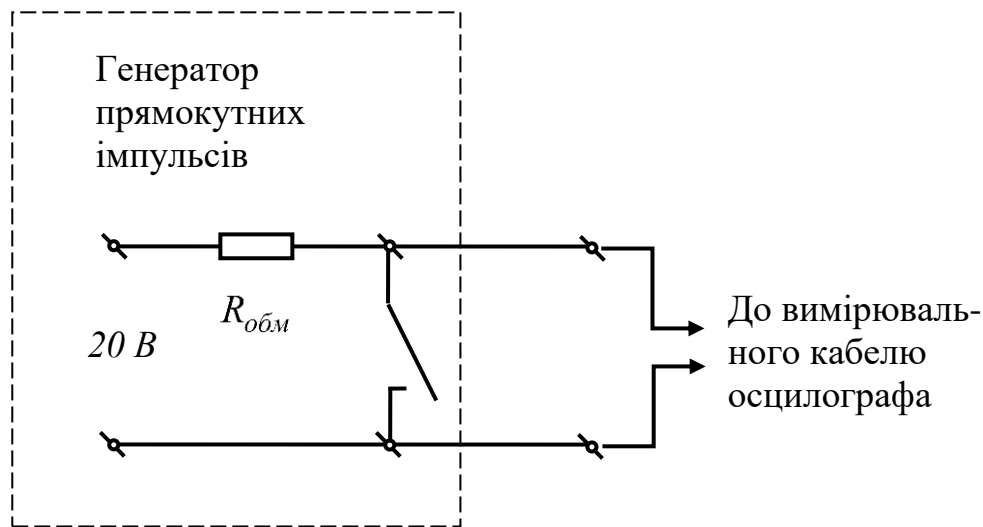


Рисунок 7.1. – Схема генератора прямокутних імпульсів

Етап 3. Осцилографування вихідного сигналу джерела прямокутних імпульсів.

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

3.2. Приєднати вимірювальний кабель осцилографа на вихідну напругу генератора прямокутних імпульсів і спостерігати імпульси на екрані.

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

3.4. 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.

Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 4. Під'єднання резистивно-ємнісного кола до джерела прямокутних імпульсів.

Зібрати електричну схему, представлену на рис.7.2. Як основні елементи використовуються:

- змінний резистор R_4 із блоку активних опорів;
- ємність C_1 із блоку ємностей;

- резистор $R_{вим}=1...2$ Ом.

Установити значення резистора R_4 відповідно до розрахункового значення.

Етап 5. Осцилографування перехідних процесів у колі з резистивно-ємнісними елементами.

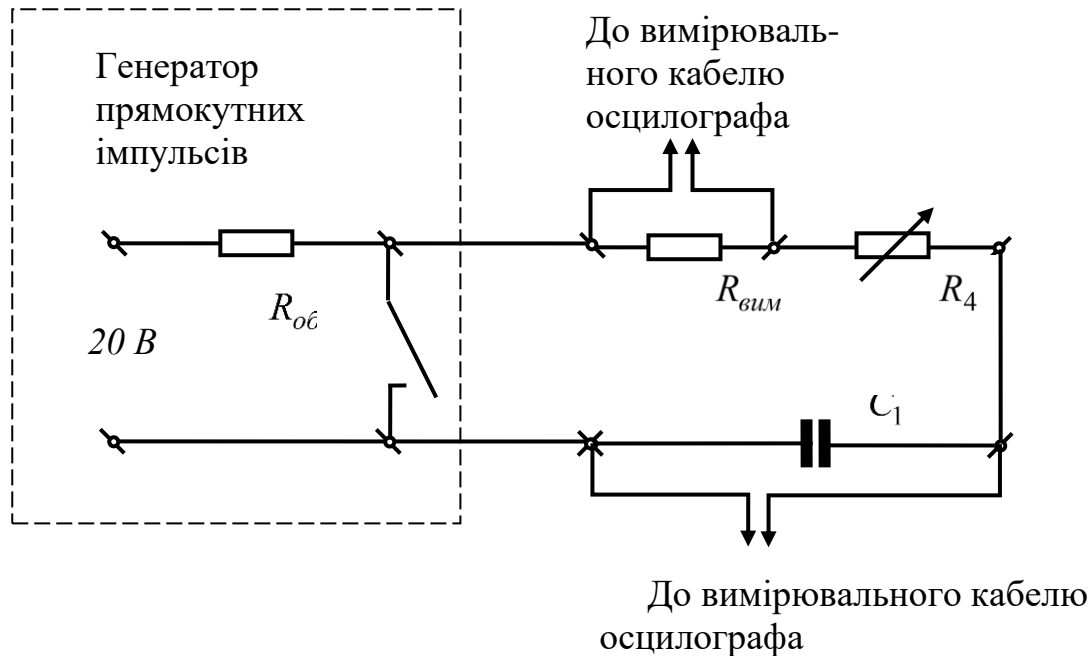


Рисунок 7.2. – Схема дослідження перехідних процесів в R-C колі

5.1. Приєднати вимірювальний кабель осцилографа паралельно ємності C_1 і зняти осцилограму напруги на ємності.

5.2. Приєднати вимірювальний кабель осцилографа паралельно резистору R_4 і зняти осцилограму струму.

5.3. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 6. Аналіз результатів.

У колі з послідовним з'єднанням резистивного опору і ємності, перехідна напруга на конденсаторі при розмиканні ключа S і нульових початкових умовах

$$u_c(t) = U_0(1 - e^{-t/\tau_3}),$$

де $\tau_3 = C_1(R_4 + R_{вим} + R_{обм})$ – стала часу перехідного процесу.

При замиканні ключа S і ненульових початкових умовах, визначається залежністю

$$u_c(t) = U_0 e^{-t/\tau_4},$$

де $\tau_4 = C_1(R_4 + R_{вим})$ – стала часу перехідного процесу.

Постійну часу перехідного процесу можна визначити із графіків перехідних функцій як довжину дотичної, виражену в масштабі часу.

Звіт повинен містити

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Схему кола, яке досліджується.
3. Розрахунок сталих часу.
4. Аналіз результатів по проведених розрахунках і експериментальній перевірці їх. Висновки.

Методичні вказівки

До етапу 1. Розрахунок значень сталих часу перехідного процесу.

Ключ перемикається синхронно із частотою живильної мережі. Час замкнутого й розімкнутого стану ключа S джерела прямокутних імпульсів (рис.7.1) становить $1/50=0,01$ с. При замиканні ключа S на виході блоку прямокутних імпульсів напруга обнуляється, а при розмиканні ключа S на виході з'являється напруга 20 В (рис. 3, 4).

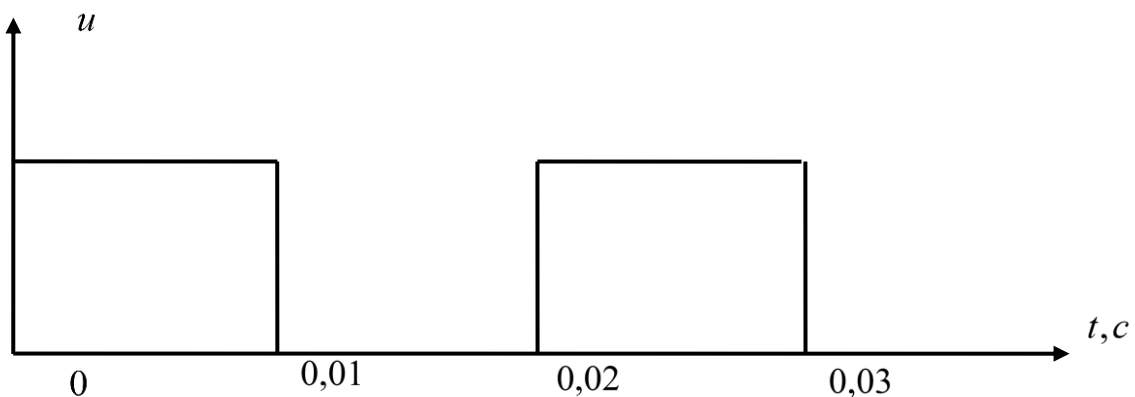


Рисунок 7.3. – Вихідна напруга генератора імпульсів

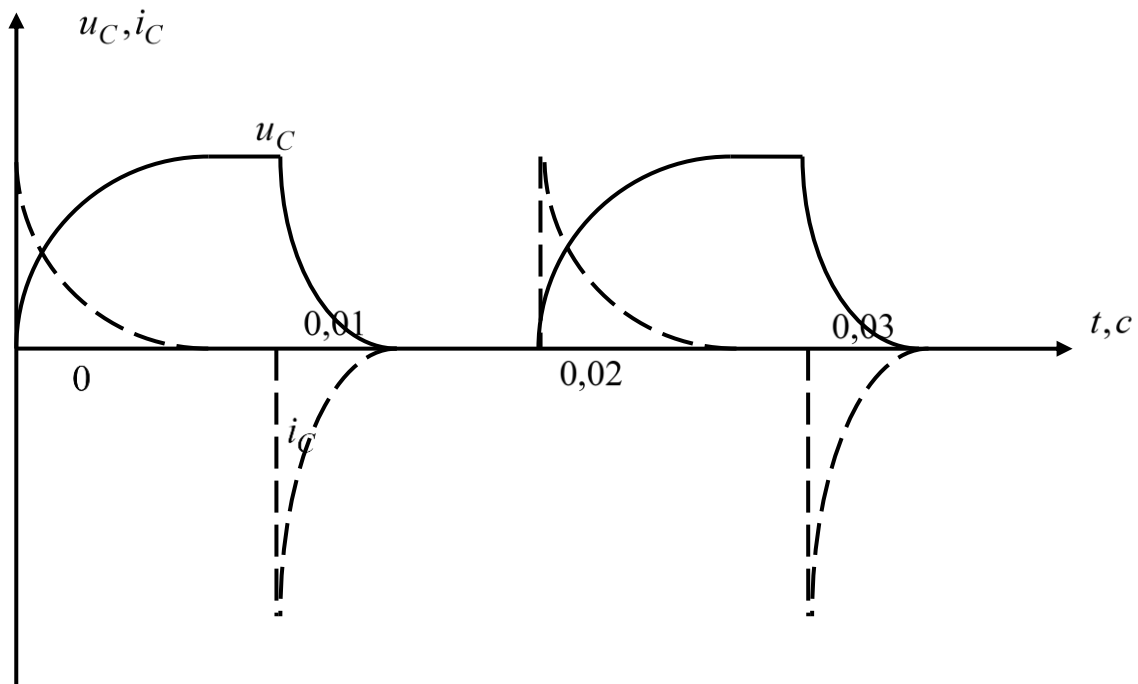


Рисунок 7.4. – Графіки переходних напруги та струму в колі R-C

Вибираємо параметри навантаження джерела прямокутних імпульсів (рис. 2, 3) з того розрахунку, щоб перехідний процес завершувався за час 0,01 с.

Резистивно-ємнісне навантаження (Рис.7.3, Рис. 7.4)

$$R_4 = \frac{0,01}{5 \cdot C} = \frac{0,002}{C}, \text{ Ом}$$

де C -ємність конденсатора, Ф.

Контрольні питання

1. Сформулюйте другий закон комутації.
2. Як розрахувати незалежні початкові умови при наявності ємності в колі?
3. Як розраховуються залежні початкові умови при наявності ємності в колі?
4. Сформулюйте правило знаходження коренів характеристичного рівняння.
5. Як аналітично визначити сталу часу переходного процесу?
6. Чому напруга в вітках з ємністю стрибком не змінюється?
7. Куди витрачається накопичувана енергія ємнісного елемента при його шунтуванні перемичкою?
8. Як довго триває перехідний процес?
9. Як впливають на тривалість переходного процесу зміна параметрів кола?
10. Сформулюйте порядок розрахунку переходних процесів операторним методом.

Лабораторна робота № ТОЕ-2/8 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗАРЯДЦІ Й РОЗРЯДІ КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ ІНДУКТИВНО-РЕЗИСТИВНЕ КОЛО

Мета роботи

Експериментальна перевірка законів комутації

Програма роботи

1. Складання генератора прямокутних імпульсів.
2. Осцилографування вихідного сигналу джерела прямокутних імпульсів.
3. Під'єднання індуктивно-резистивно-ємнісного кола до джерела прямокутних імпульсів.
4. Налаштування коливального перехідного процесу.
5. Осцилографування кривої струму коливального перехідного процесу в колі з індуктивно-резистивно-ємнісними елементами.
6. Налаштування граничного аперіодичного перехідного процесу.
7. Осцилографування кривої струму граничного аперіодичного перехідного процесу в колі з індуктивно-резистивно-ємнісними елементами.
8. Налаштування аперіодичного перехідного процесу.
9. Осцилографування кривої струму аперіодичного перехідного процесу в колі з індуктивно-резистивно-ємнісними елементами.
10. Аналіз результатів. Виводи.

Етапи роботи

Етап 1. Складання генератора прямокутних імпульсів.

1.1. Зібрати електричну схему, представлену на рис.8.1. Як основні елементи використовуються:

- джерело нерегульованої постійної напруги із блоку постійних напруг;
- обмежуючий опір $R_{обм}$ приймається порядку 100 Ом;
- замикаючий ключ S береться із блоку електронних ключів.

1.2. Відкрити живлення стола УДЛС, живлення блоку постійних напруг, блок електронних ключів, причому тумблер «синхронізація електронного ключа» перевести в положення «внутрішня синхронізація».

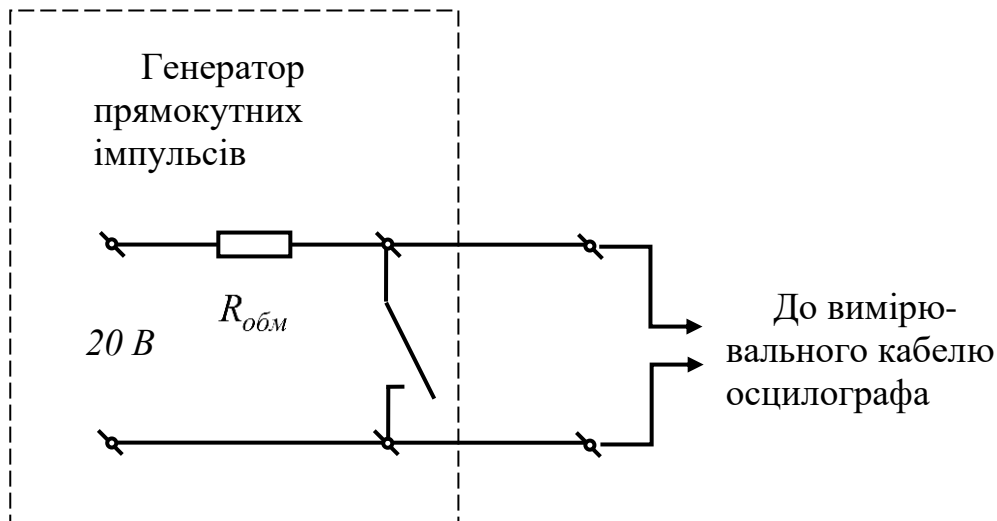


Рисунок 8.1. – Схема генератора прямокутних імпульсів

Етап 2. Осцилографування вихідного сигналу джерела прямокутних імпульсів.

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 генератора прямокутних імпульсів і спостерігати імпульси на екрані.

2.3. Подільником 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. Відрегулювати осцилограф.

Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 3. Підєднання індуктивно-резистивної-ємнісного кола до джерела прямокутних імпульсів.

3.1. Зібрати електричну схему, представлену на рис.8.2. Як основні елементи використовуються:

- джерело живлення - джерело нерегульованої постійної напруги із блоку постійних напруг;
- опір R приймається порядку 100 Ом;
- відповідно до номера бригади вибираються параметри елементів L_4 і C_4 ;
- елемент L_4 приймається змінної індуктивності із блоку індуктивностей і набирається декадними перемикачами;
- елемент C_4 приймається змінної ємності із блоку ємностей і набирається декадними перемикачами.

До включення елемента L_4 в схему мультиметром вимірюється внутрішній резистивний опір R_4 . Обмірюване значення записати у звіт до лабораторній роботі.

Після перевірки електричної схеми включити блок живлення.

Етап 4. Налаштування коливального перехідного процесу.

Зменшуючи дисипативні втрати в контурі шляхом зменшення резистивного опору R_4 домогтися стійкого коливального перехідного процесу як при зарядці, так і при розряді конденсатора через резистивно-індуктивне коло. Під коливальним перехідним процесом розуміємо процес при якому відбувається зміна знака полярності напруги конденсатора в процесі зарядки й розрядки конденсатора через резистивно-індуктивне коло.

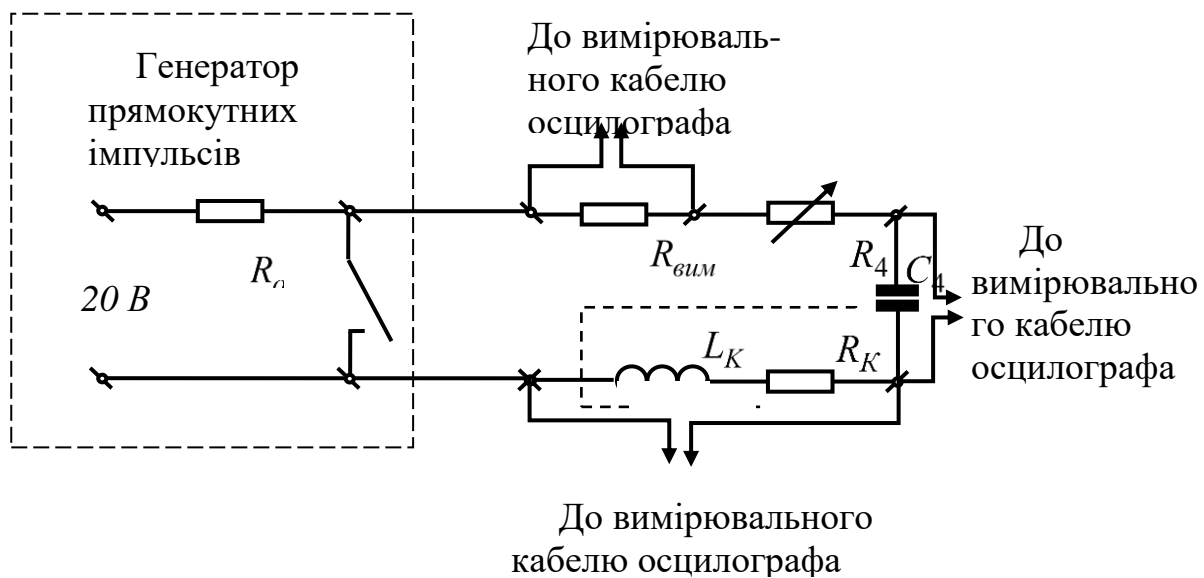


Рисунок 8.2. – Схема експериментального дослідження перехідних процесів у колі другого порядку

Таблиця 8.1.

Початкові значення реактивних елементів кола другого порядку

№ бригади	1	2	3	4	5	6
L_4 , мГн	90	90	80	80	90	80
C_4 , мкФ	1,0	0,5	0,513	1,0	0,25	0,25

Етап 5. Осцилографування кривої струму коливального перехідного процесу в колі з індуктивно-резистивно-ємнісним елементами.

Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 6. Налаштування граничного аперіодичного перехідного процесу.

Збільшуючи дисипативні втрати в контурі шляхом збільшення резистивного опору R_4 домогтися граничного аперіодичного перехідного процесу як при зарядці, так і при розряді конденсатора через резистивно-індуктивне коло. Під граничним аперіодичним перехідним процесом розуміємо граничний перехідний процес між коливальним і аперіодичним перехідними процесами.

Етап 7. Осцилографування кривої струму граничного аперіодичного перехідного процесу в колі з індуктивно-резистивно-ємнісним елементами.

Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 8. Налаштування аперіодичного перехідного процесу.

Збільшуючи дисипативні втрати в контурі шляхом збільшення резистивного опору R_4 домогтися аперіодичного перехідного процесу як при зарядці, так і при розряді конденсатора через резистивно-індуктивне коло. Під аперіодичним перехідним процесом розуміємо перехідний процес, при якому один раз розражається або заряджається конденсатор через резистивно-індуктивне коло.

Етап 9. Осцилографування кривої струму аперіодичного перехідного процесу в колі з індуктивно-резистивно-ємнісним елементами.

Прикласти до екрана осцилографа кальку й зафіксувати зображення або сфотографувати. Записати масштаби по осях ординат і абсцис.

Етап 10. Аналіз результатів.

Електронний ключ S при внутрішній синхронізації комутирується напругою мережі із частотою 50 Гц, тому на виході генератора прямокутних імпульсів спостерігаються однополярна прямокутна напруга із частотою проходження 50 Гц, амплітудою рівною значенню напруги джерела постійного струму.

При розмиканні ключа S конденсатор заряджається через резистивно-індуктивне коло, а при замиканні – розряджається на це коло. Причому параметри кола обрані таким чином, що перехідний процес від попереднього імпульсу закінчувався раніше, ніж виникає перехідний процес від наступного імпульсу. У цьому випадку перехідні процеси розряду й заряду конденсатора не накладаються один на інший і розглядаються роздільно.

Змінюючи значення резистивного опору R_4 міняємо втрати в контурі із двома накопичувачами енергії. При малих втратах у контурі спостерігається кілька періодів перезаряду конденсатора за час одного спрацьовування електронного ключа (Рис.8.3,а). Корінь характеристичного рівняння при коливальному перехідному процесі є комплексно - сполучені. Крива струму описується рівнянням

$$i = Be^{\alpha t} \sin(\omega_0 t + \beta),$$

де B и β – постійні інтегрування.

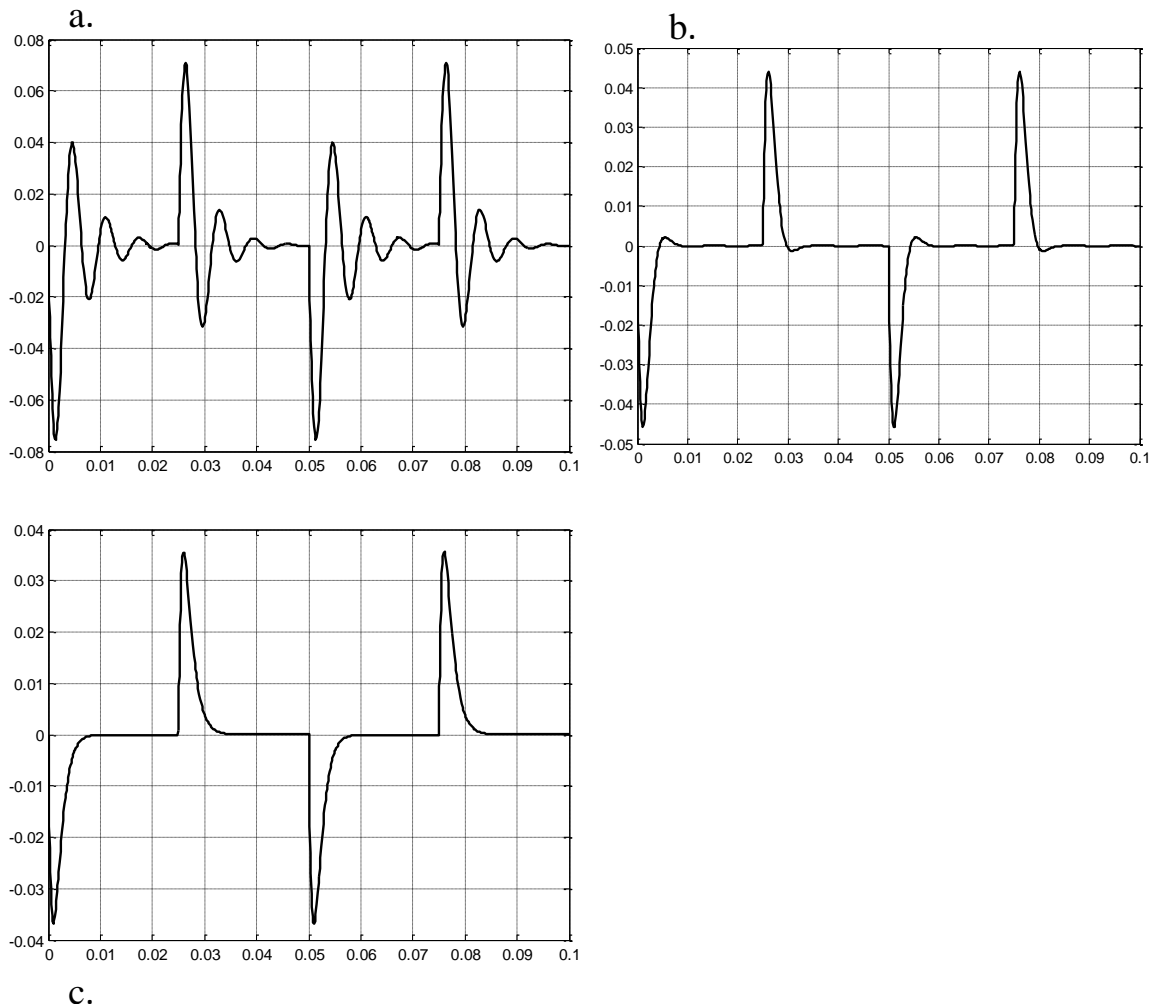


Рисунок 8.3. – Осцилограми струму в колі з двома накопичувачами енергії

Збільшуючи втрати в контурі шляхом збільшення опору R_4 на початку одержимо граничний аперіодичний процес (Рис.8.3,б), а потім і аперіодичний (Рис.8.3,с). При граничному аперіодичному перехідному процесі корінь характеристичного рівняння дійсні й рівні, а при аперіодичному - дійсні й різні. Криві струмів описуються рівняннями:

- граничний аперіодичний перехідний процес

$$i = A_1 e^{p_1 t};$$

- аперіодичний перехідний процес

$$i = A_2 e^{p_2 t} + A_3 e^{p_3 t},$$

де A_1, A_2, A_3 – постійні інтегрування; p_1, p_2, p_3 – корені характеристичного рівняння.

Величина кутової частоти загасаючого коливального перехідного процесу визначається експериментально з отриманої осцилограми

$$\omega' = 2\pi fn,$$

де n – число періодів розряду конденсатора, що укладається в один період прямокутного імпульсу напруги; f – частота імпульсів.

Декремент загасання коливального перехідного процесу визначається з експериментальних даних як відношення двох суміжних амплітуд коливань одного знаку.

За вихідними величинами індуктивності і ємності можна обчислити критичний опір контуру із двома накопичувачами енергії

$$R_{кр} = 2\sqrt{L_4 / C_4}.$$

Хвильовий (погоджений або характеристичний) опір контуру знаходимо за вихідними даними контуру

$$\rho = R_c = \sqrt{L_4 / C_4}.$$

Власна кутова частота незатухаючих коливань

$$\omega_0 = 1 / \sqrt{L_4 C_4}.$$

Звіт повинен містити

1. Назву роботи, її мету та програму.
2. Рис.2.
3. Осцилограми струмів і вихідну напругу генератора прямокутних імпульсів.
4. Розрахунок критичного опору відповідно до номера варіанта.
5. Розрахунок параметрів коливальних, граничних аперіодичних і аперіодичного перехідних процесів.
6. Аналіз результатів. Висновки по проведених розрахунках і експериментальній перевірці.

Методичні вказівки

Електронний ключ S при внутрішній синхронізації комутується із частотою 50 Гц, тому на виході генератора прямокутних імпульсів спостерігаються однополярні прямокутні імпульси з періодом повторення 0,02 с, амплітудою, рівної значенню напруги джерела постійної напруги $U_0 = 20\text{ В}$.

Заряд конденсатора відбувається через резистивно-індуктивне коло при розімкненому ключі S , розряд – через резистивно-індуктивне коло при замкненому ключі S .

Контрольні питання

1. Сформулюйте перший і другий закон комутації.
2. Як розрахувати незалежні початкові умови при наявності ємності й індуктивності в колі?
3. Як розраховуються залежні початкові умови при наявності ємності й індуктивності в колі?
4. Сформулюйте правило знаходження коренів характеристичного рівняння.
5. Як аналітично визначити постійну часу перехідного процесу?
6. Чому напруга в вітках з ємністю й струм у вітках з індуктивністю стрибком не змінюється?
7. Куди витрачається запасена в накопичувачі енергія при його шунтуванні перемичкою?
8. Як довго триває перехідний процес?
9. Як впливають на тривалість перехідного процесу зміна параметрів кола?
10. Сформулюйте порядок розрахунку перехідних процесів класичним і операторним методами.

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. Каців, 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. Чотиріполюсники [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–2/1. Експериментальне дослідження трифазних кіл при з'єднанні приймача зіркою та симетричному джерелі живлення	4
Лабораторна робота № ТОЕ–2/2. Експериментальне дослідження трифазних кіл при з'єднанні приймача трикутником та симетричному джерелі живлення	12
Лабораторна робота № ТОЕ–2/3. Експериментальне дослідження трифазних кіл при з'єднанні приймача зіркою та несиметричному джерелі живлення	17
Лабораторна робота № ТОЕ–2/4. Експериментальне дослідження вищих гармонік у однофазних колах	24
Лабораторна робота № ТОЕ–2/5. Експериментальне дослідження вищих гармонік у трифазних колах	30
Лабораторна робота № ТОЕ–2/6. Експериментальне дослідження перехідних процесів при включенні кола з індуктивністю до джерела постійної напруги	35
Лабораторна робота № ТОЕ–2/7. Експериментальне дослідження перехідних процесів при включенні кола з ємністю до джерела постійної напруги	41
Лабораторна робота № ТОЕ–2/8. Експериментальне дослідження перехідних процесів при розряді конденсатора на індуктивно-резистивне коло	46
Список літератури	53

Автор

Хілов Віктор Сергійович

**Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ, ЧАСТИНА 1
(розділи: «Основи теорії кіл постійного струму» та
«Основи теорії кіл гармонійного однофазного струму»
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