

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт
із навчальної дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ. ЧАСТИНИ 1, 2»

(за матеріалами другого модуля «Трифазні електричні кола синусоїдного струму. Лінійні електричні кола періодичного несинусоїдного струму.

Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах»)

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальностей*

G4 – Енерговиробництво та G3 – Електрична інженерія)

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2026

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки. Частини 1, 2» (за матеріалами другого модуля «Трифазні електричні кола синусоїдного струму. Лінійні електричні кола періодичного несинусоїдного струму. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах») (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальностей G4 – Енерговиробництво та G3 – Електрична інженерія) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Я. Б. Форкун, М. Л. Глєбова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2026. – 69 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глєбова

Рецензент

О. Б. Єгоров, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 4 від 26 листопада 2025 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИПРОВІДНИХ ТА ЧОТИРИПРОВІДНИХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ «ЗІРКА-ЗІРКА».....	9
1.1 Мета роботи.....	9
1.2 Обладнання і прилади	9
1.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	9
1.4 Загальні відомості	10
1.5 Порядок виконання роботи	14
1.6 Обробка експериментальних даних.....	19
Контрольні запитання.....	20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ «ЗІРКА-ТРИКУТНИК».....	22
2.1 Мета роботи.....	22
2.2 Обладнання і прилади	22
2.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	22
2.4 Загальні відомості	23
2.5 Порядок виконання роботи	28
2.6 Обробка експериментальних даних.....	31
Контрольні запитання.....	33
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРУ ОПОРУ НА ФОРМУ КРИВОЇ СТРУМУ В КОЛАХ НЕСИНУСОЇДНОГО ПЕРІОДИЧНОГО СТРУМУ.....	34
3.1 Мета роботи.....	34
3.2 Обладнання і прилади	34
3.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	34
3.4 Загальні відомості	35
3.5 Порядок виконання роботи	43

3.6 Обробка експериментальних даних.....	47
3.7 Висновки.....	47
Контрольні запитання.....	48
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ	
ПРОЦЕСІВ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПЕРШОГО ТА	
ДРУГОГО ПОРЯДКУ	49
4.1 Мета роботи.....	49
4.2 Обладнання і прилади	49
4.3 Підготовчий етап лабораторної роботи	49
4.4 Загальні відомості	49
4.5 Порядок виконання роботи	58
4.6 Обробка експериментальних даних.....	62
4.7 Висновки.....	63
Контрольні запитання.....	64
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65
ДОДАТКИ.....	66

ВСТУП

Електротехніка пов'язана з отриманням, розподілом, перетворенням і використанням електричної енергії або, інакше кажучи, це галузь практичного застосування електромагнітних явищ. «Теоретичні основи електротехніки» (далі – ТОЕ) – дисципліна, яка розглядає питання розрахунку й вивчення явищ, що характеризують поняттями електричних струмів, напруги, потужностей, магнітних потоків, а також напруженості електричного та індукції магнітного полів. Таким чином, ТОЕ є теоретичною базою для всіх електротехнічних спеціальностей.

Вивчення курсу ТОЕ потребує наявності знань із курсу фізики, а саме розділу «Електрика та магнетизм» та вищої математики (системи лінійних алгебраїчних рівнянь, теорія матриць, похідна та інтеграл, диференціальні рівняння, функціональні ряди, інтегральні перетворення Лапласа, векторна алгебра тощо).

Студенти освітніх програм «Електротехнічні системи електроспоживання», «Електромеханіка», «Світлові технології», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» впродовж двох семестрів вивчають, відповідно, першу та другу частини дисципліни ТОЕ. Навчальними планами освітніх програм «Електротехнічні системи електроспоживання», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії» передбачено також вивчення третьої частини дисципліни.

Потрібно зазначити, що теоретичні положення курсу засвоюються ґрунтовно тільки тоді, коли вони застосовані для вирішення конкретних завдань. Саме тому лабораторні роботи відіграють важливу роль під час вивчення дисципліни. Метою їх проведення є набуття студентами навичок практичних досліджень електричних кіл та отримання під час виконання розрахункової частини підтвердження положень теорії.

Ці методичні рекомендації складені відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки. Частини 1, 2» і призначені для студентів усіх форм навчання.

Правила безпеки в лабораторії ТОВ

До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які пройшли інструктаж із техніки безпеки з наступним записом про це в спеціальному журналі. Значення напруги, з якими студент має справу при виконанні експериментів на стендах НДЛС-1, не становлять небезпеки для життя людини. Усі джерела живлення забезпечені захистом від перевантажень. Із огляду на це складання, перевірку і вмикання електричних кіл студенти проводять самостійно. Однак через те що все обладнання лабораторії, зокрема стенди і вимірювальні прилади, під'єднані до мережі 220/127 В, варто дотримуватися певних правил безпеки.

Під час роботи в лабораторії забороняється:

- торкатися до труб опалювальної системи;
- самостійно вмикати вилки вимірювальних приладів у мережу;
- відмикати заземлення вимірювальних приладів;
- виймати блоки стенда;
- залишати без нагляду увімкнений стенд і вимірювальні прилади;
- залишати лабораторію без дозволу викладача.

У разі пошкодження блоків стенда, елементів або вимірювальних приладів необхідно негайно відімкнути їх від мережі живлення і повідомити про це викладачеві. Після закінчення роботи на стенді необхідно вимкнути живлення всіх активних блоків стенда і вимірювальних приладів.

Роботу в лабораторії проводять відповідно до планів аудиторних занять. Зазвичай лабораторна робота триває 2, 4 або 6 аудиторних годин. Протягом цього часу студент повинен виконати роботу, оформити звіт, розв'язати задачу й відповісти на теоретичні питання за темою роботи, тобто захистити роботу.

Під час першого заняття студенти формують бригади у кількості від трьох до чотирьох осіб. За бригадою до кінця навчального року закріплюється робочий стенд, номер якого і є номером комплексу елементів набірної стенду та номером варіанта за цими методичними рекомендаціями.

Усі лабораторні роботи студенти виконують на універсальних навчально-

дослідницьких лабораторних стендах НДЛС-1. Кожна робота має кілька етапів, а саме: підготовка, виконання експериментів, обробка даних і оформлення звіту, захист роботи. У розділі «Загальні відомості» кожної лабораторної роботи студенти знайдуть необхідні положення теорії електричних кіл за відповідною тематикою роботи.

Перш ніж приступити до виконання роботи студент отримує допуск, який свідчить про те, що він підготовлений до лабораторного заняття, тобто вивчив теоретичний матеріал, підготував чернетку, зробив необхідні попередні розрахунки. Під час виконання лабораторних робіт використовуються елементи набірного поля стенда, порядкові номери й зразкові параметри яких наведені в додатку А. Експериментальні дані, занесені в чернетку, наприкінці кожного експерименту показують викладачеві. Експерименти повторюють у разі наявності неправильних результатів.

До захисту лабораторної роботи допускається студент, який виконав і оформив звіт про лабораторну роботу в повному обсязі. Під час захисту студент повинен розв'язати задачу за темою роботи і відповісти на контрольні запитання, перелік яких наведено наприкінці кожної роботи. Звіти виконують в зошитах або на аркушах формату А4. Текст звітів повинен бути написаний чітко та акуратно. Електричні схеми та графічну частину робіт, до якої входять графіки й діаграми, що є результатами експериментів або обчислень, необхідно виконувати згідно з вимогами; загальне оформлення пояснювальної записки – згідно з ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки.

Звіт про кожен лабораторну роботу повинен містити:

- назву роботи;
- мету роботи;
- перелік приладів, обладнання і елементів;
- назву першого експерименту, схему досліджуваного електричного кола; результати дослідження за першим експериментом (таблиці, графіки, розрахункові формули й обчислення);
- назву другого експерименту тощо (див. попередні пункти);

– висновки.

Якщо звіти виконують в учнівських зошитах, то оформлення кожної роботи повинно починатися з нової сторінки. Також можливе виконання звітів в електронному вигляді з обов’язковим дотриманням таких вимог:

- шрифт – Times New Roman чорного кольору;
- розмір шрифту – 14 пт;
- міжрядковий інтервал – 1,5;
- формули розташовують посередині сторінки після посилання на них у тексті та друкують із використанням редактора формул;
- пояснення до позначень і числових множників, якщо вони не були подані в тексті раніше, мають наводитися під формулою (рівнянням) тим самим шрифтом, накресленням і розміром, що й у формулі;
- пояснення до загальноприйнятих позначень у формулі (наприклад π) можна не подавати, а пояснення кожної позначки, що міститься у формулі, потрібно подавати з нового рядка через крапку з комою в тій послідовності, у якій їх наведено у формулі, перший рядок пояснення має починатися зі слова «де», без абзацного відступу та без двокрапки;
- графіки та діаграми повинні бути побудовані за допомогою графічних редакторів.

Після захисту останньої роботи студент повинен здати зошит або усі окремі звіти, виконані на аркушах формату А4.

За умов дистанційного навчання оформлені в електронному вигляді за вказаними вище правилами звіти надсилаються викладачеві в особистий чат Microsoft Teams, або в дистанційний курс Moodle. Якщо звіти оформлювалися не в електронному вигляді, фото оформлених аркушів звітів за порядком вставляються у файл doc (docx).

Літерні позначення основних електричних величин і одиниці, у яких ці величини вимірюються, представлені в додатку Б. Зразок титульного аркуша для звітів наведений в додатку В.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИПРОВІДНИХ ТА ЧОТИРИПРОВІДНИХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ «ЗІРКА-ЗІРКА»

1.1 Мета роботи

Метою виконання першої лабораторної роботи є:

- визначення співвідношень між фазними й лінійними напругами;
- дослідження зміщення нейтралі трифазної трипровідної системи при зміні навантаження однієї із фаз;
- дослідження розподілу струмів у трифазній чотирипровідній системі при неоднорідному навантаженні фаз;
- дослідження аварійних режимів в трипровідних та чотирипровідних трифазних електричних колах;
- порівняння дослідних даних із розрахунковими і аналіз цих даних за допомогою векторних діаграм струмів і топографічних діаграм напруг.

1.2 Обладнання і прилади

Як обладнання і прилади використовують:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд НДЛС-1 (блок змінної трифазної напруги);
- елементи набірної частини стенду;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр.

1.3 Підготовчий етап лабораторної роботи

Результатом підготовчого етапу є:

- набуття навичок з проведення розрахунку трифазних кіл синусоїдного струму при з'єднанні «зірка-зірка» за відсутності нейтрального проводу і наявності останнього при симетричному й несиметричному навантаженні;
- уміння проводити розрахунок аварійних режимів роботи трифазних кіл

(обрив лінійного проводу однієї із фаз і коротке замикання навантаження в одній із фаз);

– уміння будувати векторні діаграми напруг та струмів при з'єднанні джерела напруги та навантаження за схемою «зірка-зірка» при різних режимах роботи трифазної системи.

1.4 Загальні відомості

Сукупність електричних кіл, в яких діють створені спільним джерелом синусоїдні електрорушійні сили (*ЕРС*) однакової частоти й амплітуди, що відрізняються одна від одної на кут $\frac{2 \cdot \pi}{m}$ (m – кількість фаз) – це багатофазні симетричні системи *ЕРС*.

Багатофазні системи бувають дво-, три-, чотири-, шести-, дванадцятифазними. Широке розповсюдження набули трифазні системи завдяки економічним перевагам передачі електричної енергії на великі відстані і відносній нескладності та надійності перетворюючих пристроїв.

Окремі частини, що утворюють трифазну систему (обмотки генераторів, трансформаторів, навантажень), – це фази генератора, трансформатора і т. ін. Початок цих обмоток позначається буквами А, В, С, а кінець – буквами х, у, з. Кінці обмоток поєднані в одну точку – точку О.

Основні схеми з'єднання в трифазних колах – це схеми з'єднання зіркою і трикутником. Якщо всі початки або всі кінці фазних обмоток (чи навантажень) з'єднані в один вузол (в нейтральну точку або, якщо вона заземлена, в нульову) – таке з'єднання називають «зіркою».

Проводи, що з'єднують обмотки генератора або трансформатора з навантаженням, називають лінійними, а провід, що з'єднує нейтральні або нульові точки, – відповідно, нейтральним або нульовим.

При з'єднанні «зірка-зірка» обмотки генератора та фазні навантаження поєднують «зіркою». Таке трифазне електричне коло може бути без нульового (нейтрального) проводу – трипровідна система (рис. 1.1) або з ним –

чотирипровідна система (рис. 1.2).

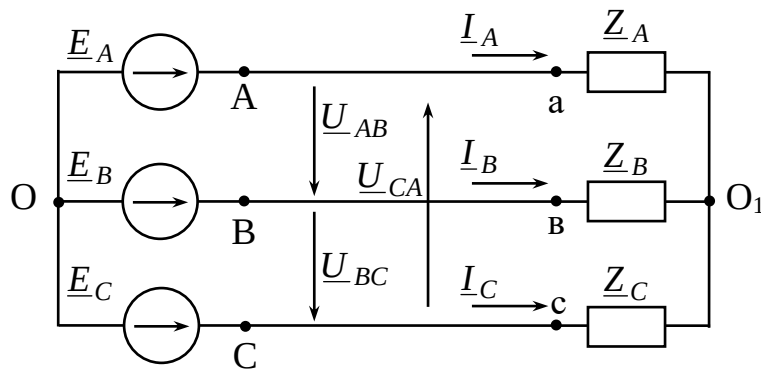


Рисунок 1.1 – Трифазна схема
«зірка-зірка» без нейтрального проводу

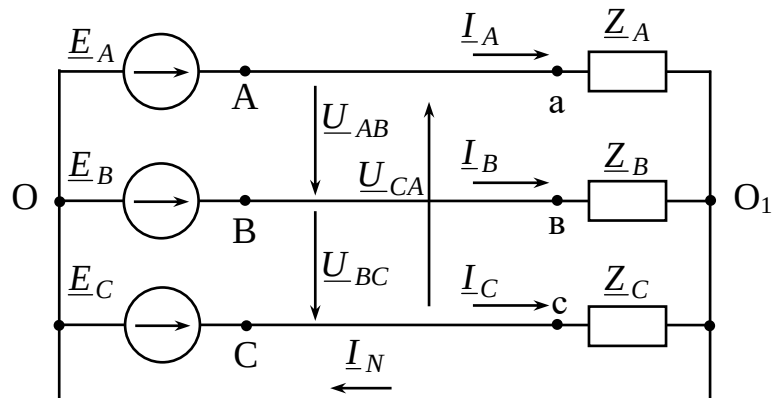


Рисунок 1.2 – Трифазна схема
«зірка-зірка» з нейтральним проводом

Напруги між початком і кінцем обмотки генератора ($\underline{U}_{AO} = \underline{E}_A$, $\underline{U}_{BO} = \underline{E}_B$, $\underline{U}_{CO} = \underline{E}_C$) або на фазних навантаженнях ($\underline{U}_{aO_1}$, $\underline{U}_{bO_1}$, $\underline{U}_{cO_1}$) – це фазні напруги. Проводи, що з'єднують генератор і навантаження, називають лінійними, струми, що течуть по них, – лінійними струмами ($\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$), а напруга між лінійними проводами – це лінійна напруга ($\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$). Для схем на рисунку 1.1 і рисунку 1.2 фазні струми, що течуть по променях зірки, дорівнюють лінійним. Струм, що тече по нейтральному проводу (рис. 1.2), – це струм нейтрального ($\underline{I}_N$).

За додатний напрям струмів в лінійних проводах приймається напрям від

джерела до навантаження, а в нейтральному проводі навпаки – від навантаження до джерела.

Струм в нейтральному проводі дорівнює геометричній сумі лінійних струмів (за першим законом Кірхгофа):

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (1.1)$$

Лінійні напруги дорівнюють різниці потенціалів між точками А, В, С або різниці фазних напруг:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{AO} - \underline{U}_{BO}; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_{BO} - \underline{U}_{CO}; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_{CO} - \underline{U}_{AO}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

При прямому чергуванні фаз співвідношення між лінійними і фазними напругами має такий вигляд:

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{AO} \cdot e^{j30^\circ}; \underline{U}_{BC} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{BO} \cdot e^{j30^\circ}; \underline{U}_{CA} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{CO} \cdot e^{j30^\circ}. \quad (1.3)$$

При симетричному навантаженні ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}$) за відсутності нейтрального проводу (рис. 1.1) модулі фазних струмів однакові, а комплекси фазних струмів

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}}; \underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}}; \underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}}. \quad (1.4)$$

При симетричному навантаженні (рис. 1.2) за наявності нейтрального проводу фазні струми визначають за формулою (1.4), а струм в нейтральному проводі відсутній:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (1.5)$$

Приклад векторної діаграми струмів і напруг (симетричне навантаження, фазні струми випереджають фазні напруги на кут φ) подано на рисунку 1.3.

При несиметричному навантаженні ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$) за відсутності нейтрального проводу (рис. 1.1) фазні струми установлюють таким чином, що

їх сума дорівнює нулю. Внаслідок цього відбувається «викривлення» симетрії фазних напруг, тобто навантаження різних фаз опиняються під різними напругами порівняно з номінальною фазною напругою. Потенціали точки O і O_1 не дорівнюють один одному. Розрахунок здійснюють в такій послідовності:

1. Визначають напругу зміщення нейтралі, тобто напругу $\underline{U}_{O_1O}$, за формулою, що випливає з методу двох вузлів:

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (1.6)$$

де $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – комплекси фазних провідностей.

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}; \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}. \quad (1.7)$$

2. Визначають фазні напруги на навантаженні за формулами

$$\underline{U}_{aO_1} = \underline{E}_A - \underline{U}_{O_1O}; \underline{U}_{bO_1} = \underline{E}_B - \underline{U}_{O_1O}; \underline{U}_{cO_1} = \underline{E}_C - \underline{U}_{O_1O}. \quad (1.8)$$

3. Визначають фазні струми за формулами

$$\underline{I}_A = \underline{U}_{aO_1} \cdot \underline{Y}_A; \underline{I}_B = \underline{U}_{bO_1} \cdot \underline{Y}_B; \underline{I}_C = \underline{U}_{cO_1} \cdot \underline{Y}_C. \quad (1.9)$$

Трипровідна система за несиметричного навантаження при з'єднанні в зірку має той недолік, що напруга на фазах навантаження залежить від величини опорів цих фаз. Такий режим роботи є небажаним, тому на практиці застосовують з'єднання «зірка-зірка» з нейтральним проводом, тобто чотирипровідну систему (рис. 1.2). При цьому, якщо зневажати опором цього проводу, потенціал нульової точки навантаження O_1 дорівнює потенціалу нульової точки генератора O ($\underline{U}_{O_1O} = 0$). Фазні струми визначаються величиною опору навантаження за формулою (1.9) з урахуванням того, що $\underline{U}_{aO_1} = \underline{U}_{AO}$; $\underline{U}_{bO_1} = \underline{U}_{BO}$; $\underline{U}_{cO_1} = \underline{U}_{CO}$.

Струм в нейтральному проводі дорівнює геометричній сумі лінійних струмів, тобто визначається за формулою (1.1).

1.5 Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, наведених у таблиці 1.1. Номер варіанта – це номер стенда. Перед проведенням експериментів за вихідними даними доцільно провести основні розрахунки, які допоможуть у процесі виконання експериментальної частини виявити можливі помилки. Схеми треба складати так, щоб мати змогу провести виміри струмів і напруг, де це потрібно.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	E_{Φ} , В	R_{Φ} , №
1	16	07
2	17	08
3	20	09
4	22	10
5	15	07
6	24	10
7	16	08
8	18	09
9	20	08
10	23	10
11	14	07
12	19	08
13	19	09
14	21	10

*Експеримент 1 Дослідження трифазного електричного кола «зірка-зірка» без
нейтрального проводу (Y/Y) і з останнім (Y/Y_0) при симетричному
навантаженні*

Зібрати електричне коло «зірка-зірка» без нейтрального проводу за схемою рисунка 1.1 відповідно до свого варіанта. Фазні опори $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$ – це активні опори R_ϕ відповідно до таблиці 1.1. Провести виміри всіх величин, вказаних у таблиці 1.2, і занести до таблиці 1.2 результати експериментів.

З'єднати точки O і O_1 проводом, тобто отримати електричне коло «зірка-зірка» з нейтральним проводом (схема на рисунку 1.2). Провести виміри всіх величин, вказаних у таблиці 1.2, і занести до таблиці 1.2 результати експериментів.

*Експеримент 2 Дослідження трифазного кола «зірка-зірка» при
несиметричному навантаженні*

Для електричного кола «зірка-зірка» з нейтральним проводом (рис. 1.2) активне навантаження у фазі «А» замінити ємнісним опором X_C , що

дорівнює R_ϕ . Тобто $R_\phi = X_C$, а величина ємності $C = \frac{10^6}{R_\phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$, мкФ.

Розраховану ємність внести у фазу «А» електричного кола «зірка-зірка» з нейтральним проводом з блоку змінної ємності стенда (схема на рисунку 1.2). Провести виміри всіх величин, вказаних у таблиці 1.3, і занести в таблицю 1.3 результати експериментів.

Таблиця 1.2 – Результати експериментів та розрахунків електричного кола «зірка-зірка» при симетричному навантаженні

Спосіб з'єднання навантаження	Визначено	$U_{aO1}=U_{AO}$ (В)	$U_{bO1}=U_{BO}$ (В)	$U_{cO1}=U_{CO}$ (В)	$U_{ab}=U_{AB}$ (В)	$U_{bc}=U_{BC}$ (В)	$U_{ca}=U_{CA}$ (В)	I_A (мА)	I_B (мА)	I_C (мА)	U_{O1O} (В)	I_N (мА)
Y / Y	розрахунком											
	експериментом											
Y / Y_0	розрахунком											
	експериментом											

Таблиця 1.3 – Результати експериментів та розрахунків електричного кола «зірка-зірка» з нейтральним проводом при несиметричному навантаженні

Спосіб з'єднання навантаження	Визначено	$U_{aO1}=U_{AO}$ (В)	$U_{bO1}=U_{BO}$ (В)	$U_{cO1}=U_{CO}$ (В)	$U_{ab}=U_{AB}$ (В)	$U_{bc}=U_{BC}$ (В)	$U_{ca}=U_{CA}$ (В)	I_A (мА)	I_B (мА)	I_C (мА)	I_N (мА)
Y / Y_0	розрахунком										
	експериментом										

Вимкнути нейтральний провід (рис. 1.1). Провести виміри всіх величин, що вказані в таблиці 1.4, і занести в таблицю 1.4 результати експериментів.

Таблиця 1.4 – Результати експериментів та розрахунків електричного кола «зірка-зірка» за відсутності нейтрального проводу при несиметричному навантаженні

Спосіб з'єднання навантаження	Визначено	U_{AO} — U_{aO1} (В)	U_{BO} — U_{bO1} (В)	U_{CO} — U_{cO1} (В)	$U_{ab}=U_{AB}$ (В)	$U_{bc}=U_{BC}$ (В)	$U_{ca}=U_{CA}$ (В)	I_A (мА)	I_B (мА)	I_C (мА)	U_{O1O} (В)
Y/Y	розрахунком										
	експериментом										

Експеримент 3 Дослідження аварійних режимів у трифазному колі

Обрив лінійного проводу у фазі «А»

В електричному колі «зірка-зірка» з нейтральним проводом вимкнути лінійний провід у фазі «А», отримати електричне коло, що відповідає схемі на рисунку 1.4. Виміряти всі величини, вказані в таблиці 1.5 (частина Y/Y_0). Результати експериментів занести в таблицю 1.5.

Вимкнути нейтральний провід, отримати схему на рисунку 1.5, виміряти всі величини, вказані в таблиці 1.5 (частина Y/Y). Результати експериментів занести в таблицю 1.5.

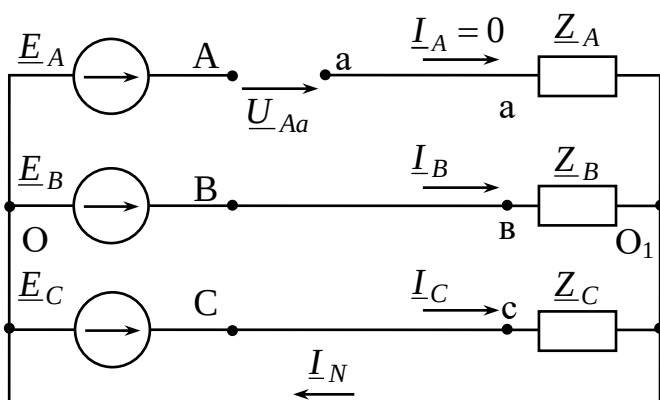


Рисунок 1.4 – Обрив лінійного проводу в фазі «А», схема з нейтральним проводом

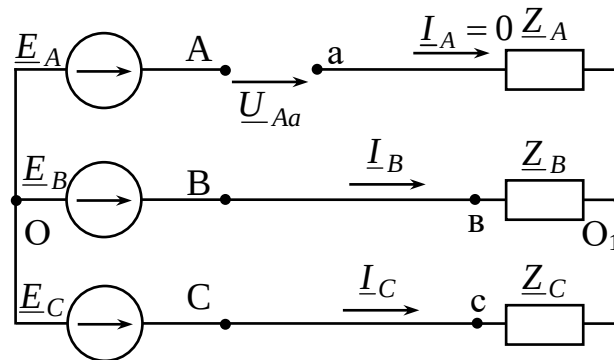


Рисунок 1.5 – Обрив лінійного проводу в фазі «А», схема без нейтрального проводу

Таблиця 1.5 – Результати експериментів та розрахунків для кола «зірка-зірка» за відсутності і з нейтральним проводом в режимі обриву лінійного проводу

Спосіб з'єд- нання наван- таження	Визна- чено	I_N (мА)	I_A (мА)	I_B (мА)	I_C (мА)	U_{AO}	U_{BO}	U_{CO}	U_{Aa} (В)	U_{AB} (В)	U_{BC} (В)	U_{CA} (В)	U_{aB} (В)	U_{bc} (В)	U_{ca} (В)	U_{O1O} (В)
						—	—	—								
						U_{aO1} (В)	U_{bO1} (В)	U_{cO1} (В)								
Y / Y_0	роз- рахунком															
	експери- ментом															
Y / Y_0	роз- рахунком															
	експери- ментом															

Коротке замикання у фазі «А»

В електричному колі «зірка-зірка» без нейтрального проводу здійснити коротке замикання ємнісного опору (схема на рисунку 1.6). Провести виміри всіх величин, вказаних у таблиці 1.6, і занести результати експериментів у таблицю 1.6.

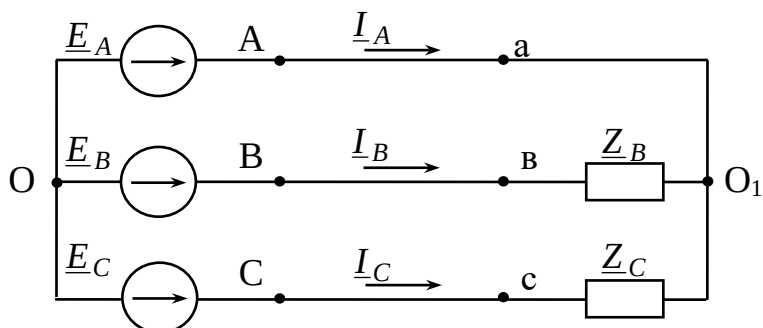


Рисунок 1.6 – Коротке замикання у фазі «А»

Таблиця 1.6 – Результати експериментів та розрахунків для електричного кола «зірка-зірка» при короткому замиканні у фазі «А»

Спосіб з'єднання наванта- ження	Визначено	U_{AO} — U_{aO1} (В)	U_{BO} — U_{bO1} (В)	U_{CO} — U_{cO1} (В)	$U_{ab}=$ $=U_{AB}$ (В)	$U_{bc}=$ $=U_{BC}$ (В)	$U_{ca}=$ $=U_{CA}$ (В)	I_A (мА)	I_B (мА)	I_C (мА)	U_{O1O} (В)
Y / Y	розрахунком										
	експериментом										

1.6 Обробка експериментальних даних

Для розрахунків треба використовувати експериментальні середні дані значень E_Φ та R_Φ :

1. Для схеми «зірка-зірка» за відсутності нейтрального проводу при симетричному навантаженні (рис. 1.1) розрахувати лінійні напруги, фазні струми в навантаженні. Переконайтеся, що при симетричному навантаженні напруга зміщення нейтралі $\underline{U}_{O_1O} = 0$. Результати розрахунків занести в таблицю 1.2.

2. Для схеми «зірка-зірка» з нейтральним проводом при симетричному навантаженні (рис. 1.2) розрахувати лінійні напруги, фазні струми в навантаженні, Переконайтеся, що при симетричному навантаженні струм нейтрального проводу $\underline{I}_N = 0$. Результати розрахунків занести в таблицю 1.2. Побудувати векторну діаграму напруг та струмів, яка буде однаковою при симетричному навантаженні для схем «зірка-зірка» з нейтральним та без нейтрального проводу.

3. Для схеми «зірка-зірка» з нейтральним проводом при несиметричному навантаженні розрахувати фазні струми в навантаженні, струм у нейтральному

проводі, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 1.3.

4. Для схеми «зірка-зірка» без нейтрального проводу при несиметричному навантаженні розрахувати напругу зміщення нейтралі $\underline{U}_{O_1O}$, фазні та лінійні напруги, фазні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 1.4.

5. Для схеми «зірка-зірка» з нейтральним проводом при обриві лінійного проводу у фазі «А» розрахувати фазні й лінійні напруги, напругу між точками розриву $\underline{U}_{Aa}$, струми в навантаженні, струм у нейтральному проводі; побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 1.5.

6. Для схеми «зірка-зірка» без нейтрального проводу при обриві лінійного проводу у фазі «А» розрахувати напругу зміщення нейтралі $\underline{U}_{O_1O}$, фазні й лінійні напруги, напругу між точками розриву $\underline{U}_{Aa}$, струми в навантаженні, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 1.5.

7. Для схеми «зірка-зірка» без нейтрального проводу при короткому замиканні навантаження у фазі «А» розрахувати напругу зміщення нейтралі $\underline{U}_{O_1O}$, фазні та лінійні напруги, фазні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 1.6.

Контрольні запитання

1. Поясніть, які системи називають багатофазними. Чому трифазні системи набули найбільшого розповсюдження?

2. Що таке порядок чергування фаз?

3. Поясніть, яке навантаження називається симетричним та несиметричним?

4. Подайте визначення лінійних і фазних струмів і напруг.

5. Поясніть, які існують співвідношення між лінійними й фазними струмами і напругами в трифазних електричних колах «зірка-зірка»?
6. Поясніть, чи може струм в нейтральному проводі дорівнювати нулю при несиметричному навантаженні фаз?
7. Проаналізуйте, чому не застосовується трифазна трипровідна система при несиметричному навантаженні.
8. Як проводять розрахунок струмів у схемі «зірка-зірка» при несиметричному навантаженні?
9. Як вимірюють активну потужність у трипровідних та чотирипровідних електричних колах «зірка-зірка»?
10. Поясніть, як проводять баланс потужностей у трифазних електричних колах?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ «ЗІРКА-ТРИКУТНИК»

2.1 Мета роботи

Метою виконання другої лабораторної роботи є:

- оволодіти методикою розрахунку трифазних електричних кіл синусоїдного струму при з'єднанні приймача трикутником при симетричному та несиметричному навантаженні без урахування падіння напруги в лінії;
- експериментально дослідити розподіл струмів у трифазній системі при симетричному й несиметричному навантаженні фаз без урахування падіння напруг у лінії;
- експериментально дослідити розподіл струмів у трифазній системі при несиметричному навантаженні фаз з урахуванням падіння напруги в лінії;
- порівняти експериментальні дані з розрахунковими та проаналізувати їх за допомогою векторних діаграм струмів і топографічних діаграм напруг.

2.2 Обладнання і прилади

Як обладнання і прилади використовують:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд НДЛС-1 (блок змінної трифазної напруги);
- елементи набірної поля стенду;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр.

2.3 Підготовчий етап лабораторної роботи

Результатом підготовчого етапу є:

- набуття навичок щодо проведення розрахунку трифазних кіл при з'єднанні приймача трикутником при симетричному й несиметричному навантаженні без урахування та з урахуванням падіння напруги в лінії;

- набуття навичок щодо проведення розрахунку аварійних режимів роботи трифазних кіл «зірка-трикутник» (обрив лінійного, фазного проводу);
- набуття навичок побудови векторних діаграм струмів і напруг за різних режимів роботи трифазної системи «зірка-трикутник».

2.4 Загальні відомості

При з'єднанні в трикутник фазні обмотки генератора (трансформатора) або навантаження поєднані послідовно так, що «початок» однієї фази генератора (трансформатора) або навантаження з'єднується з «кінцем» іншої фази (рис. 2.1). Кожна фаза навантаження вмикається між лінійними проводами, внаслідок чого вона перебуває під лінійною напругою. Лінійна напруга одночасно є і фазною напругою, тобто $\underline{U}_\Delta = \underline{U}_\Phi$.

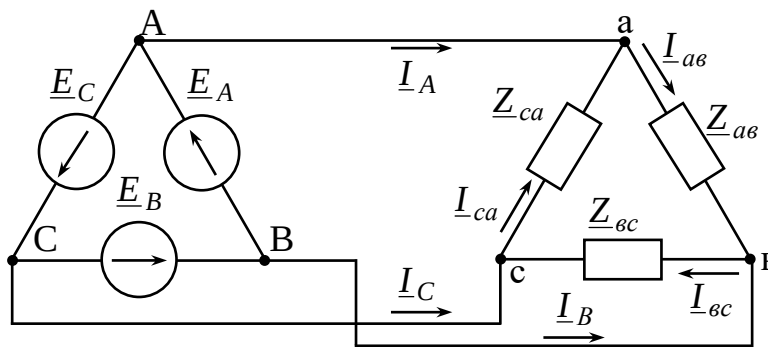


Рисунок 2.1 – Трифазна схема «трикутник-трикутник»

У роботі досліджується електричне коло «зірка-трикутник», коли обмотки генератора з'єднані зіркою, а навантаження – трикутником (рис. 2.2). За додатний напрям лінійних струмів ($\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$) приймають напрям від

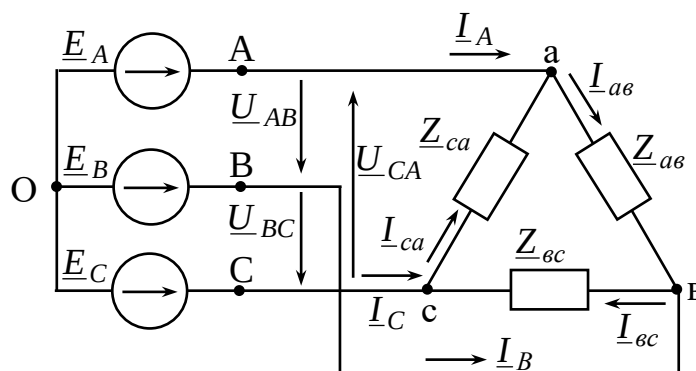


Рисунок 2.2 – Трифазна схема «зірка-трикутник»

джерела до навантаження. Додатний напрям фазних струмів вибирають від вузла «а» до вузла «в» (струм $\underline{I}_{av}$), від вузла «в» до вузла «с» (струм $\underline{I}_{vc}$), від вузла «с» до вузла «а» (струм $\underline{I}_{ca}$).

Комплекси фазних струмів для схеми рисунку 2.2 без урахування опорів проводів визначають за формулами

$$\underline{I}_{av} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{av}} = \underline{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_{av}; \quad \underline{I}_{vc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{vc}} = \underline{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_{vc}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} = \underline{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_{ca}, \quad (2.1)$$

де $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ – лінійні напруги;

$\underline{Y}_{av}$; $\underline{Y}_{vc}$; $\underline{Y}_{ca}$ – комплекси фазних провідностей:

$$\underline{Y}_{av} = \frac{1}{\underline{Z}_{av}}; \quad \underline{Y}_{vc} = \frac{1}{\underline{Z}_{vc}}; \quad \underline{Y}_{ca} = \frac{1}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (2.2)$$

Лінійні струми визначають за першим законом Кірхгофа для вузлів «а», «в», «с»:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{av} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{vc} - \underline{I}_{av}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{vc}. \quad (2.3)$$

При симетричному режимі фазні струми в усіх фазах однакові й зміщені відносно своїх фазних напруг на однаковий кут, що визначається співвідношенням

$$\varphi = \arctg \frac{X_\phi}{R_\phi}, \quad (2.5)$$

де X_ϕ , R_ϕ – відповідно, реактивний та активний опори навантаження.

Лінійні струми при симетричному режимі за модулем будуть рівними між собою, в $\sqrt{3}$ разів більшими, ніж фазні струми, а за фазою будуть відставати на кут 30° при прямому чергуванні фаз, тобто

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{av} \angle -30^\circ; \quad \underline{I}_B = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{vc} \angle -30^\circ; \quad \underline{I}_C = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ca} \angle -30^\circ \quad (2.6)$$

Таким чином, при симетричному навантаженні фаз розрахунок трифазного кола можна звести до розрахунку однієї фази.

На рисунку 2.3 показана векторна діаграма напруг і струмів при з'єднанні трикутником такого симетричного навантаження, що має активний характер,

тобто $\underline{Z}_{av} = \underline{Z}_{vc} = \underline{Z}_{ca} = R_\phi$. При цьому фазні струми $\underline{I}_{av}$, $\underline{I}_{vc}$, $\underline{I}_{ca}$ співпадають по фазі з лінійними напругами $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ (відповідно). Лінійні струми в цьому випадку співпадають по фазі з фазними напругами $\underline{U}_{AO}$, $\underline{U}_{BO}$, $\underline{U}_{CO}$.

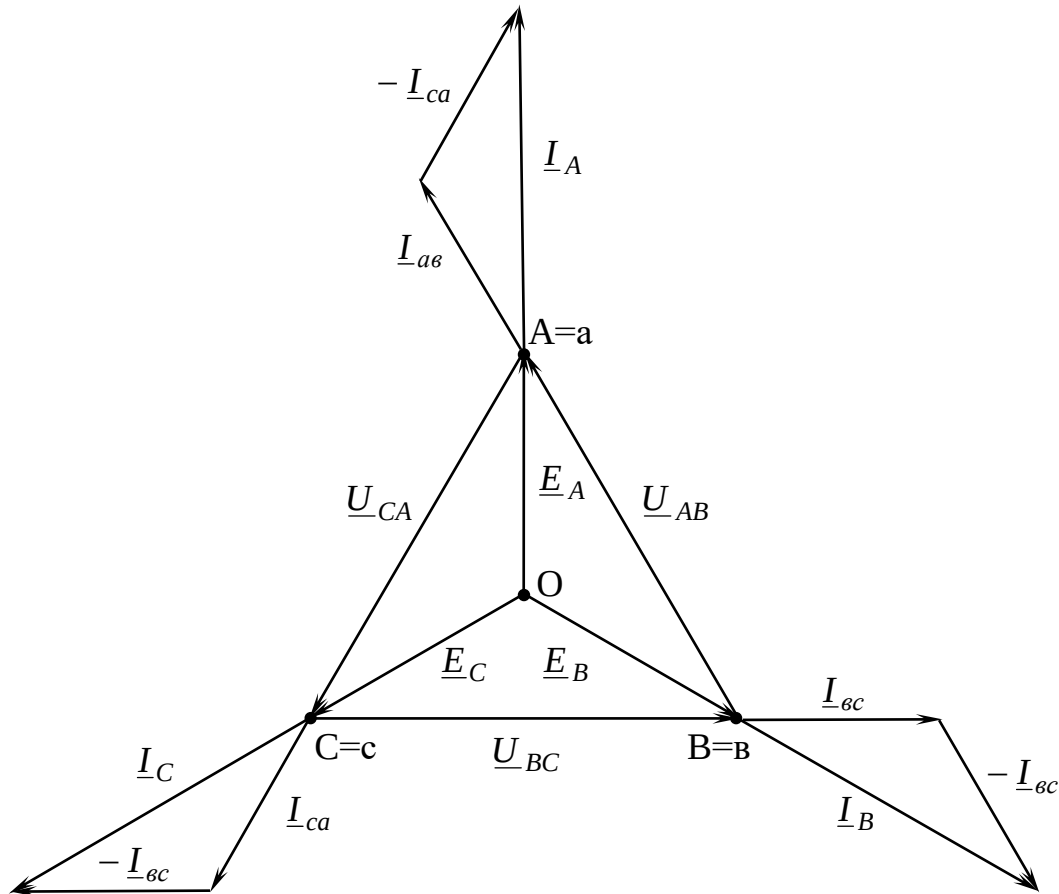


Рисунок 2.3 – Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні симетричного навантаження ($\underline{Z}_{av} = \underline{Z}_{vc} = \underline{Z}_{ca} = R_\phi$) трикутником

При несиметричному навантаженні лінійні струми можуть бути більшими

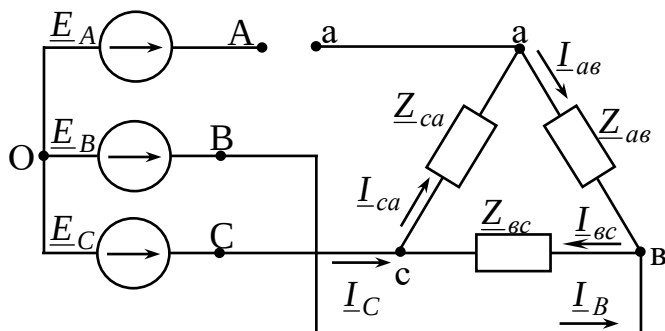


Рисунок 2.4 – Обрив лінійного проводу у фазі «А»

чи меншими порівняно з фазними струмами, тобто несиметричне навантаження фаз спричиняє значну асиметрію лінійних струмів, які можуть бути визначені графічно або аналітично за формулами (2.4).

Якщо не враховувати втрати напруги в лінійних проводах, то

зміна навантаження у фазах не впливає на величину фазних напруг.

При обриві одного з лінійних проводів, наприклад, у фазі «А» (рис. 2.4), режим роботи схеми змінюється. Опір $\underline{Z}_{bc}$ буде, як і раніше, перебувати під лінійною напругою $\underline{U}_{BC}$, тому струм $\underline{I}_{bc}$ у цій фазі не зміниться. Опори фаз $\underline{Z}_{av}$ і $\underline{Z}_{ca}$ виявляються послідовно з'єднаними під напругою « $-\underline{U}_{BC}$ ». Якщо $\underline{Z}_{av} = \underline{Z}_{ca}$, то напруга $-\underline{U}_{BC}$ розподіляється між ними порівну і кожен з опорів опиниться під напругою $-0,5 \cdot \underline{U}_{BC}$. Якщо $\underline{Z}_{av} \neq \underline{Z}_{ca}$, то напруга $-\underline{U}_{BC}$ розподілиться між цими опорами, а на ділянках «ав» і «са» протікатиме один і той самий струм:

$$\underline{I}_{av} = \underline{I}_{ca} = \frac{-\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{av} + \underline{Z}_{ca}}. \quad (2.7)$$

Лінійні струми визначають так:

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_C = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_A = 0. \quad (2.8)$$

При обриві одного з фазних проводів, наприклад, у фазі «вс» (рис. 2.4),

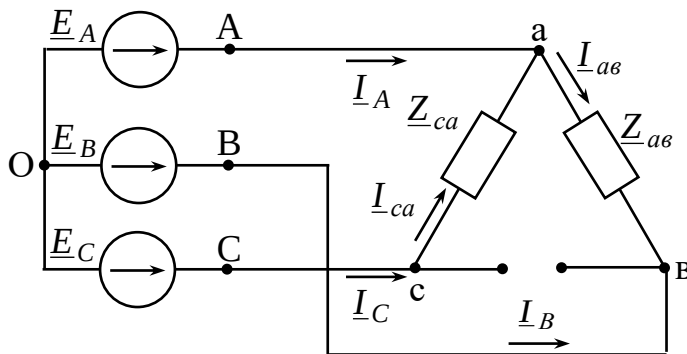


Рисунок 2.5 – Обрив фазного проводу у фазі «вс»

фазний струм $\underline{I}_{bc} = 0$, струми $\underline{I}_{ca}$ та $\underline{I}_{av}$ не змінюються, тому лінійний струм $\underline{I}_A = \underline{I}_{av} - \underline{I}_{ca}$ зберігає своє значення, а лінійні струми $\underline{I}_B$ та $\underline{I}_C$ змінюються:

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_{av}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca}. \quad (2.9)$$

Таким чином, зміна навантаження в одній із фаз зумовлює зміну двох лінійних

струмів і не впливає на величину третього лінійного струму і струмів двох інших фаз.

Розглянемо загальний випадок розрахунку трифазного кола «зірка-трикутник» з урахуванням опорів лінійних проводів при несиметричному навантаженні фаз (рис. 2.6).

Розрахунок такої схеми потрібно виконувати шляхом заміни трикутника опорів еквівалентною зіркою. Опори променів зірки:

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{a\phi} \cdot \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{a\phi} + \underline{Z}_{\phi c} + \underline{Z}_{ca}}; \quad \underline{Z}_\phi = \frac{\underline{Z}_{\phi c} \cdot \underline{Z}_{a\phi}}{\underline{Z}_{a\phi} + \underline{Z}_{\phi c} + \underline{Z}_{ca}}; \quad \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{ca} \cdot \underline{Z}_{\phi c}}{\underline{Z}_{a\phi} + \underline{Z}_{\phi c} + \underline{Z}_{ca}}. \quad (2.10)$$

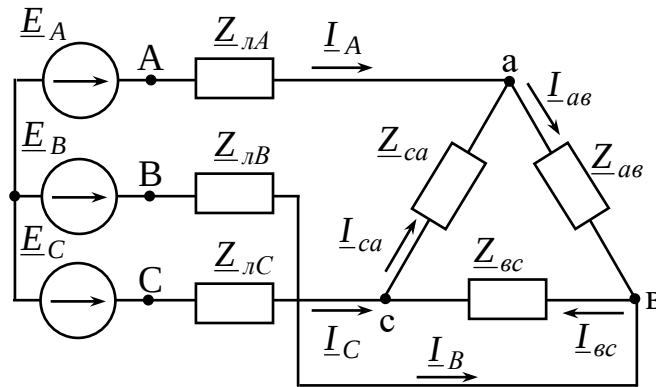


Рисунок 2.6 – Схема «зірка-трикутник»
з опорами в лінійних проводах

Якщо навантаження фаз симетричне ($\underline{Z}_{a\phi} = \underline{Z}_{\phi c} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\phi$), то опір променів еквівалентної зірки

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_\phi = \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_\phi}{3}. \quad (2.11)$$

У результаті перетворення одержимо еквівалентну схему, зображену на рисунку 2.7. Лінійні струми $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ розраховують так, як для схеми «зірка-зірка» при несиметричному навантаженні за відсутності нейтрального проводу, а саме:

– визначають повні опори ($\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$) та провідності ($\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$) кожної фази (опори лінійних проводів ввімкнені послідовно з опорами відповідних променів зірки):

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_a + \underline{Z}_{\phi A}, \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_\phi + \underline{Z}_{\phi B}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{Z}_C = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{\phi C}, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}; \quad (2.12)$$

– визначають напругу зміщення нейтралі:

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad (2.13)$$

– визначають лінійні струми:

$$\underline{I}_A = (\underline{E}_A - \underline{U}_{O_1O}) \cdot \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = (\underline{E}_B - \underline{U}_{O_1O}) \cdot \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = (\underline{E}_C - \underline{U}_{O_1O}) \cdot \underline{Y}_C. \quad (2.14)$$

Фазні струми в навантаженнях $\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ вихідної схеми знаходять за законом Ома:

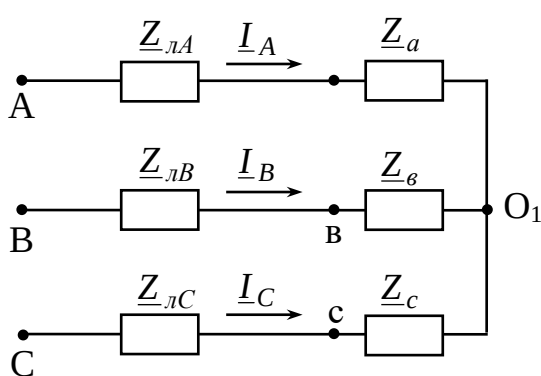


Рисунок 2.7 – Еквівалентна схема

$$\underline{I}_{a\phi} = \frac{\underline{U}_{a\phi}}{\underline{Z}_{a\phi}}; \quad \underline{I}_{\phi c} = \frac{\underline{U}_{\phi c}}{\underline{Z}_{\phi c}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}, \quad (2.14)$$

де $\underline{U}_{a\phi}; \underline{U}_{\phi c}; \underline{U}_{ca}$ – лінійні напруги на опорах $\underline{Z}_{a\phi}, \underline{Z}_{\phi c}, \underline{Z}_{ca}$ схеми рисунка 2.7.

Лінійні напруги на навантаженні:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{a\phi} &= \underline{U}_{aO_1} - \underline{U}_{\phi O_1} = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a - \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_\phi; \\ \underline{U}_{\phi c} &= \underline{U}_{\phi O_1} - \underline{U}_{cO_1} = \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_\phi - \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c; \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{U}_{cO_1} - \underline{U}_{aO_1} = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c - \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a. \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.5 Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, наведених у таблиці 2.1, варіант за номером стенда. Доцільно перед проведенням експериментів за вихідними даними провести основні розрахунки. Схеми треба складати так, щоб мати змогу провести виміри струмів і напруг, де це потрібно.

Експеримент 1 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при симетричному навантаженні ($\underline{Z}_{a\phi} = \underline{Z}_{\phi c} = \underline{Z}_{ca} = R_\phi$)

Зібрати електричне коло «зірка-трикутник» за схемою рисунка 2.2. Фазні навантаження $\underline{Z}_{a\phi}, \underline{Z}_{\phi c}, \underline{Z}_{ca}$ – активні опори R_ϕ , що обирають відповідно до свого варіанта з таблиці 2.1. Провести вимірювання всіх величин, вказаних у таблиці 2.2 (пункт 1). Результати експериментів занести в таблицю 2.2.

Експеримент 2 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при аварійному режимі – обрив лінійного проводу в лінії «А»

В електричному колі «зірка-трикутник» вимкнути лінійний провід у фазі «А» (схема на рисунку 2.4). Провести вимірювання всіх величин, вказаних у таблиці 2.2 (пункт 2). Результати експериментів занести в таблицю 2.2.

Експеримент 3 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при аварійному режимі – обрив фазного проводу у фазі «вс»

В електричному колі «зірка-трикутник» (схема на рисунку 2.2) вилучити навантаження у фазі «вс», отримати електричне коло за схемою рисунка 2.5. Провести вимірювання всіх величин, вказаних у таблиці 2.2 (пункт 3). Результати експериментів занести в таблицю 2.2.

Експеримент 4 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні

Замінити активне навантаження у фазі «вс» ємнісним опором X_C , що дорівнює R_ϕ , тобто $R_\phi = X_C$, а величина ємності, відповідно, –

$$C = \frac{10^6}{R_\phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \text{ мкФ.}$$

Розраховану ємність підставити замість активного опору R_ϕ у фазу «вс» з блоку змінної ємності. Провести вимірювання всіх величин, вказаних у таблиці 2.2 (пункт 4). Результати експериментів занести в таблицю 2.2.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Номер варіанта	E_ϕ , В	R_ϕ , №	R_λ , №
1	2	3	4
1	15	07	01
2	16	08	02
3	18	09	01

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
4	19	10	03
5	11	07	02
6	17	10	03
7	17	08	02
8	14	07	01
9	18	09	02
10	20	10	03
11	14	08	02
12	17	09	02
13	13	07	01
14	20	09	01

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків та експериментів

№ з/п	Вид схеми	Визначено	$I_{ав}$	$I_{вс}$	$I_{са}$	I_A	I_B	I_C	$U_{ав}$	$U_{вс}$	$U_{са}$
			(мА)	(мА)	(мА)	(мА)	(мА)	(мА)	— U_{AB} (В)	— U_{BC} (В)	— U_{CA} (В)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Симетричне навантаження	розрахунком									
		експериментом									
2	Обрив лінійного проводу («А»)	розрахунком									
		експериментом									
3	Обрив фазного проводу («вс»)	розрахунком									
		експериментом									

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	Несиметричне навантаження (ємність в фазі «вс»)	розрахунком									
		експериментом									
5	Несиметричне навантаження (або симетричне), активні опори в лініях	розрахунком									
		експериментом									

Експеримент 5 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні та з активними опорами

$R_{\text{л}}$ в лінійних проводах

Зібрати електричне коло за схемою рисунка 2.6. Фазні навантаження $\underline{Z}_{\text{ав}}$; $\underline{Z}_{\text{са}}$ – активні опори $R_{\text{ф}}$, навантаження $\underline{Z}_{\text{вс}}$ – ємнісний опір відповідно до експерименту 4. Навантаження в лінійних проводах – активні опори $R_{\text{л}}$ відповідно до таблиці 2.1. Провести виміри. Результати експериментів занести в таблицю 2.2 (пункт 5).

За вказівкою викладача експеримент 5 може виконуватися при симетричному навантаженні, тобто $\underline{Z}_{\text{ав}} = \underline{Z}_{\text{вс}} = \underline{Z}_{\text{са}} = R_{\text{ф}}$.

2.6 Обробка експериментальних даних

Для розрахунків треба використовувати експериментальні середні дані значень $E_{\text{ф}}$ та $R_{\text{ф}}$:

1. Для схеми «зірка-трикутник» при симетричному навантаженні розрахувати лінійні напруги, фазні струми і лінійні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2 (пункт 1).

2. Для схеми «зірка-трикутник» при обриві лінійного проводу «А» розрахувати лінійні напруги, фазні струми і лінійні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2 (пункт 2). Розрахувати напругу на розриві, тобто $\underline{U}_{Aa}$.

3. Для схеми «зірка-трикутник» при обриві фазного проводу фази «вс» розрахувати лінійні напруги, фазні й лінійні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2 (пункт 3).

4. Для схеми «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні розрахувати фазні й лінійні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2 (пункт 4).

5. Для схеми «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні з активними опорами в лінійних проводах (R_L) розрахувати лінійні напруги $\underline{U}_{av}$, $\underline{U}_{vc}$, $\underline{U}_{ca}$ на навантаженнях, фазні й лінійні струми, побудувати векторну діаграму напруг і струмів. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2 (пункт 5).

6. Побудова векторної діаграми напруг та струмів для трифазного кола (схема на рисунку 2.6) полягає в такому:

- в обраному масштабі за напругою ($m_U, \frac{V}{cm}$) з точки «О» відкладають вектори фазних напруг, кінці цих векторів позначають «А», «В», «С»;

- вектори лінійних напруг отримують графічно за формулами $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{AO} - \underline{U}_{BO}$, $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{BO} - \underline{U}_{CO}$, $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{CO} - \underline{U}_{AO}$ (діаграма на рисунку 2.3);

- знаходять положення точок «а», «в», «с» ($\varphi_0 = 0$, $\varphi_a = \varphi_0 + \underline{E}_A - \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_L$; $\varphi_0 = 0$, $\varphi_v = \varphi_0 + \underline{E}_B - \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_L$; $\varphi_0 = 0$, $\varphi_c = \varphi_0 + \underline{E}_C - \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_L$);

- у масштабі за струмом ($m_I, \frac{A}{cm}$) будують із точок «а», «в», «с» вектори фазних струмів $\underline{I}_{av}$, $\underline{I}_{vc}$, $\underline{I}_{ca}$ відповідно; а потім геометрично

отримують вектори лінійних струмів $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ за першим законом Кірхгофа ($\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$).

7. Для схем на рисунку 2.2 при побудові діаграми положення точок «а», «в», «с» знаходити не треба, тому що $A = a, B = b, C = c$ (див. діаграму на рисунку 2.3).

8. Для схеми на рисунку 2.4 – $B = b, C = c$, положення точки «а» визначається розрахунком комплексним значенням напруги на розриві $\underline{U}_{Aa}$.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні переваги й недоліки поєднання трикутником фазної обмотки генератора, трансформатора або навантаження.

2. Які існують співвідношення між лінійними й фазними струмами та напругами при з'єднанні трикутником?

3. Наведіть порядок розрахунку симетричних і несиметричних кіл при з'єднанні навантаження трикутником без урахування опорів лінійних проводів.

4. Наведіть порядок розрахунку симетричних і несиметричних кіл при з'єднанні навантаження трикутником з урахуванням опорів лінійних проводів.

5. Як відобразиться перегорання одного з лінійних запобіжників на розжарювання трьох однакових груп ламп, з'єднаних трикутником?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРУ ОПОРУ НА ФОРМУ КРИВОЇ СТРУМУ В КОЛАХ НЕСИНУСОЇДНОГО ПЕРІОДИЧНОГО СТРУМУ

3.1 Мета роботи

Метою виконання третьої лабораторної роботи є:

- ознайомлення з роботою осцилографа;
- дослідження електричного кола, що живиться синусоїдною напругою і має у своєму складі нелінійний елемент;
- розкладання несинусоїдної періодичної кривої струму в тригонометричний ряд Фур'є;
- дослідження впливу характеру опору (активного, індуктивного, ємнісного) на форму кривої струму електричного кола, що живиться несинусоїдною періодичною напругою.

3.2 Обладнання і прилади

Як обладнання і прилади використовують:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд НДЛС-1;
- елементи набірної плати стенду;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр;
- цифровий осцилограф SDS 1022 DL.

3.3 Підготовчий етап лабораторної роботи

Результатом підготовчого етапу є:

- набуття навичок із розкладання в ряд Фур'є несинусоїдних періодичних кривих геометрично неправильної форми;
- набуття навичок щодо проведення розрахунку кіл із несинусоїдними струмами та напругами.

3.4 Загальні відомості

В електротехніці з різних причин можуть виникати несинусоїдні періодичні струми та напруги (наявність в електричному колі джерела енергії, що виробляє несинусоїдну напругу, наявність у колі з джерелами синусоїдної напруги нелінійних елементів тощо).

Основою розрахунку при цьому є розкладання несинусоїдної напруги (струму) в тригонометричні ряди Фур'є:

$$f(\omega t) = A^{(0)} + A_m^{(1)/} \cdot \sin(\omega t) + A_m^{(1) //} \cdot \cos(\omega t) + A_m^{(2)/} \cdot \sin(2\omega t) + A_m^{(2) //} \cdot \cos(2\omega t) + A_m^{(3)/} \cdot \sin(3\omega t) + A_m^{(3) //} \cdot \cos(3\omega t) + \dots + A_m^{(k)/} \cdot \sin(k\omega t) + A_m^{(k) //} \cdot \cos(k\omega t) + \dots \quad (3.1)$$

Нульова гармоніка (постійна складова):

$$A^{(0)} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t. \quad (3.2)$$

Амплітуда синусної складової гармоніки з номером k :

$$A_m^{(k)/} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(k\omega t) d\omega t. \quad (3.3)$$

Амплітуда косинусної складової гармоніки з номером k :

$$A_m^{(k) //} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(k\omega t) d\omega t. \quad (3.4)$$

Ряд Фур'є може також бути записаний у вигляді суми нульової гармоніки та синусних складових із ненульовими початковими фазами:

$$f(\omega t) = A^{(0)} + \sum_{k=1}^n A_m^{(k)} \cdot \sin(k \cdot \omega t + \varphi^{(k)}), \quad (3.5)$$

де $A_m^{(k)} = \sqrt{A_m^{(k)/2} + A_m^{(k) // 2}}$ – амплітуда k -ї гармоніки; (3.6)

$$\varphi^{(k)} = \arctan \frac{A_m^{(k) //}}{A_m^{(k)/}} \text{ – початкова фаза } k\text{-ї гармоніки.} \quad (3.7)$$

Діюче (ефективне) значення несинусоїдної періодичної функції:

$$A = \sqrt{A^{(0)2} + \frac{A_m^{(1)2}}{2} + \frac{A_m^{(2)2}}{2} + \frac{A_m^{(3)2}}{2} + \dots + \frac{A_m^{(k)2}}{2}}. \quad (3.8)$$

Несинусоїдні періодичні криві характеризуються коефіцієнтами:

- форми кривої (відношення діючого значення до середнього за модулем значення) – $K_\phi = \frac{A}{A_{cp}};$
- амплітуди (відношення амплітудного значення до діючого значення) – $K_a = \frac{A_m}{A};$
- спотворень (відношення діючого значення першої гармоніки до діючого значення всієї кривої) – $K_c = \frac{A^{(1)}}{A}.$

Усі несинусоїдні періодичні криві, з якими мають справу в електротехніці, поділяються на дві групи – криві геометрично правильної форми та криві геометрично неправильної форми. Ряди Фур'є для несинусоїдних періодичних кривих геометрично правильної форми наведені в довідковій літературі.

Несинусоїдні періодичні криві геометрично неправильної форми розкладаються в ряд Фур'є графоаналітичним методом. Останній полягає в заміні інтегралів (3.2), (3.3), (3.4) сумою кінцевого числа доданків. Для цього період функції 2π поділяють на n рівних інтервалів, кожен інтервал $\Delta\omega t = \frac{2\pi}{n}$ (зазвичай $n = 24$).

Таким чином, амплітуда нульової гармоніки

$$A^{(0)} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \Delta\omega t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} \left(f_p(\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} \right) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t), \quad (3.9)$$

де p – поточний індекс (змінюється p від 1 до n);

$f_p(\omega t)$ – значення функції $f(\omega t)$ у середині інтервалу з номером p , тобто

коли $\omega t = (p - 0,5) \cdot \Delta \omega t$.

Амплітуди синусної та косинусної складових гармоніки з номером k

$$\begin{aligned} A_m^{(k)/} &\approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t) \cdot \Delta \omega t = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \\ &= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t); \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} A_m^{(k)//} &\approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t) \cdot \Delta \omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} \left(f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} \right) = \\ &= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t)), \end{aligned} \quad (3.11)$$

де $\sin_p(k\omega t)$ і $\cos_p(k\omega t)$ – значення функцій $\sin(k\omega t)$, $\cos(k\omega t)$ в середині p -го інтервалу, тобто при $\omega t = (p - 0,5) \cdot \Delta \omega t$.

Періодичні несинусоїдні криві можуть мати деякі види симетрії, що спрощує їх розкладання в ряд Фур'є, бо ті чи інші гармоніки виключаються з ряду (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Види симетрії несинусоїдних періодичних кривих

№ з/п	Симетрія відносно	Математична умова	Гармоніки, що відсутні
1	осі ординат	$f(\omega t) = f(-\omega t)$	$A_m^{(k)/}$
2	початку координат	$f(\omega t) = -f(-\omega t)$	$A^{(0)} = A_m^{(k)//}$
3	осі абсцис	$f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$	$A^{(0)} = A_m^{(2k)/} = A_m^{(2k)//}$
4	одночасно випадок 2 і 3	$f(\omega t) = -f(-\omega t),$ $f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$	$A^{(0)} = A_m^{(2k)/} = A_m^{(k)//}$

Розглянемо приклад графоаналітичного розкладання кривої $u(\omega t)$ в ряд Фур'є (рис. 3.1). Потрібно враховувати, що крива має два види симетрії (відносно початку координат та осі абсцис), тому розбиваємо чверть періоду

функції $u(\omega t)$ на 6 рівних частин. Такий ряд Фур'є містить тільки непарні синусні гармоніки, а саме:

$$u(\omega t) = U_m^{(1)} \cdot \sin \omega t + U_m^{(3)} \cdot \sin 3\omega t + U_m^{(5)} \cdot \sin 5\omega t + \dots$$

Вимірюємо ординати функції $u_R(\omega t)$ посередині кожної ділянки. При розкладанні кривої $u_R(\omega t)$ в ряд Фур'є доцільно використовувати відповідні комп'ютерні програми (MathCad Professional, MS Excel тощо). Результати розкладання наведені в таблиці 3.2 (обмежуємося трьома членами ряду).

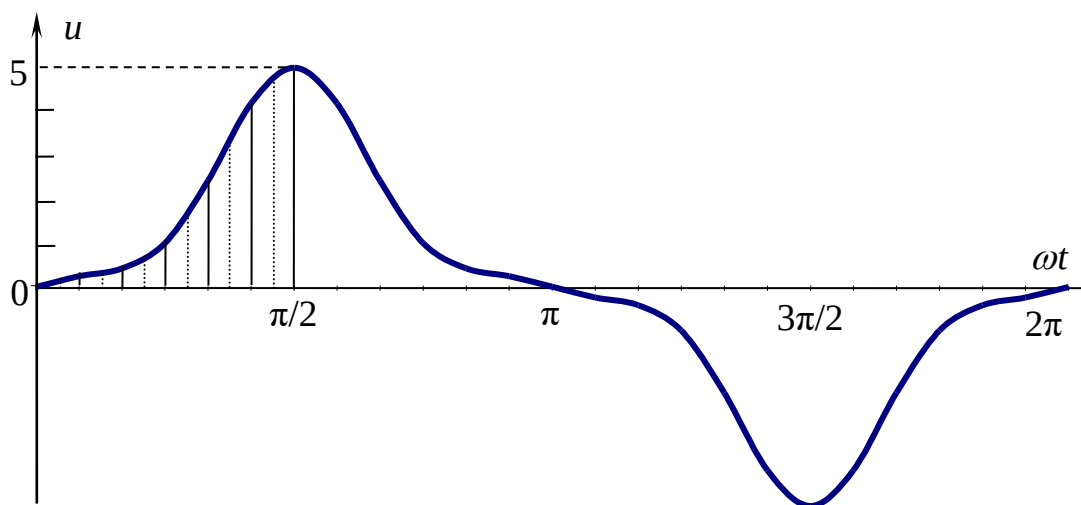


Рисунок 3.1 – Розкладання в ряд Фур'є несинусоїдної періодичної кривої $u_R(\omega t)$

Таблиця 3.2 – Розкладання в ряд Фур'є функції $u_R(\omega t)$

p	$u(\omega t)$	$k = 1$			$k = 3$			$k = 5$		
		ωt	$\sin \omega t$	$u \cdot \sin \omega t$	$3\omega t$	$\sin 3\omega t$	$u \cdot \sin 3\omega t$	$5 \cdot \omega t$	$\sin 5\omega t$	$u \cdot \sin 5\omega t$
1	0,25	7,5	0,130 5	0,032 6	22,5	0,382 7	0,095 7	37,5	0,608 8	0,152 2
2	0,42	22,5	0,382 7	0,160 7	67,5	0,923 9	0,388 0	112,5	0,923 9	0,388 0
3	0,67	37,5	0,608 8	0,407 9	112,5	0,923 9	0,619 0	187,5	-0,130 5	-0,087 5
4	1,67	52,5	0,793 4	1,324 9	157,5	0,382 8	0,639 2	262,5	-0,991 4	-1,655 7
5	3,33	67,5	0,923 9	3,076 5	202,5	-0,382 6	-1,274 0	337,5	-0,382 7	-1,274 3
6	4,67	82,5	0,991 4	4,630 0	247,5	-0,923 8	-4,314 3	412,5	0,793 4	3,705 0
Сума:		$\sum_1^6 1 = 9,632\ 7$			$\sum_1^6 3 = -3,846\ 4$			$\sum_1^6 5 = 1,227\ 7$		

Величина « ωt » для зручності представлена в градусах.

Знайдемо амплітуди напруги для першої, третьої та п'ятої гармонік $U_{mR}^{(1)}$, $U_{mR}^{(3)}$; $U_{mR}^{(5)}$. Враховуємо, що в таблиці 3.2 представлено графоаналітичний метод для чверті періоду, тоді амплітуди дорівнюватимуть, В:

$$U_{mR}^{(1)} = \frac{2 \cdot 4}{24} \cdot \sum_1^6 1 = \frac{1}{3} \cdot 9,6327 = 3,211;$$

$$U_{mR}^{(3)} = \frac{2 \cdot 4}{24} \cdot \sum_1^6 3 = \frac{1}{3} \cdot (-3,8464) = -1,282; \quad U_{mR}^{(5)} = \frac{2 \cdot 4}{24} \cdot \sum_1^6 5 = \frac{1}{3} \cdot 1,2277 = 0,409.$$

Таким чином, ряд Фур'є має такий вигляд:

$$u_R(\omega t) = 3,211 \cdot \sin \omega t - 1,282 \cdot \sin 3\omega t + 0,409 \cdot \sin 5\omega t, \text{ В.}$$

Розрахунок електричних кіл із періодичними несинусоїдними джерелами енергії

Потрібно зазначити, що електричні кола з несинусоїдними джерелами енергії розраховують методом суперпозицій (накладання). Порядок розрахунку такий:

- представляють несинусоїдну напругу чи струм джерела рядом Фур'є;
- розраховують комплексні опори віток для окремих гармонік, наприклад, для гармоніки з номером k :

$$\underline{z}^{(k)} = R + j \cdot \left(k \omega L - \frac{1}{k \omega C} \right) = R + j \cdot \left(k X_L^{(1)} - \frac{X_C^{(1)}}{k} \right), \quad (3.12)$$

де $X_L^{(1)}$, $X_C^{(1)}$ – індуктивний і ємнісний опори для першої гармоніки;

- розраховують струми і напруги на ділянках електричного кола від дії нульової гармоніки джерела, враховуючи, що падіння напруги на індуктивності від дії нульової гармоніки струму дорівнює нулю ($U_L^{(0)} = 0$, $X_L^{(0)} = 0$), а струм вітки з ємністю для нульової гармоніки відсутній ($I_C^{(0)} = 0$, $X_C^{(0)} \rightarrow \infty$);

- розраховують комплекси струмів і напруг на ділянках кола від дії першої гармоніки джерела, після цього – від дії другої гармоніки джерела та ін.;

– записують миттєві значення струмів і напруг на ділянках електричного кола для окремих гармонік;

– записують ряди Фур'є для струмів і напруг на ділянках електричного кола у вигляді суми миттєвих значень окремих гармонік.

Розглянемо розрахунок електричних кіл з періодичною несинусоїдними напругами на вході на прикладі схем, що досліджуються в роботі (рис. 3.5).

Нехай несинусоїдна вхідна напруга має форму трикутника (рис. 3.2).

Використовуємо стандартний вираз для ряду Фур'є, що відповідає такій формі (обмежуємося трьома членами ряду):

$$u_{ex}(\omega t) = \frac{8 \cdot U_{exm}}{\pi^2} \cdot \left(\sin(\omega t) - \frac{1}{9} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{1}{25} \cdot \sin(5\omega t) \right), \text{ В.}$$

Таким чином, миттєве значення напруги на вході

$$u_{ex}(\omega t) = \frac{8 \cdot U_{exm}}{\pi^2} \cdot \sin(\omega t) - \frac{8 \cdot U_{exm}}{9 \cdot \pi^2} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{8 \cdot U_{exm}}{25 \cdot \pi^2} \cdot \sin(5\omega t), \text{ В.}$$

Миттєве значення струму для схеми, що має активний характер (рис. 3.5, а),

$$i_R(\omega t) = \frac{u_{ex}(\omega t)}{R_1 + R_2} = \frac{8 \cdot U_{exm}}{\pi^2 \cdot (R_1 + R_2)} \cdot \sin(\omega t) - \frac{8 \cdot U_{exm}}{9 \cdot \pi^2 \cdot (R_1 + R_2)} \cdot \sin(3\omega t) + \frac{8 \cdot U_{exm}}{25 \cdot \pi^2 \cdot (R_1 + R_2)} \cdot \sin(5\omega t), \text{ А.}$$

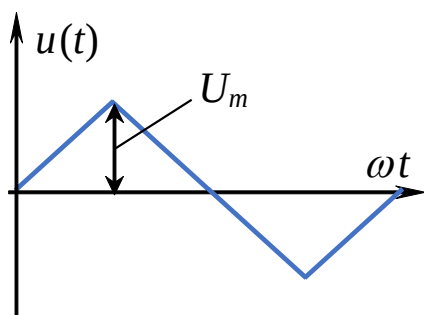


Рисунок 3.2 –
Трикутникова форма

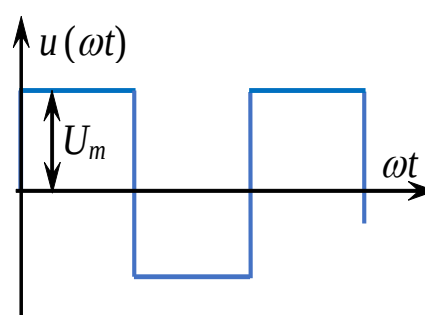


Рисунок 3.3 –
Прямокутна форма

Розрахунок схеми, що має активно-індуктивний характер (рис. 3.5, б), проводимо так:

– записуємо комплекси вхідної напруги для окремих гармонік (В):

$$\underline{U}_{\text{вхм}}^{(1)} = \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{\pi^2} \angle 0^\circ, \quad \underline{U}_{\text{вхм}}^{(3)} = -\frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{9 \cdot \pi^2} \angle 0^\circ, \quad \underline{U}_{\text{вхм}}^{(5)} = \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{25 \cdot \pi^2} \angle 0^\circ;$$

– визначаємо комплекси опорів схеми для 1, 3, 5 гармонік (Ом):

$$\underline{Z}^{(1)} = R_1 + R_k + j \cdot \omega L_k = \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (\omega L_k)^2} \angle \varphi^{(1)}, \text{ де } \varphi^{(1)} = \arctg \frac{\omega L_k}{R_1 + R_k},$$

$$\underline{Z}^{(3)} = R_1 + R_k + j \cdot 3 \cdot \omega L_k = \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (3 \cdot \omega L_k)^2} \angle \varphi^{(3)}, \text{ де } \varphi^{(3)} = \arctg \frac{3 \omega L_k}{R_1 + R_k},$$

$$\underline{Z}^{(5)} = R_1 + R_k + j \cdot 5 \cdot \omega L_k = \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (5 \cdot \omega L_k)^2} \angle \varphi^{(5)}, \text{ де } \varphi^{(5)} = \arctg \frac{5 \omega L_k}{R_1 + R_k};$$

– визначаємо комплекси амплітудних значень струмів для окремих гармонік (А):

$$\underline{I}_m^{(1)} = \frac{\underline{U}_{\text{вхм}}^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)}} = \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (\omega \cdot L_k)^2} \angle \varphi^{(1)}} = \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}} \cdot \angle -\varphi^{(1)}}{\pi^2 \cdot \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (\omega \cdot L_k)^2}},$$

$$\underline{I}_m^{(3)} = \frac{\underline{U}_{\text{вхм}}^{(3)}}{\underline{Z}^{(3)}} = \frac{-\frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{9 \cdot \pi^2} \angle 0}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (3 \cdot \omega \cdot L_k)^2} \angle \varphi^{(3)}} = -\frac{8 \cdot U_{\text{вхм}} \cdot \angle -\varphi^{(3)}}{9 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (3 \cdot \omega \cdot L_k)^2}},$$

$$\underline{I}_m^{(5)} = \frac{\underline{U}_{\text{вхм}}^{(5)}}{\underline{Z}^{(5)}} = \frac{\frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{25 \cdot \pi^2} \angle 0}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (5 \cdot \omega \cdot L_k)^2} \angle \varphi^{(5)}} = -\frac{8 \cdot U_{\text{вхм}} \cdot \angle -\varphi^{(5)}}{25 \cdot \pi^2 \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (5 \cdot \omega \cdot L_k)^2}};$$

– записуємо миттєве значення струму (А):

$$i_L(\omega t) = \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (5 \cdot \omega \cdot L_k)^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi^{(1)}) - \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{9 \cdot \pi^2 \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (3 \cdot \omega \cdot L_k)^2}} \times \\ \times \sin(3 \cdot \omega \cdot t - \varphi^{(3)}) + \frac{8 \cdot U_{\text{вхм}}}{25 \cdot \pi^2 \sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (5 \cdot \omega \cdot L_k)^2}} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t - \varphi^{(5)}).$$

Розрахунок схеми, що має активно-ємнісний характер (рис. 3.5, в) проводимо у такій самій послідовності:

– визначаємо комплекси опорів схеми для 1, 3 та 5 гармонік (Ом):

$$\underline{Z}^{(1)} = R_1 - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} = \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(1)}, \text{ де } \varphi^{(1)} = \arctg \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R_1},$$

$$\underline{Z}^{(3)} = R_1 - j \cdot \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C} = \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(3)}, \text{ де } \varphi^{(3)} = \arctg \frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C \cdot R_1},$$

$$\underline{Z}^{(5)} = R_1 - j \cdot \frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C} = \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(5)}, \text{ де } \varphi^{(5)} = \arctg \frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C \cdot R_1};$$

– комплекси амплітудних значень струмів для окремих гармонік (А):

$$\underline{I}_m^{(1)} = \frac{U_{\text{exm}}^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)}} = \frac{\frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{\pi^2} \angle 0}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(1)}} = \frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \angle \varphi^{(1)},$$

$$\underline{I}_m^{(3)} = \frac{U_{\text{exm}}^{(3)}}{\underline{Z}^{(3)}} = \frac{-\frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{9 \cdot \pi^2} \angle 0}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(3)}} = \frac{-8 \cdot U_{\text{exm}}}{9 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} \angle \varphi^{(3)},$$

$$\underline{I}_m^{(5)} = \frac{U_{\text{exm}}^{(5)}}{\underline{Z}^{(5)}} = \frac{\frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{25 \cdot \pi^2} \angle 0}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(5)}} = \frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{25 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} \angle \varphi^{(5)};$$

– запишемо миттєве значення струму (А):

$$\begin{aligned} i_C(\omega t) = & \frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi^{(1)}) - \frac{8 \cdot U_{\text{exm}} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi^{(3)})}{9 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} + \\ & + \frac{8 \cdot U_{\text{exm}}}{25 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t + \varphi^{(5)}). \end{aligned}$$

Якщо вхідна напруга має прямокутну форму, то методика розрахунку струмів така сама, тільки вхідна напруга матиме такий вигляд:

$$u_{\text{вх}}(\omega t) = \frac{4 \cdot U_{\text{max}}}{\pi} \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot \omega t) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot \omega t) \right), \text{ В.}$$

3.5 Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, що наведені в таблицях 3.3, 3.4, за номером стенда. Але потрібно зазначити, що вихідні дані можуть бути відкориговані викладачем з метою отримання більш характерної форми несинусоїдної кривої на екрані осцилографа.

Ознайомлення з роботою цифрового осцилографа SDS 1022 DL

Під час виконання вимірювань за допомогою осцилографа SDS 1022 DL необхідно підімкнути вимірювальний кабель до роз'єму першого каналу X (жовтий) та натиснути кнопку «Живлення» у верхній частині корпусу. Вимірювання здійснюється після підімкнення виводів кабелю до відповідної ділянки схеми в автоматичному режимі (натиснути синю кнопку «AUTO»). Після автоматичної синхронізації на екрані відобразиться розгорнення вимірюваної напруги. За необхідності можна здійснити додаткове масштабування за допомогою ручки «VERTICAL» першого (жовтого) каналу і ручки «HORIZONTAL». За допомогою натискання кнопки «RUN/STOP» здійснюється зупинка розгортання, кнопка після цього підсвічується червоним кольором. Повторне натискання цієї кнопки запускає розгортання. Необхідна інформація про параметри вимірюваної напруги (амплітуда, частота, постійна складова, масштабні коефіцієнти за напругою та часом) відображається на екрані осцилографа під осцилограмою.

При використанні цифрового осцилографа SDS 1022 DL зображення кривої фотографується або можна зберегти його на флеш-накопичувачі.

Експеримент 1 Отримання несинусоїдного струму в електричному колі з нелінійним елементом

Зібрати електричне коло за схемою рисунка 3.4. Як опір R_1 використати змінний опір R_4 з блока змінних опорів стенда НДЛС-1 ($R_1 = 10 \text{ Ом}$). Як джерело використати блок змінної напруги стенда НДЛС-1. Встановити частоту f та діюче значення вхідної синусоїдної напруги $U_{\text{вх}}$ відповідно до вихідних даних, наведених у таблиці 3.3 (варіант за номером стенда). Ці величини встановлюють за допомогою мультиметра, який під'єднують до входу кола.

Як нелінійний елемент обрати індуктивність із феромагнітним осердям L_K з елементів набірної поля відповідно до свого варіанта.

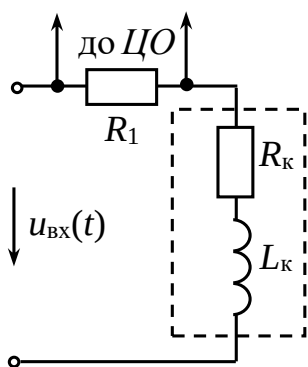


Рисунок 3.4 – Схема для отримання несинусоїдного струму

Під'єднати осцилограф до входу кола і виміряти величину амплітудного значення вхідної напруги $U_{\text{мвх}}$ та частоту f . Порівняти результати із встановленим за допомогою мультиметра діючим значенням $U_{\text{вх}}$. Сфотографувати криву вхідної напруги.

Під'єднати осцилограф до опору R_1 і сфотографувати криву несинусоїдної періодичної напруги на опорі R_1 , тобто $U_{R1}(\omega t)$.

Під'єднати осцилограф до котушки й сфотографувати криву несинусоїдної періодичної напруги на котушці $u_K(\omega t)$.

Величини $U_{\text{вх}}$ та f можуть корегуватися викладачем.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані до експерименту 1

Номер варіанта	U , В	L_K , №	f , КГц	Номер варіанта	U , В	L_K , №	f , КГц
1	2	3	4	5	6	7	8
1	6	25	0,5	8	11	25	1,0

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
2	18	23	2,5	9	15	24	2,0
3	6,5	22	1,0	10	16	26	2,0
4	7,5	21	1,5	11	10	21	2,0
5	8,0	24	3,0	12	12	26	1,0
6	8,5	21	1,0	13	15	24	2,5
7	7,5	23	1,5	14	9,5	22	1,5

Експеримент 2 Експериментальна перевірка впливу характеру електричного кола на форму струму при несинусоїдній входній напрузі

Зібрати електричне коло за схемою на рисунку 3.5, а. Значення U_m (встановлюється за осцилографом), f (встановлюється за мультиметром), R_2 , а також форму напруги взяти з таблиці 3.4 відповідно до свого варіанта. Опір R_1 для всіх варіантів – це опір $R01$ з елементів набірного поля.

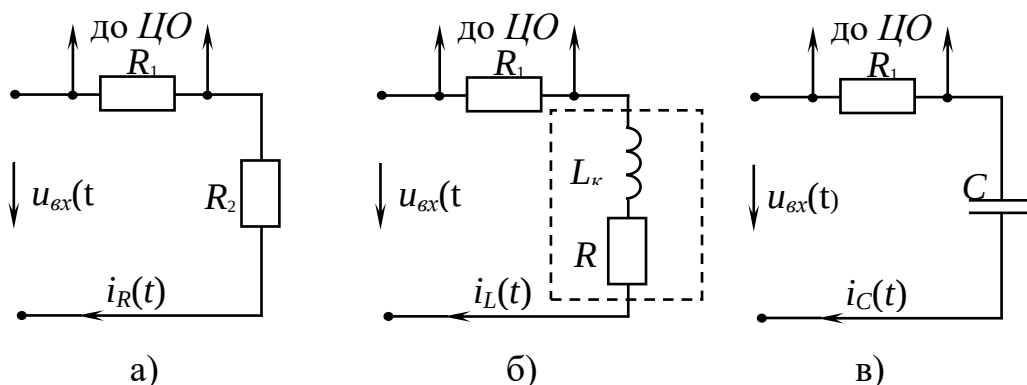


Рисунок 3.5 – Схеми для експериментальної перевірки впливу характеру електричного кола на форму кривої струму

Під'єднати осцилограф до входу кола і отримати на екрані стале зображення несинусоїдної входньої напруги; сфотографувати криву з екрана (вхідна напруга однакова для всіх схем рисунка 3.5). Записати масштаби за напругою і часом (частоту). Під'єднати осцилограф до опору R_1 і сфотографувати криву несинусоїдної напруги $u_{R1}(t)$. Записати масштаби за напругою і часом (частоту).

Таблиця 3.4 – Вихідні дані до експерименту 2

Номер варіанта	U_m , В	Форма несинусоїдної напруги	f , КГц	R_2 , Ом	L , мГн	R_k , Ом	C , мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,7	Трикутна	0,5	42	15	22,5	5,2
2	2,5	Трикутна	1,5	92	12	18	1,0
3	4	Прямокутна	2	100	20	30	0,07
4	2	Трикутна	1,0	50	20	30	2,24
5	3	Трикутна	1,0	70	30	45	1,8
6	5	Прямокутна	1,0	22	10	15	0,18
7	8	Трикутна	5,0	400	14	21	0,08
8	4,5	Трикутна	3,5	190	10	15	0, 22
9	4	Прямокутна	1,0	60	15	22,5	0,14
10	6	Трикутна	2,0	330	26	39	0,28
11	3,5	Прямокутна	1,5	10	25	37,5	0,22
12	4	Трикутна	2,0	190	16	24	0,44
13	5	Прямокутна	1,5	60	18	27	0,1
14	2,5	Трикутна	1,5	170	20	30	0,67

Зібрати електричне коло за схемою рисунку 3.5, б. Значення L_k , R_k взяти з таблиці 3.4 відповідно до свого варіанта. Під'єднати осцилограф до опору R_1 і зняти криву несинусоїдної напруги $u_{R_1}(t)$. Записати масштаби за напругою і часом.

Зібрати електричне коло за схемою рисунка 3.6, в. Значення ємності C взяти з таблиці 3.4 відповідно до свого варіанта. Під'єднати осцилограф до

опору R_1 і зняти криву несинусоїдної напруги $u_{R1}(t)$. Записати масштаби за напругою і часом.

3.6 Обробка експериментальних даних

1. Розкласти криву несинусоїдної напруги $u_{R1}(\omega t)$, отриманої під час експерименту 1, графоаналітичним методом у ряд Фур'є (обмежитися трьома членами ряду).

Записати ряд Фур'є $i(\omega t)$ для струму електричного кола (схема на рис. 3.4). Ряд Фур'є $i(\omega t)$ отримують із ряду Фур'є $u_{R1}(\omega t)$ шляхом ділення амплітуд гармонік $U_{mR1}^{(1)}$, $U_{mR1}^{(3)}$; $U_{mR1}^{(5)}$ на величину опору $R_1 = 10$ Ом.

Побудувати хвильову діаграму несинусоїдного струму $i(\omega t)$. Хвильова діаграма повинна бути побудована із використанням програмного забезпечення MathCad Professional, MS Excel та інших.

2. За даними експерименту 2 аналітично розрахувати $i(\omega t)$ для всіх схем рисунка 3.5 (тобто $i_R(\omega t), i_L(\omega t), i_C(\omega t)$). Побудувати хвильові діаграми несинусоїдних струмів $i_R(\omega t), i_L(\omega t), i_C(\omega t)$. Хвильові діаграми будують за допомогою програмного забезпечення MathCad Professional, MS Excel. Порівняти побудовані хвильові діаграми з отриманими на осцилографі зображеннями.

3.7 Висновки

За результатами роботи зробити висновки:

- відносно впливу характеру опору на форму кривої струму при несинусоїдній вхідній напрузі;
- відносно причин виникнення несинусоїдних періодичних струмів в електричних колах;
- відносно методів розрахунку електричних кіл з несинусоїдними періодичними струмами та напругами.

Контрольні запитання

1. Подайте визначення періодичних несинусоїдних струмів і напруг та вкажіть режими роботи електричних кіл, що приводять до виникнення несинусоїдних струмів і напруг.
2. Вкажіть особливості періодичних несинусоїдних кривих, що мають деякі види симетрії.
3. Поясніть, як проводять розкладання в ряд Фур'є кривих геометрично неправильної форми.
4. Поясніть, яке фізичне значення має постійна складова тригонометричного ряду Фур'є несинусоїдної напруги чи струму.
5. Наведіть визначення середніх й діючих значень несинусоїдного струму і напруги.
6. Поясніть, якими коефіцієнтами характеризуються несинусоїдні струми та напруги?
7. Наведіть визначення активної, реактивної, повної та потужності викривлення несинусоїдного струму.
8. Поясніть, як визначають індуктивний, ємнісний опір для окремих гармонік.
9. Поясніть, які особливості мають резонансні явища в електричних колах при несинусоїдних струмах.
10. Поясніть, як проводять розрахунок електричних кіл із несинусоїдними джерелами енергії, та вкажіть його особливості.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО ПОРЯДКУ

4.1 Мета роботи

Метою виконання четвертої лабораторної роботи є:

- дослідження розряду і заряду ємності в простих електричних колах постійного струму;
- дослідження перехідного процесу в простих електричних колах постійного струму, що містять індуктивність;
- дослідження аперіодичного і коливального режимів роботи $R-L-C$ кола при відімкненні джерела постійної напруги.

4.2 Обладнання і прилади

Як обладнання і прилади використовують:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд НДЛС-1;
- елементи набірної поля стенду;
- мультиметр;
- цифровий осцилограф SDS 1022 DL.

4.3 Підготовчий етап лабораторної роботи

Результатом підготовчого етапу є:

- вивчення теоретичного матеріалу, що має відношення до змістового модуля «Розрахунок перехідних процесів в лінійних електричних колах»;
- уміння проводити розрахунок перехідних процесів класичним методом у лінійних електричних електричному колах.

4.4 Загальні відомості

Ввімкнення, відімкнення, перемикання активних і пасивних віток електричних кіл, змінювання їхніх параметрів та інші комутаційні процеси

обумовлюють зміну струмів і напруг на окремих ділянках електричних кіл. При цьому перехід струмів і напруг від одних значень до інших в електричних колах з індуктивностями та ємностями відбувається не миттєво, а протягом деякого часу. Практично цей час становить частки секунди, а теоретично дорівнює нескінченності. Процес переходу електричного кола від одного режиму до іншого, обумовлений змінюванням його параметрів, називають перехідним процесом.

Перехідні процеси підпорядковані двом законам комутації, відповідно до яких струм і магнітний потік у вітці з індуктивністю, а також заряд та напруга на ємності в момент комутації зберігають ті значення, які вони мали безпосередньо до комутації, і далі починають змінюватися відповідно до цих значень.

Потрібно зазначити, що тема «Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах» є важливою, складною та об'ємною. Тому в цих методичних рекомендаціях обмежимося тільки коротким оглядом класичного методу розрахунку перехідних процесів та прикладами розрахунку перехідних процесів класичним методом тих електричних кіл, що практично досліджуються в роботі.

Відповідно до класичного методу струм і напругу при перехідному процесі можна розглядати як ті, що складаються відповідно зі струму і напруги вимушеного та вільного режиму:

$$i(t) = i_{\text{вим}} + i_{\text{в}}; \quad u(t) = u_{\text{вим}} + u_{\text{в}}, \quad (4.1)$$

де $u_{\text{вим}}$, $i_{\text{вим}}$ – вимушені складові напруги й струму, які є напругами та струмами від зовнішньої сили (джерел) в режимі після комутації ($t \rightarrow \infty$, тобто вважаємо, що перехідний процес закінчився);

$u_{\text{в}}$, $i_{\text{в}}$ – вільні складові напруги та струму, що обумовлені змінюванням енергії індуктивності та ємності.

Порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом:

- довільно обираємо струми у вітках;
- записуємо для кожного струму та напруги загальне рішення у вигляді (4.1);
- визначаємо незалежні початкові умови;
- знаходимо залежні початкові умови (складаємо і вирішуємо систему рівнянь для схеми після комутації за законами Кірхгофа та моменту часу $t = 0$);
- знаходимо вимушені складові всіх струмів і напруг шляхом розрахунку схеми після комутації (сталий режим; час після комутації $t \rightarrow \infty$);
- складаємо характеристичне рівняння (за методом вхідного опору або головного визначника), розв'язуємо його і за кількістю та типом коренів записуємо вид вільних складових струмів і напруг;
- визначаємо постійні інтегрування за допомогою незалежних і залежних початкових умов.

5

Задача № 1 Дослідження перехідних процесів у R-C-схемі при відімкненні та при підімкненні її до джерела постійної напруги

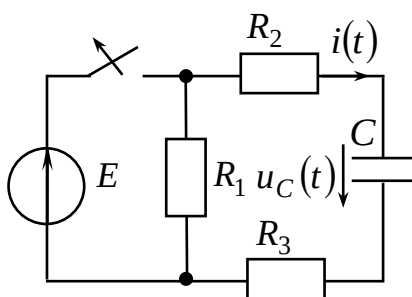


Рисунок 4.1 –
Розряд ємності

Вихідні дані: $E = 10 \text{ В}$; $C = 3 \text{ мкФ}$;

$R_1 = 50 \text{ Ом}$; $R_2 = 75 \text{ Ом}$; $R_3 = 150 \text{ Ом}$.

Розглянемо розряд ємності на активний опір (рис. 4.1).

До комутації ємність заряджена до напруги джерела E , а після відімкнення джерела розряджається через опір $R = R_1 + R_2 + R_3$.

Незалежна початкова умова $u_C(0) = E = 10 \text{ В}$.

Розв'язок для $i(t)$ і $u_C(t)$ шукаємо у вигляді

$$i(t) = i_{\text{вим}} + i_{\text{в}}; \quad u_C(t) = u_{\text{Cвим}} + u_{\text{Cв}},$$

де $u_{\text{Cвим}} = 0 \text{ В}$ – вимушена складова напруги на ємності ($t \rightarrow \infty$);

$u_{\text{Cв}}$ – вільна складова напруги на ємності.

Характеристичне рівняння для схеми на рисунку 4.1:

$$Z_{\text{ex}}(p) = R_1 + R_2 + R_3 + \frac{1}{p \cdot C} = 0 \Rightarrow p = -\frac{1}{(R_1 + R_2 + R_3) \cdot C} = -1212,12 \text{ с}^{-1}.$$

Отже, вільна складова має вигляд $u_{C\phi} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-1212,12 \cdot t}$.

Загальний розв'язок з урахуванням зазначеного вище:

$$u_C(t) = 0 + A \cdot e^{-1212,12 \cdot t} = A \cdot e^{-1212,12 \cdot t}, \text{ В.}$$

Постійну інтегрування A знаходимо, використовуючи початкову умову:

$$u_C(0) = 10 \Rightarrow A = 10 \Rightarrow \text{напруга на ємності} - u_C(t) = 10 \cdot e^{-1212,12 \cdot t}, \text{ В.}$$

$$\text{Струм схеми} - i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d(10 \cdot e^{-1212,12 \cdot t})}{dt} = -0,036 \cdot e^{-1212,12 \cdot t}, \text{ А.}$$

$$\text{Постійна часу: } \tau = \frac{1}{|p|} = 8,25 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$$

Розглянемо заряд ємності при підімкненні R - C -схеми до джерела постійної напруги (рис. 4.2).

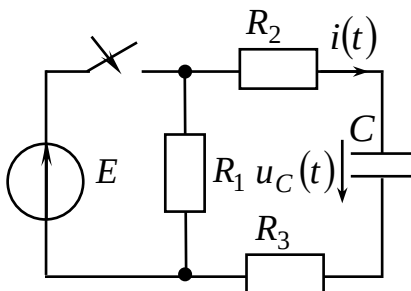


Рисунок 4.2 –
Заряд ємності

Незалежна початкова умова: $u_C(0) = 0 \text{ В.}$

Вимушена складова напруги на ємності:

$$u_{C\text{вим}} = U_{R1} = E = 10 \text{ В.}$$

Характеристичне рівняння:

$$Z_{\text{ex}}(p) = R_2 + R_3 + \frac{1}{p \cdot C} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p = -\frac{1}{(R_2 + R_3) \cdot C} = -1481,48 \text{ с}^{-1}.$$

Таким чином, вільна складова має вигляд $u_{C\phi} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-1481,48 \cdot t}$.

Загальне рішення: $u_C(t) = u_{C\text{вим}} + u_{C\phi} = 10 + A \cdot e^{-1481,48 \cdot t}$.

Використовуючи незалежну початкову умову, отримаємо:

$$u_C(0) = 0 = 10 + A \Rightarrow A = -10. \quad \text{Отже, напруга на ємності}$$

$$u_C(t) = 10 - 10 \cdot e^{-1481,48 \cdot t}, \text{ В.}$$

Струм вітки з ємністю:

$$i(t) = \frac{C \cdot du_c(t)}{dt} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{d \left[10 \cdot (1 - e^{-1481,48 \cdot t}) \right]}{dt} = 0,044 \cdot e^{-1481,48 \cdot t}, \text{ А.}$$

Постійна часу: $\tau = \frac{1}{|p|} = 6,75 \cdot 10^{-4} \text{ с} = 0,000675 \text{ с.}$

Задача № 2. Дослідження перехідних процесів у R-L-схемі при відімкненні та підімкненні її до джерела постійної напруги

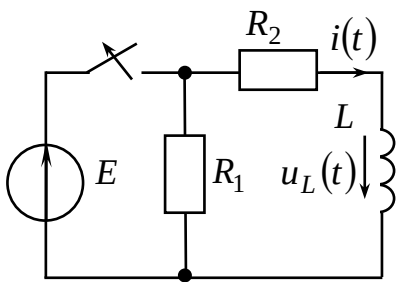


Рисунок 4.3 – Розряд індуктивності

Вихідні дані: $E = 10 \text{ В}; L = 35 \text{ мГн};$

$R_1 = 50 \text{ Ом}; R_2 = 150 \text{ Ом.}$

Розглянемо відімкнення R-L-схеми від джерела постійної напруги (рис. 4.3).

Загальний розв'язок для струму та напруги на індуктивності для вітки, що містить індуктивність:

$$i(t) = i_{\text{вим}} + i_{\text{в}} \quad \text{і} \quad u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}.$$

Незалежна початкова умова: $i(0) = \frac{E}{R_2} = 0,067 \text{ А.}$

Вимушена складова струму: $i_{\text{вим}} = 0 \text{ А.}$

Характеристичне рівняння та його корінь:

$$Z_{\text{ex}}(p) = R_1 + R_2 + p \cdot L = 0 \Rightarrow p = -\frac{(R_1 + R_2)}{L} = -5714,29 \text{ с}^{-1}.$$

Таким чином, вільна складова струму $i_{\text{в}} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-5714,29 t}$, а загальне рішення для струму $i(t) = i_{\text{вим}} + i_{\text{в}} = A \cdot e^{-5714,29 \cdot t}$.

Постійну інтегрування A визначаємо за допомогою незалежної початкової умови: $i(0) = 0,067 \Rightarrow A = 0,067$.

Таким чином, струм та напруга на індуктивності

$$i(t) = 0,067 \cdot e^{-5714,29 \cdot t}, \text{ А};$$

$$u_L(t) = 0,035 \cdot \frac{d(0,067 \cdot e^{-5714,29 \cdot t})}{dt} = -13,4 \cdot e^{-5714,29 \cdot t}, \text{ В.}$$

Постійна часу: $\tau = \frac{1}{|p|} = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$

Розглянемо заряд індуктивності при підімкненні R - L -схеми до джерела постійної напруги (рис. 4.4).

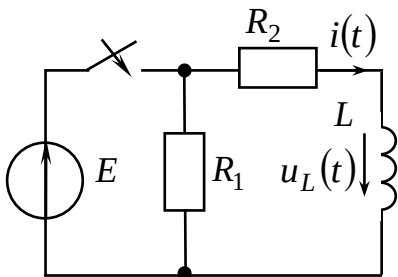


Рисунок 4.4 –
Заряд індуктивності

Незалежна початкова умова: $i(0) = 0 \text{ А.}$

Вимушена складова струму:

$$i_{\text{вум}} = \frac{E}{R_2} = 0,067 \text{ А.}$$

Характеристичне рівняння та його корінь:

$$Z_{\text{ex}}(p) = R_2 + p \cdot L = 0 \Rightarrow p = -\frac{R_2}{L} = -4285,7 \text{ с}^{-1}.$$

Вільна складова струму:

$$i_{\text{с}} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-4285,7 \cdot t}. \quad i(t) = 0,067 + A \cdot e^{-4285,7 \cdot t}$$

Врахуємо, що $i(0) = 0 \text{ А} \Rightarrow 0 = A + 0,067 \Rightarrow A = -0,067.$

Таким чином, струм та напруга на індуктивності

$$i(t) = i_{\text{вум}} + i_{\text{с}} = 0,067 - 0,067 \cdot e^{-4285,7 \cdot t}, \text{ А};$$

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = 0,035 \cdot \frac{d[0,067 - 0,067 \cdot e^{-4285,7 \cdot t}]}{dt} = 10 \cdot e^{-4285,7 \cdot t}, \text{ В.}$$

Постійна часу: $\tau = \frac{1}{|p|} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ с.}$

*Задача № 3 Дослідження перехідних процесів у R-L-C-схемі
при відімкненні його від джерела постійної напруги (рис. 4.5)*

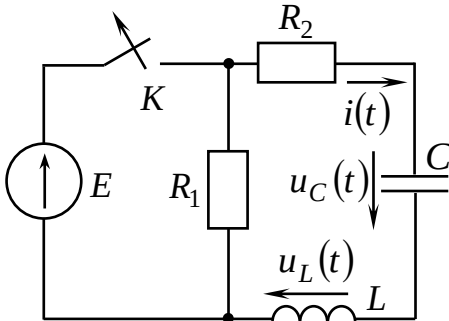


Рисунок 4.5 – Відімкнення
R-L-C-схеми від джерела
постійної напруги

Вихідні дані: $E = 10 \text{ В}$; $C = 1,5 \text{ мкФ}$;

$L = 70 \text{ мГн}$; $R_1 = 50 \text{ Ом}$; $R_2 = 400 \text{ Ом}$.

Загальний розв'язок для напруги на
ємності: $u_C(t) = u_{C\text{вим}} + u_{C\text{в}}$.

Незалежні початкові умови:

$$i(0) = 0 \text{ А};$$

$$u_C(0) = E = 10 \text{ В}.$$

Вимушена складова напруги на

ємності: $u_{C\text{вим}} = 0 \text{ В}$.

Характеристичне рівняння: $Z_{\text{вх}}(p) = R_1 + R_2 + p \cdot L + \frac{1}{C \cdot p} = 0$.

Або після перетворень: $p^2 + \frac{R_1 + R_2}{L} \cdot p + \frac{1}{C \cdot L} = 0$.

Корені характеристичного рівняння: $p_{1,2} = -\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{C \cdot L}}$.

Треба відзначити, що корені характеристичного рівняння можуть бути:

1. Дійсними й різними, якщо $R_1 + R_2 > R_{\text{кр}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ ($R_{\text{кр}}$ – так званий критичний опір R-L-C кола).

2. Дійсними й рівними, якщо $R_1 + R_2 = R_{\text{кр}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$.

3. Комплексно-спряженими, якщо $R_1 + R_2 < R_{\text{кр}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$.

У першому випадку маємо так званий аперіодичний режим, у другому – критичний режим, у третьому – коливальний режим.

При аперіодичному режимі в цій схемі при розмиканні ключа відбувається повільне згасання струму без коливань, при критичному режимі – найшвидше згасання без коливань, при коливальному режимі – згасаючі електричні коливання струму й напруги.

Після підстановки вихідних даних, маємо:

$$p^2 + \frac{450}{0,07} \cdot p + \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07} = 0; \quad p^2 + 6428,6 \cdot p + 9523809,5 = 0;$$

$$\text{корені} - p_1 = -2315,7 \text{ c}^{-1}; \quad p_2 = -4113,1 \text{ c}^{-1}.$$

Оскільки корені є дійсними та різними, то вільна складова напруги на ємності має такий вигляд: $u_{C\phi} = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} = A_1 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}$.

Таким чином, напруга та струм – $u_C(t) = A_1 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}$;

$$i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot (-2315,7 \cdot A_1 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} - 4113,1 \cdot A_2 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}).$$

Постійні A_1 та A_2 знаходимо, використовуючи початкові умови $u_C(0) = E = 10 \text{ В}$, $i(0) = 0 \text{ А}$, тобто складаємо та розв'язуємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} u_C(0) = A_1 + A_2 \\ i(0) = C \cdot (-2315,7 \cdot A_1 - 4113,1 \cdot A_2) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_1 + A_2 = 10 \\ 1,5 \cdot 10^{-6} (-2315,7 \cdot A_1 - 4113,1 \cdot A_2) = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A_1 = 22,88; \quad A_2 = -12,88.$$

Напруга на ємності та струм через ємність:

$$u_C(t) = 22,88 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} - 12,88 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}, \text{ В};$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \left[-2315,7 \cdot 22,88 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} - 4113,1 \cdot (-12,88) \cdot e^{-4113,1 \cdot t} \right] =$$

$$= -0,0795 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + 0,0795 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}, \text{ А};$$

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = 0,07 \cdot \frac{d \left[-0,0795 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + 0,0795 \cdot e^{-4113,1 \cdot t} \right]}{dt} =$$

$$= 12,88 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} - 22,88 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}, \text{ В}.$$

Постійна струму: $\tau = \frac{1}{|p_{\min}|} = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, де $p_{\min}$ – менший за модулем з

двох коренів характеристичного рівняння.

Розглянемо також коливальний режим. Оскільки при вказаних вихідних даних $R_{kp} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = 432 \text{ Ом}$, а при виконанні експериментальної частини роботи саме R_2 є змінним опором, то для досягнення коливального режиму цей опір повинен бути меншим, ніж $R_2 = 432 - R_1 = 382 \text{ Ом}$.

Нехай $R_2 = 350 \text{ Ом}$, тоді корені характеристичного рівняння будуть такими:

$$p_{1,2} = -\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2L}\right)^2 - \frac{1}{C \cdot L}} = -2857,1 \pm j \cdot 1166,5 \text{ с}^{-1}.$$

У цьому випадку вільна складова напруги на ємності має такий вигляд:

$$u_{C\phi} = A \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha).$$

Оскільки $u_{C_{вум}} = 0 \text{ В}$, то $u_C(t) = u_{C\phi} = A \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha)$, В.

$$\text{Струм} - i(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} =$$

$$= C \cdot A \cdot e^{-2857,1t} \left[-2857,1 \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha) + 1166,5 \cdot \cos(1166,5 \cdot t + \alpha) \right].$$

Коефіцієнти A і α знаходимо, використовуючи початкові умови:

$$\begin{aligned} \begin{cases} u_C(0) = 10 \\ i(0) = 0 \end{cases} &\Rightarrow \begin{cases} 10 = A \cdot \sin \alpha \\ 0 = C \cdot A \cdot (-2857,1 \cdot \sin \alpha + 1166,5 \cdot \cos \alpha) \end{cases} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \begin{cases} \alpha = 22,2^\circ = 0,3875 \text{ рад} \\ A = 26,47 \end{cases}. \end{aligned}$$

Тоді напруга на ємності і струм вітки R_2 -L-C

$$u_C(t) = 26,47 \cdot e^{-2857,1t} \sin(1166,5 \cdot t + 0,3875^\circ), \text{ В};$$

$$i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} =$$

$$\begin{aligned} &= 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 26,47 \cdot e^{-2857,1t} \left[-2857,1 \cdot \sin(1166,5 \cdot t + 0,3875) + \right. \\ &\quad \left. + 1166,5 \cdot \cos(1166,5 \cdot t + 0,3875) \right]. \end{aligned}$$

Використовуємо співвідношення

$$a \cdot \sin \alpha \pm b \cdot \cos \alpha = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \left(\alpha \pm \arctg \frac{b}{a} \right).$$

Таким чином, струм вітки R_2 -L-C

$$\begin{aligned} i(t) &= -1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 26,47 \cdot \sqrt{2857,1^2 + 1166,5^2} \cdot e^{-2857,1 \cdot t} \times \\ &\times \sin \left(1166,5 \cdot t + 0,3875 - \arctg \frac{1166,5}{2857,1} \right) = \\ &= -0,122 \cdot e^{-2857,1 \cdot t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t), \text{ А.} \end{aligned}$$

Напруга на індуктивності:

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = 26,355 \cdot e^{-2857,1 \cdot t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t - 0,3875), \text{ В.}$$

Постійну часу у випадку коливального режиму визначають так:

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi}{8 \cdot \omega_0} = \frac{2 \cdot \pi}{1166,5 \cdot 8} = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ с,}$$

де ω_0 – частота вільних коливань.

4.5 Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, наведених у таблицях 4.1, 4.2, 4.3 (варіант – за номером стенда). Під час проведення розрахунків зверніть увагу на те, що електронний ключ, який здійснює постійне «замикання-розмикання» досліджуваних схем, не є ідеальним і падіння напруги на ньому не становить 0 В, як це є в прикладах розрахунків, що наведені в загальних відомостях до роботи. Це треба враховувати при визначенні вимушених складових струмів та напруг. Схеми треба складати так, щоб мати змогу провести виміри, де це потрібно.

Експеримент 1 Дослідження перехідних процесів у R-C-колі при відімкненні й підімкненні до джерела постійної напруги – розряд та заряд ємності

Зібрати електричне коло за схемою рисунку 4.1. Елементи R_3 , C – це, відповідно, змінний опір і змінна ємність з блоку змінних пасивних елементів

стенда НДЛС-1. Значення останніх взяти з таблиці 4.1 відповідно до свого варіанта. Опори R_1 , R_2 для всіх варіантів – це опори R_{01} , R_{02} з елементів набірної плати. Як джерело E використати регульоване джерело постійної напруги (значення E взяти з таблиці 4.1, воно є незмінним для всіх експериментів), ключ K – електронний ключ з блока постійних напруг стенду.

Під'єднати осцилограф паралельно до конденсатора C і отримати стає зображення кривої $u_C(t)$. Правила користування цифровим осцилографом – дивись опис попередньої лабораторної роботи. Сфотографувати криву $u_C(t)$ (2 частини: заряд і розряд ємності) з екрана осцилографа. Розмір зображення за осями напруги та часу повинен бути підібраний так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрана.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані до експерименту 1

Номер варіанта	E , В	R_3 , Ом	C , мкФ	Номер варіанта	E , В	R_3 , Ом	C , мкФ
1	5	225	4,5	8	5	305	3,5
2	8	335	4	9	6	75	6,5
3	7	145	6	10	4	225	5,5
4	6	275	3,8	11	5	200	5,0
5	4	325	2,5	12	6	180	4,5
6	9	225	3,5	13	7	250	4,0
7	7	145	7	14	8	210	3,3

Зменшити, а потім збільшити ємність приблизно в 2 рази, знову сфотографувати осцилограму кривої $u_C(t)$, тобто заряд і розряд ємності.

Встановити вихідне значення ємності й під'єднати осцилограф паралельно до опору R_2 . Сфотографувати криву струму $i(t) = \frac{u_{R_2}(t)}{R_2}$ під час перехідного процесу (дві частини: при заряді й розряді ємності). Розмір

зображення за осями напруги та часу повинен бути підібраний так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрана.

Зменшити, а потім збільшити значення R_2 приблизно в 2 рази, знову сфотографувати з екрана осцилографа криву $i(t)$ при заряді та розряді ємності.

Експеримент 2 Дослідження перехідних процесів у R-L-колі при відімкненні та підімкненні до джерела постійної напруги

Зібрати електричне коло (рис. 4.3). Елементи R_2 , L – відповідно, змінний опір і змінна індуктивність з блока змінних пасивних елементів стенда. Значення останніх взяти з таблиці 4.2 відповідно до свого варіанта. Опір R_1 для всіх варіантів – це опір R_{01} з елементів набірної поля.

Під'єднати осцилограф паралельно до індуктивності L і отримати стале зображення кривої $u_L(t)$. Сфотографувати криву (дві частини: при відімкненні та підімкненні до джерела постійної напруги) з екрана осцилографа. Розмір зображення за осями напруги та часу повинен бути підібраний так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрана.

Зменшити, а потім збільшити індуктивність приблизно в 2 рази, знову сфотографувати криву (дві частини: при відімкненні та підімкненні до джерела постійної напруги) з екрана осцилографа.

Встановити вихідне значення індуктивності та під'єднати осцилограф паралельно до опору R_2 . Сфотографувати криву струму $i(t) = \frac{u_{R_2}(t)}{R_2}$ під час перехідного процесу (2 частини: при відімкненні та підімкненні до джерела постійної напруги).

Зменшити, а потім збільшити значення L приблизно в 2 рази, знову отримати осцилограму кривої $i(t)$ (2 частини).

Таблиця 4.2 – Вихідні дані до експерименту 2

Номер варіанта	L , мГн	R_2 , Ом	Номер варіанта	L , мГн	R_2 , Ом
1	30	75	8	44	75
2	38	150	9	30	220
3	46	220	10	42	100
4	34	100	11	40	200
5	48	300	12	32	175
6	36	220	13	49	350
7	32	150	14	45	200

Експеримент 3 Дослідження перехідних процесів у коливальному R-L-C-колі при відімкненні його від джерела постійної напруги та при підімкненні до останнього

Зібрати електричне коло (рис. 4.5). Значення елементів взяти з таблиці 4.3. Елементи L , C – індуктивність і ємність з елементів набірного поля (в табл. 4.3 вказані їх номери). Опір R_2 – змінний опір з блока змінних пасивних елементів стенда НДЛС-1. Опір R_1 для всіх варіантів – це опір R_{01} з елементів набірного поля. Значення EPC E взяти з таблиці 4.1.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані експерименту 3

Номер варіанта	L , №	R_2 , Ом	C , №	Номер варіанта	L , №	R_2 , Ом	C , №
1	27	630	15	8	28	540	16
2	28	510	17	9	29	420	18
3	29	420	19	10	28	480	15
4	27	570	16	11	29	450	16
5	27	480	18	12	28	500	17
6	29	420	17	13	27	480	18
7	27	450	15	14	29	470	19

Під'єднати осцилограф паралельно до опору R_2 , паралельно до ємності C , паралельно до індуктивності L і сфотографувати відповідно криві $u_{R_2}(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$ з екрана осцилографа (2 частини: при відімкненні та підімкненні до джерела постійної напруги). Переконатися, що криві відповідають саме аперіодичному режиму. Розмір зображення за осями напруги та часу повинен бути підібраний так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрана.

Розрахувати критичний опір, який забезпечує перехід аперіодичного режиму в коливальний, за виразом $R_{кр} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$. Значення L і C вказані безпосередньо на модулях цих елементів, а також в додатку А цих методичних рекомендацій. Встановити значення змінного опору R_2 значно меншим, ніж значення $R_2 = R_{кр} - R_1$. Доцільним для отримання найбільш характерного зображення є встановлення значення опору R_2 у межах 50–100 Ом.

Під'єднати осцилограф паралельно до опору R_2 , паралельно до ємності C , паралельно до індуктивності L і сфотографувати криві $u_{R_2}(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$ з екрана осцилографа (2 частини: при відімкненні та підімкненні до джерела постійної напруги). Переконатися, що був отриманий коливальний режим.

4.6 Обробка експериментальних даних

1. За даними експерименту 1 розрахувати класичним методом закони $u_C(t)$, $i(t)$ під час перехідного процесу (пункт 4.4, задача 1 «Дослідження перехідних процесів у R - C -колі при відімкненні й підімкненні до джерела постійної напруги»), а також значення постійної часу. Зробити висновок про те, як змінюється постійна часу при зміні параметрів C та R_2 . Визначити також постійну часу графічно, переконатися, що результати розрахунків і експериментів однакові.

2. За даними експерименту 2 розрахувати класичним методом закони $i(t)$, $u_L(t)$ під час перехідного процесу (пункт 4.4, задача 2 «Дослідження

перехідних процесів у R - L -колі при відімкненні й підімкненні до джерела постійної напруги»), а також значення постійної часу. Зробити висновок про те, як змінюється постійна часу при зміні L та R_2 . Визначити також постійну часу графічно, переконатися, що результати розрахунків і експериментів однакові.

3 За даними експерименту 3 розрахувати класичним методом закони $u_{R2}(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$, $i(t)$ під час перехідного процесу в R - L - C -колі при відімкненні його від джерела постійної напруги та при підімкненні до останнього (див. пункт 4.4, задача 3) у двох режимах роботи кола – аперіодичному і коливальному. Розрахунок R - L - C -кола при підімкненні його до джерела постійної напруги зробити самостійно (за вказівкою викладача) за методикою задачі № 3 загальних відомостей цих методичних рекомендацій.

Фото осцилограм треба розміщувати поряд з відповідним розрахунком (експериментом). Приклад оформлення наведено на рисунку 4.6.

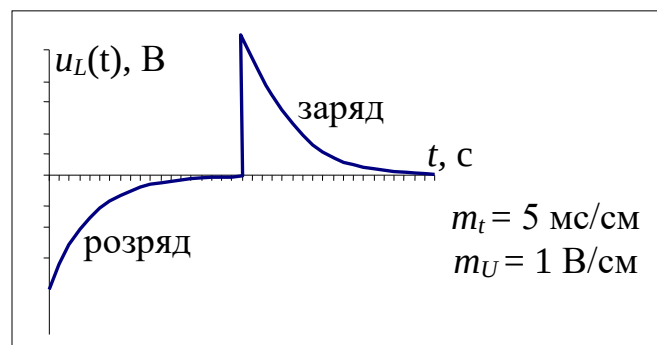


Рисунок 4.6 – Напруга на L під час перехідного процесу

4.7 Висновки

За результатами першого та другого експериментів зробити висновки:

- відносно характеру напруги на індуктивності та ємності в колах першого порядку;
- відносно характеру струму через індуктивність та ємність у колах першого порядку.

За результатами третього експерименту зробити висновки:

- відносно причин виникнення в колі другого порядку (послідовний коливальний контур) аперіодичного режиму;
- відносно причин виникнення в колі другого порядку (послідовний коливальний контур) коливального режиму.

Контрольні запитання

1. Наведіть визначення та сформулюйте умови виникнення перехідних процесів.
2. Сформулюйте закони комутації.
3. Подайте визначення незалежних і залежних початкових умов, поясніть, як їх визначають.
4. Охарактеризуйте методи складання характеристичного рівняння.
5. Поясніть, як визначають вимушені складові струмів та напруг у класичному методі.
6. Охарактеризуйте вид вільного процесу залежно від коренів характеристичного рівняння.
7. Поясніть, як визначають постійні інтегрування в класичному методі.
8. Наведіть порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом.
9. Охарактеризуйте інші методи розрахунку перехідних процесів: операторний та метод інтеграла Дюамеля.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теоретичні основи електротехніки : підручник : у 3 т. / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб та ін. ; за заг. ред. І. М. Чиженка, В. С. Бойка. – Київ : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. – Т. 1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – 272 с.

2. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки : навчальний посібник для студентів електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів / А. Ю. Воробкевич, В. С. Маляр, Р. Я. Совин, М. О. Соколовський, П. Г. Стахів, О. І. Шегедин ; за ред. А. Ю. Воробкевича, О. І. Шегедина. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 224 с.

3. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола : навч. посіб. / В. С. Маляр. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.

4. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Теоретичні основи електротехніки. Частини 1, 2» (за матеріалами першого модуля «Лінійні електричні кола постійного струму. Лінійні електричні кола однофазного синусоїдного струму») (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 63 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/61748/>, вільний (дата звернення: 12.12.2025). – Назва з екрана.

5. Форкун Я. Б. Теоретичні основи електротехніки. Частини 1, 2. Теоретичні основи електротехніки. Частина 3 [Електрон. ресурс] : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти усіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Електрон. текст. дані. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 111 с. – Режим доступу: <https://eprints.kname.edu.ua/61748/>, вільний (дата звернення: 12.11.2025). – Назва з екрана.

ДОДАТОК А

Порядкові номери і зразкові параметри елементів набірного поля

Таблиця А.1 – Перелік елементів набірного поля

Номер елемента	Вид елемента	Тип	R , Ом	L , мГн	C , мкФ	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, мА	$P_{ном}$, Вт
1	Резистор	МЛТ-2(1+1)	50	—	—			4
2	Резистор	МЛТ-2(1+1)	75	—	—			4
3	Резистор	МЛТ-2	100	—	—			2
4	Резистор	МЛТ-2	150					2
5	Резистор	МЛТ-2	200					2
6	Резистор	МЛТ-2	300					2
7	Резистор	МЛТ-2	510					2
8	Резистор	МЛТ-2	750					2
9	Резистор	МЛТ-2	820					2
10	Резистор	МЛТ-2	1 000	—	—			2
11	Конденсатор	МБМ	—	—	0,1	160		
12	Конденсатор	МБМ	—	—	0,25	160		
13	Конденсатор	МБМ	—	—	0,5	160		
14	Конденсатор	МБМ	—	—	0,75	160		
15	Конденсатор	МБМ	—	—	1,0	160		
16	Конденсатор	МБМ	—	—	1,25	160		
17	Конденсатор	МБМ	—	—	1,5	160		
18	Конденсатор	МБМ	—	—	1,75	160		
19	Конденсатор	МБМ	—	—	2,0	160		
20	Індуктивність	—	—	2	—	—	225	
21	Індуктивність	—	—	3	—	—	190	
22	Індуктивність	—	—	5	—	—	150	
23	Індуктивність	—	—	7	—	—	125	
24	Індуктивність	—	—	10	—	—	100	
25	Індуктивність	—	—	15	—	—	85	
26	Індуктивність	—	—	20	—	—	75	
27	Індуктивність	—	—	30	—	—	60	
28	Індуктивність	—	—	50	—	—	50	
29	Індуктивність	—	—	70	—	—	40	

ДОДАТОК Б
Основні електричні величини і їх позначення

Таблиця Б.1 – Позначення основних електричних величин і їхніх одиниць

Найменування фізичної величини	Позначення		Найменування фізичної величини	Позначення	
	вели- чина	оди- ниця		вели- чина	оди- ниця
Ємність	C	Ф	Частота: – коливаль; – кутова	f ω	Гц рад/с
Заряд	q	Кл	Струм	I, i	А
Індукція	B	Тл	Потенціал	V, φ	В
Індуктивність – власна; – взаємна	L M	Гн Гн	Потокозчеплення	ψ	
Коефіцієнт потужності в синусоїдальному режимі	$\cos\varphi$	–	Проникливість (діелектрична): – вакууму; – абсолютна; – відносна	ε_0 ε_a ε	Ф/м Ф/м –
Коефіцієнт трансформації	n	–	Проникливість (магнітна): – порожності; – абсолютна; – відносна	μ_0 μ_a μ	Гн/м Гн/м –
Магнітний потік	Φ	Вб	Провідність: – повна; – активна; – реактивна	Y G X	См См См
Потужність: – повна; – активна; – реактивна	S P Q	ВА Вт ВАР	Сила електрорушійна	E, e	В
Напруга	u, U	В	Зсув фаз між напругою і струмом	φ	рад(°)
Напруженість поля: – електричного; – магнітного	E H	В/м А/м	Опір – повний; – активний; – реактивний	Z R X	Ом Ом Ом
Початкова фаза	ψ	рад(°)	Число фаз багатофазної системи	m	–
Період	T	с	Число витків	n	–
Стала часу	τ	с	Енергія електромагнітна	W	Дж

ДОДАТОК В

Зразок оформлення титульного аркуша звітів із лабораторних робіт

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

КАФЕДРА АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ
ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

ЗВІТИ ПРО ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ
З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ.
ЧАСТИНИ 1, 2»

Виконав:

Студент (-ка) гр. _____

Перевірив: _____

Харків – 2026

Електронне навчальне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до виконання лабораторних робіт
із навчальної дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ. ЧАСТИНИ 1, 2»

(за матеріалами другого модуля «Трифазні електричні кола синусоїдного струму. Лінійні електричні кола періодичного несинусоїдного струму.

Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах»)

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальностей*

G4 – Енерговиробництво та G3 – Електрична інженерія)

Укладачі : **ФОРКУН** Яна Борисівна,
ГЛЄБОВА Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*
Редактор *О. А. Норик*
Комп'ютерне верстання *Я. Б. Форкун, І. В. Волосожарова*

План 2026, поз. 199М

Підп. до друку 10.04.2026. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 4,0.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 8386 від 14.07.2025.