

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

*(для студентів усіх форм навчання напрямів
6.050701 – Електротехніка та електротехнології,
6.050702 – Електромеханіка
та студентів за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» (для студентів усіх форм навчання напрямів 6.050701 – Електротехніка та електротехнології», 6.050702 – Електромеханіка та студентів за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова, Н. О. Сабалаєва. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. – 60 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
канд. техн. наук, доц. Н. О. Сабалаєва

Рецензент д-р техн. наук, проф. А. Г. Сосков

*Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,
протокол № 11 від 26 .04.2016 р.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИПРОВІДНИХ та ЧОТИРИПРОВІДНИХ ТРИФАЗНИХ КІЛ «ЗІРКА–ЗІРКА».....	8
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНИХ КІЛ «ЗІРКА – ТРИКУТНИК».....	17
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХАРАКТЕРУ ОПОРУ НА ФОРМУ КРИВОЇ СТРУМУ В КОЛАХ НЕСИ- НУСОЇДНОГО ПЕРІОДИЧНОГО СТРУМУ.....	26
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО ПОРЯДКУ.....	38
5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ.....	50
ДОДАТКИ.....	58
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	57

ВСТУП

Електротехнікою називають область техніки, що пов'язана з отриманням, розподілом, перетворенням і використанням електричної енергії, або, іншими словами – це широка галузь практичного застосування електромагнітних явищ. «Теоретичні основи електротехніки» (ТОЕ) – дисципліна, яка займається питаннями розрахунку й вивчення явищ, що характеризуються поняттями електричних струмів, напруг, потужностей, магнітних потоків, а також поняттями напруженості електричного та індукції магнітного полів. Таким чином, ТОЕ є теоретичною базою для всіх електротехнічних спеціальностей.

Дисципліна «Теоретичні основи електротехніки» складається з трьох частин, при чому першу та другу частину вивчають всі спеціальності напрямів 6.050701 – Електротехніка та електротехнології, 6.050702 – Електромеханіка (за переліком 2015 р. – єдина спеціальність «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»).

Метою дисципліни є оволодіння фундаментальними поняттями, теорією та методологією сучасної теоретичної електротехніки, засвоєння фундаментальних знань, які є необхідною базою для подальшого вивчення електротехнічних дисциплін.

Предметом вивчення дисципліни є основні закони теорії електричних кіл, теорії електромагнітного поля та оволодіння навичками їх практичного застосування для дослідження і розрахунків сучасних електротехнічних пристроїв.

Вивчення курсу ТОЕ потребує знання курсів фізики, а саме розділу «Електрика та магнетизм», математики, передусім розділів: системи лінійних алгебраїчних рівнянь, теорія матриць, похідна та інтеграл, диференційні рівняння, функціональні ряди, інтегральні перетворення Лапласа, векторна алгебра.

Теоретичні положення курсу засвоюються ґрунтовно тільки тоді, коли вони застосовані для вирішення конкретних задач. Саме тому лабораторні роботи відіграють важливу роль при вивченні дисципліни «Теоретичні основи електротехніки». Метою їх проведення є набуття студентами навичок практичних досліджень електричних кіл та отримання під час виконання розрахункової частини підтвердження положень теорії. Слід відзначити, що розрахункова частина лабораторних робіт є найбільш трудомісткою, бо, з одного боку, повинна включати в себе всі необхідні розрахунки та, з іншого боку, не бути занадто об'ємною (у зв'язку з чим ефективним є використання ЕОМ, що, по-перше, зменшить час обчислювальних операцій і, по-друге, дасть можливість швидкої перевірки розрахунків).

Ці методичні вказівки складені відповідно до програми курсу «Теоретичні основи електротехніки» і призначені для студентів усіх форм навчання напрямів 6.050701 – Електротехніка та електротехнології і 6.050702 – Електромеханіка, які вивчають даний курс протягом двох семестрів. Разом з тим, при проведенні лабораторних робіт треба враховувати деякі особливості, пов'язані з різницею у навчальних програмах вищезазначених спеціальностей стосовно змістових модулів і часів, що відведені для цього типу занять. Саме тому в ці методичні вказівки введена лабораторна робота №5 «Нелінійні кола постійного струму», яка для студентів напряму Електромеханіка виконується саме під час вивчення другої частини дисципліни у зв'язку з наявністю третього змістового модуля «Сталі процеси в нелінійних електричних колах і методи їх розрахунку».

Розглянемо правила безпеки в лабораторії ТОЕ.

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

Під час роботи в лабораторії забороняється:

- доторкатися до труб опалювальної системи;
- самостійно включати вилки вимірювальних приладів у мережу;
- відключати заземлення вимірювальних приладів;
- виймати блоки стенда;
- залишати без нагляду включений стенд і вимірювальні прилади.

У разі пошкодження блоків стенда, елементів або вимірювальних приладів слід негайно відключити їх від мережі живлення і сповістити про це викладача.

Під час роботи за стендом забороняється голосно розмовляти, ходити по лабораторії, залишати лабораторію без дозволу викладача.

По закінченню роботи на стенді необхідно виключити живлення всіх активних блоків стенда і вимірювальних приладів.

Порядок виконання лабораторних робіт є наступним.

Роботу в лабораторії проводять відповідно до планів аудиторних занять. Звичайно робота триває 2, 4 або 6 аудиторних годин. За цей час студент повинен виконати роботу, оформити звіт про неї і, вирішити задачу і відповісти

на теоретичні питання за темою роботи (захистити роботу).

Під час першого заняття, студенти формують бригади у кількості 3-4 чоловік. За бригадою до кінця навчального року закріплюється робочий стенд, номер якого і є номером комплекту елементів набірною стенду та номером варіанта за цими методичними вказівками.

Усі лабораторні роботи студенти виконують на універсальних навчально-дослідницьких лабораторних стендах УИЛС-1. Кожна робота має кілька етапів, а саме: підготовка, виконання експерименту, обробка даних і оформлення звіту, складання заліку. У розділі «Загальні відомості» кожної лабораторної роботи студенти знайдуть необхідні положення з теорії електричних кіл за відповідною тематикою роботи.

Під час виконання лабораторних робіт використовуються елементи набірною поля стенду, порядкові номери і зразкові параметри яких наведені в Додатку А.

Перед тим як приступити до виконання роботи студент отримує допуск, який свідчить про те, що він підготовлений до занять (вивчив теоретичний матеріал, підготував чернетку, зробив необхідні попередні розрахунки). Експериментальні дані, занесені в чернетку, наприкінці кожного досліду подають викладачеві. У разі невірних результатів експерименти повторюють.

Розглянемо порядок оформлення звітів про лабораторні роботи. До захисту роботи допускається студент, який виконав і оформив звіт про лабораторну роботу у повному обсязі. Під час захисту студент повинен вирішити задачу за темою лабораторної роботи і відповісти на запитання викладача (перелік теоретичних питань, які треба знати, наведений наприкінці кожної роботи). Звіти виконують в учнівських зошитах або на аркушах формату А4. Текст звітів повинен бути написаний чітко й акуратно. Електричні схеми та графічну частину робіт, до якої входять графіки залежностей та діаграми, що є результатами дослідів або обчислень, необхідно виконувати згідно з вимогами Загальне оформлення пояснювальної записки – згідно з «ДСТУ 3008-95. Документація. Звіти у сфері науки й техніки».

Зразок титульного аркуша зошита, що містить всі звіти лабораторних робіт, наведений нижче.

Звіт про кожну лабораторну роботу повинен містити:

- назву роботи;
- мету роботи;
- перелік приладів, обладнання і елементів;
- назву першого експерименту, схему досліджуваного кола;

- результати дослідження за першим експериментом (таблиці, графіки, розрахункові формули й обчислення);
- назву другого експерименту і т. ін. (див. попередні пункти);
- висновки.

Оформлення кожної роботи повинно починатися з нової сторінки. Після захисту останньої роботи студент повинен здати зошит викладачеві.

Звичайно, можливе виконання звітів в електронному вигляді з обов'язковим дотриманням таких вимог: шрифт Times New Roman, розмір 14, інтервал 1,5. При цьому студент повинен володіти навичками використання редактора формул, графічних редакторів.

Літерні позначення основних електричних величин і їхніх одиниць наведені в додатку 2, таблиця 2.

Зразок титульного аркуша:

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ЗАГАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

ЗВІТИ
ПРО ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ
З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

Виконала
студентка групи СДС 2014-1

Олійник А.І.

Перевірила
доц. кафедри

Форкун Я.Б.

Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2016

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження трипровідних та чотирипровідних трифазних кіл «зірка-зірка»

1.1 Мета роботи:

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

1.2 Обладнання і прилади:

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

1.3 Підготовчий етап лабораторної роботи полягає в вивченні теоретичного матеріалу [1 – с. 184–204, 2 – с. 169–188]

Результатом підготовчого етапу є:

- набуття навичок з проведення розрахунку трифазних кіл синусоїдного струму при з'єднанні «зірка-зірка» за відсутності нульового проводу і наявності останнього при симетричному й несиметричному навантаженні;
- вміння проводити розрахунок аварійних режимів роботи трифазних кіл (обрив лінійного проводу однієї з фаз і коротке замикання навантаження в одній з фаз);
- вміння 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 від-

різняються 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, z. 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 (або навантажень) з'єднані в один вузол (в нейтральну точку або, якщо вона заземлена, в нульову) – таке з'єднання називається «зіркою».

Проводи, що з'єднують обмотки генератора або трансформатора з навантаженням, зветься лінійними,

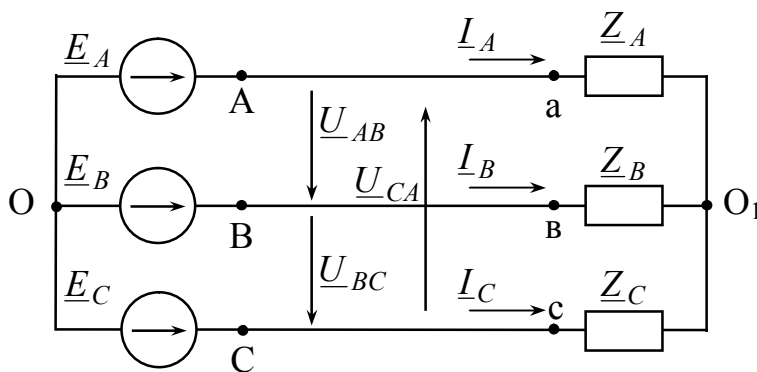


Рисунок 1.1 – Трифазне коло «зірка-зірка» за відсутності нульового проводу

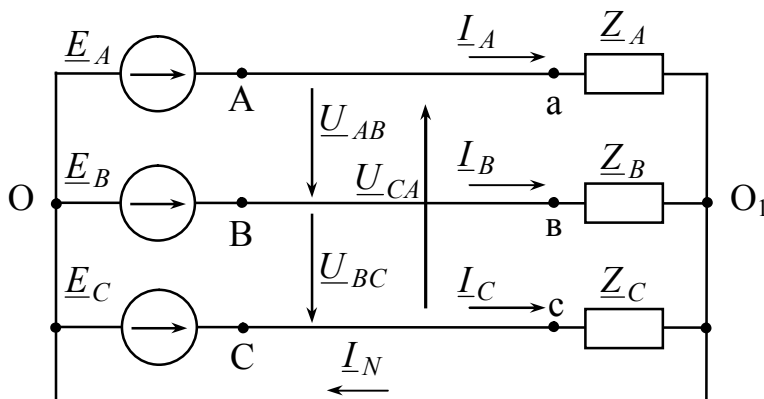


Рисунок 1.2 – Трифазне коло «зірка-зірка» з нульовим проводом

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 коло може бути без нульового (нейтрального) проводу – трипровідна система (рис. 1.1) або з ним – чотиріпровідна система, (рис. 1.2).

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 наван-

таження, 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 або нульового проводу (\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 вигляд:

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

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

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

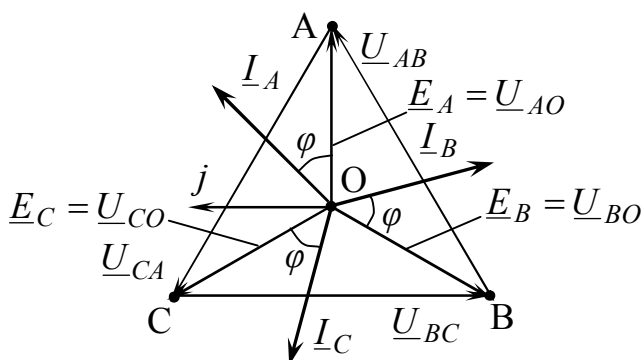


Рисунок 1.3 – Векторна діаграма струмів і напруг

При симетричному навантаженні (рис.1.2) за наявності нульового проводу фазні струми визначають за формулою (1.4), а струм в нейтральному проводі відсутній: $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$. (1.5)

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

При несиметричному навантаженні ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$) за відсутності нульового проводу (рис. 1.1) фазні струми устанавлюються таким чином, що їх сума дорівнює нулю. Внаслідок цього відбувається «викривлення» симетрії фазних напруг, тобто навантаження різних фаз опиняються під різними напругами в порівнянні з номінальною фазною напругою. Потенціали точки O і O_1 не дорівнюють один одному. Розрахунок кола здійснюють в такій послідовності:

- 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:

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

- визначають фазні напруги на навантаженні за виразами:

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

- визначають фазні струми за виразами:

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

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 нульовим проводом, тобто чотирипровідну систему (рис. 1.2). При цьому, якщо зневажати опором нульового 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 нульовому проводі дорівнює геометричній сумі лінійних струмів, тобто визначається за формулою (1.1).

1.5 Порядок виконання роботи

Робота виконують відповідно до вихідних даних, що наведені у таблиці 1.1, за номером стенду. Доцільно перед проведенням експериментів за вихідними даними 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 варіанту	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

1.5.1 Дослідження трифазного кола «зірка-зірка» (Y/Y) за відсутності нульового проводу (Y/Y) і з останнім (Y/Y_0) при симетричному навантаженні ($\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = R_{\Phi}$ – активний опір відповідно до таблиці 1.1)

1.5.1.1 Зібрати схему «зірка-зірка» (рис. 1.1) за відсутності нульового проводу відповідно до свого варіанта. Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 1.2 і занести до таблиці 1.2 результати експериментів.

1.5.1.2 З'єднати точки O і O_1 проводом (схема «зірка-зірка» з нульовим проводом, Y/Y_0) – рисунок 1.2. Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 1.2 і занести до таблиці 1.2 результати експериментів.

1.5.2 Дослідження трифазного кола «зірка-зірка» при несиметричному навантаженні

1.5.2.1 Для кола «зірка-зірка» з нульовим проводом (рис.1.2) активне навантаження у фазі «А» замінити ємнісним опором X_C , що дорівнює R_{Φ} Тобто

$$R_{\Phi} = X_C, \text{ а величина ємності } - C = \frac{10^6}{R_{\Phi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}, \text{ мкФ.} \quad (1.10)$$

Розраховану ємність внести у фазу «А» схеми «зірка-зірка» з нульовим проводом (рис.1.2) з блоку змінної ємності стенду. Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 1.3 і занести до таблиці 1.3 результати експериментів.

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

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

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

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

1.5.2.2 У схемі, що складена для пункту 1.5.2.1, вимкнути нульовий провід (рис.1.1). Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 1.4 і занести до таблиці 1.4 результати експериментів.

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

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

1.5.3 Дослідження аварійних режимів у трифазному колі

1.5.3.1 Обрив лінійного проводу в фазі «А»

У схемі, що складена для пункту 1.5.2.1, вимкнути лінійний провід у фазі

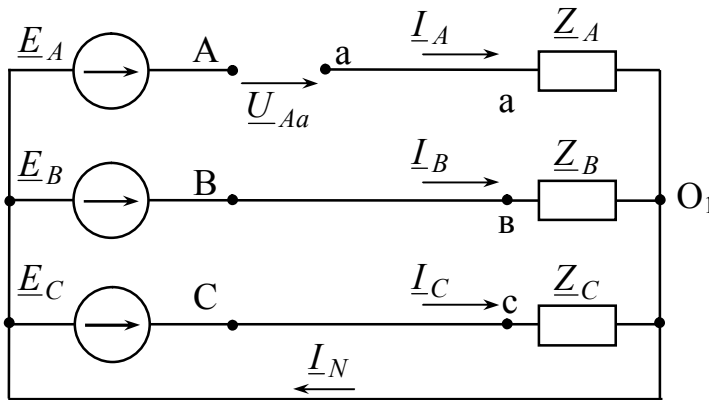


Рисунок 1.4 – Обрив лінійного проводу

«А» – рисунок 1.4 і виміряти всі величини, що вказані у таблиці 1.5, частина Y/Y_0 . Результати експериментів занести до таблиці 1.5.

Вимкнути нульовий провід у схемі рисунку 1.4 і виміряти всі величини, що вказані у таблиці 1.5, частина Y/Y . Результати експериментів занести до таблиці 1.5.

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

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

1.5.3.2 Коротке замикання у фазі «А»

У схемі, що отримана для пункту 1.5.2.2, здійснити коротке замикання ємнісного опору – рисунок 1.5. Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 1.6 і занести результати експериментів до таблиці 1.6.

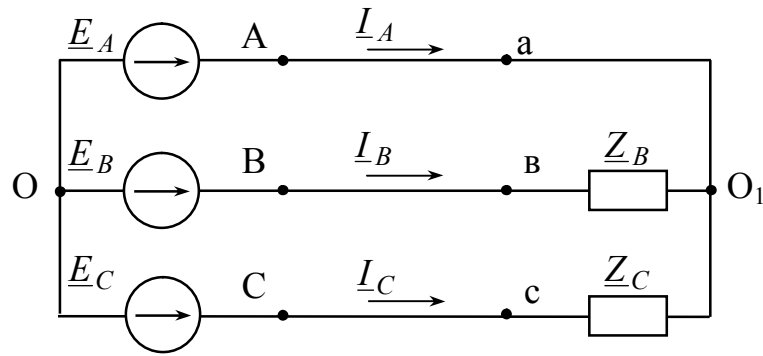


Рисунок 1.5 – Коротке замикання в фазі «А»

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

Спосіб з'єднання навантаження	Визначено	U_{AO}	U_{BO}	U_{CO}	$U_{ab} =$	$U_{bc} =$	$U_{ca} =$	I_A	I_B	I_C	U_{O_1O}		
		U_{aO_1}	U_{bO_1}	U_{cO_1}	$=U_{AB}$	$=U_{BC}$	$=U_{CA}$					(В)	(В)
Y / Y	розрахунком												
	експериментом												

1.6 Обробка експериментальних даних

1.6.1 Для схеми «зірка-зірка» за відсутності нульового проводу при симетричному навантаженні (рис.1.1) розрахувати лінійні напруги, фазні струми в навантаженні. Переконайтеся, що при симетричному навантаженні напруга зміщення нейтралі $U_{O_1O} = 0$. Результати розрахунків занести до таблиці 1.2.

1.6.2 Для схеми «зірка-зірка» з нульовим проводом при симетричному навантаженні (рис.1.2) розрахувати лінійні напруги, фазні струми в навантаженні, Переконайтеся, що при симетричному навантаженні струм нульового проводу $I_N = 0$. Результати розрахунків занести до таблиці 1.2. Побудувати векторну діаграму напруг та струмів, яка буде однаковою для пунктів 1.6.1 та 1.6.2.

1.6.3 Для схеми «зірка-зірка» з нульовим проводом при несиметричному навантаженні розрахувати фазні струми в навантаженні, струм у нульовому проводі, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести до таблиці 1.3.

1.6.4 Для схеми «зірка-зірка» без нульового проводу при несиметричному навантаженні розрахувати напругу зміщення нейтралі U_{O_1O} , фазні та лінійні напруги, фазні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести до таблиці 1.4.

1.6.5 Для схеми «зірка-зірка» з нульовим проводом при обриві лінійного

проводу в фазі «А» розрахувати фазні й лінійні напруги, напругу між точками розриву $\underline{U}_{\text{Аa}}$, струми в навантаженні, струм у нульовому проводі; побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести до таблиці 1.5.

1.6.6 Для схеми «зірка-зірка» без нульового проводу при обриві лінійного проводу в фазі «А» розрахувати напругу зміщення нейтралі $\underline{U}_{\text{O}_1\text{O}}$, фазні й лінійні напруги, напругу між точками розриву $\underline{U}_{\text{Аa}}$, струми в навантаженні, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести до таблиці 1.5.

1.6.7 Для схеми «зірка-зірка» без нульового проводу при короткому замиканні навантаження в фазі «А» розрахувати напругу зміщення нейтралі $\underline{U}_{\text{O}_1\text{O}}$, фазні та лінійні напруги, фазні струми, побудувати векторну діаграму напруг та струмів. Результати розрахунків занести до таблиці 1.6.

Примітка. для розрахунків треба використовувати експериментальні дані значень $E_{\text{Ф}}$ та $R_{\text{Ф}}$.

1.7 Висновки

За результатами роботи зробити висновки відносно виконання законів Ома і Кірхгофа, а також про причини можливих похибок.

1.8 Контрольні питання

1. Поясніть, які системи називають багатофазними, чому трифазні системи отримали найбільше розповсюдження та що таке порядок чергування фаз.

2. Поясніть, яке навантаження називається симетричним та несиметричним?

3. Дайте визначення лінійних і фазних струмів і напруг.

4. Поясніть, які існують співвідношення між лінійними й фазними струмами і напругами в колах «зірка-зірка»?

5. Поясніть, чи може струм в нульовому проводі дорівнювати нулю при несиметричному навантаженні фаз?

6. Проаналізуйте, чому не застосовується трифазна трипровідна система при несиметричному навантаженні?

7. Як проводять розрахунок струмів в колі «зірка-зірка» при несиметричному навантаженні?

8. Яким чином вимірюють активну потужність в трипровідних та чотирипровідних колах «зірка-зірка»?

9. Поясніть, яким чином проводять баланс потужностей в трифазних колах?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження трифазних кіл «зірка-трикутник»

2.1 Мета роботи:

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

2.2 Обладнання і прилади:

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

2.3 Підготовчий етап лабораторної роботи полягає у вивченні теоретичного матеріалу [1 – с. 184-204, 2 – с. 169-188]

Результатом підготовчого етапу є:

- набуття навичок з проведення розрахунку трифазних кіл змінного струму при з'єднанні приймача трикутником за симетричного і несиметричного навантаження без урахування та з урахуванням падіння напруги в лінії;
- набуття навичок з проведення розрахунку аварійних режимів роботи трифазних кіл «зірка-трикутник» (обрив лінійного, фазного проводу);
- набуття навичок будування 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 з'єднані один з одним послідовно таким чином, що «початок» однієї фази генератора (або навантаження) з'єднується з «кінцем» іншої фази (рис. 2.1), а кожна фаза навантаження вмикається між лінійними проводами, внаслідок чого вона знаходиться під лінійною напругою. Лінійна напруга

одночасно є і фазною напругою, тобто: $\underline{U}_\Delta = \underline{U}_\Phi$. (2.1)

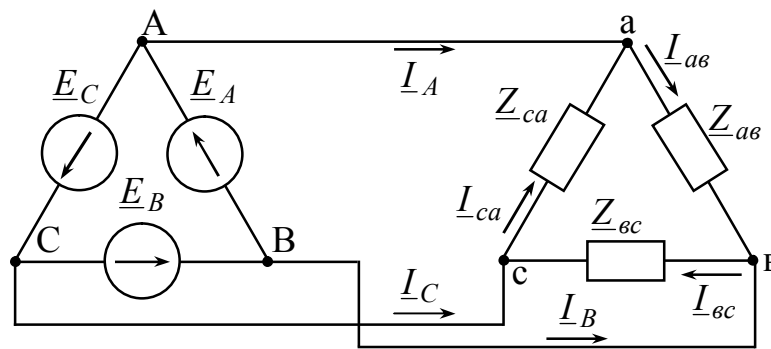


Рисунок 2.1 – Трифазне коло «трикутник-трикутник»

У роботі досліджується схема «зірка-трикутник», коли обмотки генератора з'єднані зіркою, а навантаження – трикутником (рис. 2.2). За додатний напрям лінійних струмів ($\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$) приймається напрям від джерела до навантаження. Додатний напрям фазних струмів вибирають від точки «а» до «в» (струм $\underline{I}_{ав}$), від точки «в» до «с» (струм $\underline{I}_{вс}$), від точки «с» до «а» (струм $\underline{I}_{са}$).

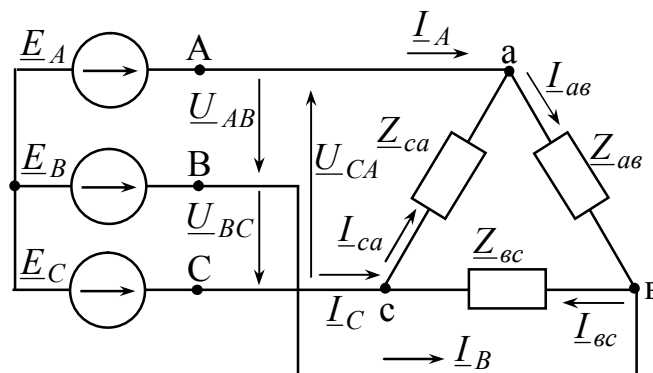


Рисунок 2.2 – Трифазне коло „зірка-трикутник”

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

$$\underline{I}_{ав} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ав}} = \underline{U}_{AB} \cdot \underline{Y}_{ав}; \quad \underline{I}_{вс} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{вс}} = \underline{U}_{BC} \cdot \underline{Y}_{вс}; \quad \underline{I}_{са} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{са}} = \underline{U}_{CA} \cdot \underline{Y}_{са}, \quad (2.2)$$

де $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ – лінійні напруги (1.3);

$\underline{Y}_{ав}; \underline{Y}_{вс}; \underline{Y}_{са}$ – комплекси фазних провідностей:

$$\underline{Y}_{ав} = \frac{1}{\underline{Z}_{ав}}; \quad \underline{Y}_{вс} = \frac{1}{\underline{Z}_{вс}}; \quad \underline{Y}_{са} = \frac{1}{\underline{Z}_{са}}. \quad (2.3)$$

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

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ав} - \underline{I}_{са}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{вс} - \underline{I}_{ав}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{са} - \underline{I}_{вс}. \quad (2.4)$$

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

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

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:

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

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 симетричного навантаження, що має активний характер: $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R_{\phi}$. Тому фазні струми \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} , \underline{I}_{ca} співпадають по фазі з лінійними напругами \underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} відповідно. Лінійні струми в даному випадку співпадають по фазі з фазними напругами \underline{U}_{AO} , \underline{U}_{BO} , \underline{U}_{CO} .

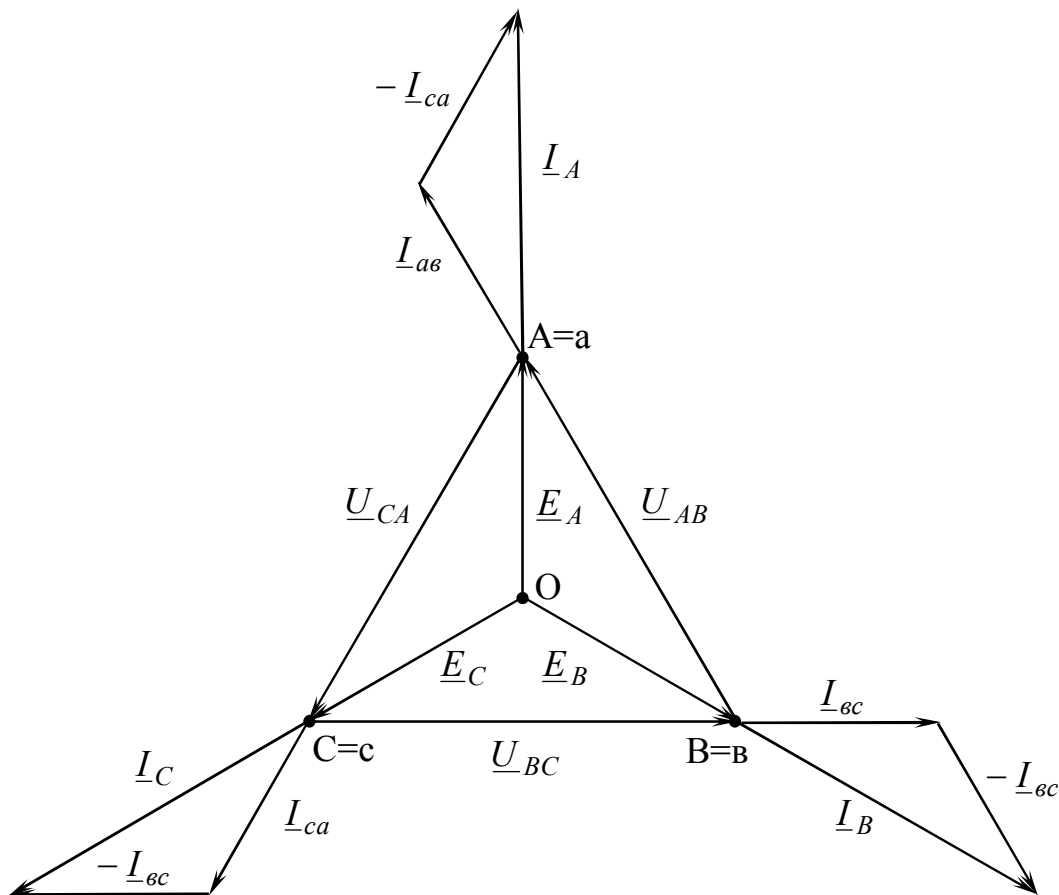


Рисунок 2.3 – Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні симетричного навантаження ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R_{\phi}$) трикутником

При несиметричному навантаженні лінійні струми можуть бути більшими чи меншими, ніж фазні струми, тобто несиметричне навантаження фаз викликає значну асиметрію лінійних струмів, які можуть бути визначені графічно за відомими фазними струмами з діаграми 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 Z_{bc} буде, як і раніше, знаходитись під

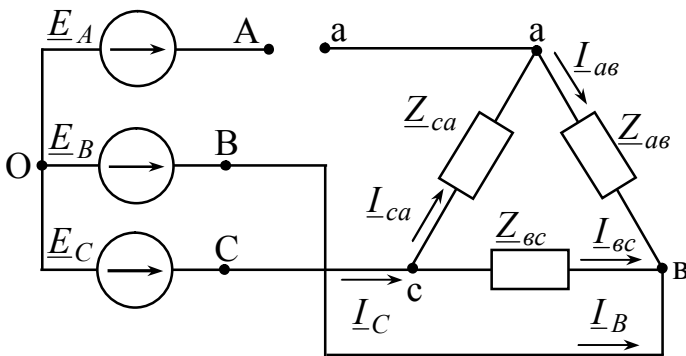


Рисунок 2.4 – обрив лінійного проводу у фазі «А»

нормальною лінійною напругою U_{BC} , тому струм I_{bc} у цій фазі не зміниться. Опори фаз Z_{ab} і Z_{ca} виявляються послідовно з'єднаними й підімкненими до напруги « $-U_{BC}$ ». Якщо $Z_{ab} = Z_{ca}$, то напруга « $-U_{BC}$ » розподіляється між ними порівну і кожен з опорів опиниться під напругою « $-0.5 \cdot U_{BC}$ ». У випадку

коли $Z_{ab} \neq Z_{ca}$, то напруга « $-U_{BC}$ » розподілиться прямо пропорційно величинам цих опорів, при цьому у фазах «ав» і «са» протікатиме один і той же струм:

$$I_{ab} = I_{ca} = \frac{-U_{BC}}{Z_{ab} + Z_{ca}}. \quad (2.7)$$

$$\text{Лінійні струми визначаються так: } I_B = -I_C = I_{bc} - I_{ca}; I_A = 0. \quad (2.8)$$

При обриві одного з фазних проводів, наприклад, у фазі «bc» (рис. 2.4), фазний струм $I_{bc} = 0$, струми I_{ca} та I_{ab} залишаються без змін. Тому лінійний

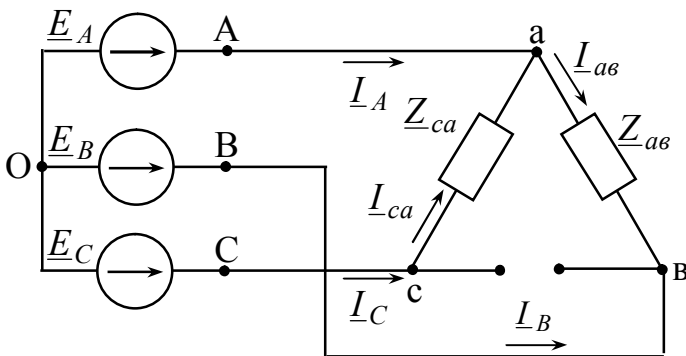


Рисунок 2.5 – Обрив фазного проводу у фазі «bc»

струм $I_A = I_{ab} - I_{ca}$ зберігає своє значення, а лінійні струми I_B та I_C змінюються:

$$I_B = -I_{ab}; I_C = I_{ca}.$$

Таким чином, зміна навантаження в одній з фаз зумовлює одночасну 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 проводів, що підводять, коли опори в лініях не дорівнюють один одному і навантаження фаз несиметричне (рис. 2.6).

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

$$\underline{Z}_a = \frac{\underline{Z}_{ab} \cdot \underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \quad \underline{Z}_b = \frac{\underline{Z}_{bc} \cdot \underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \quad \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_{ca} \cdot \underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}. \quad (2.9)$$

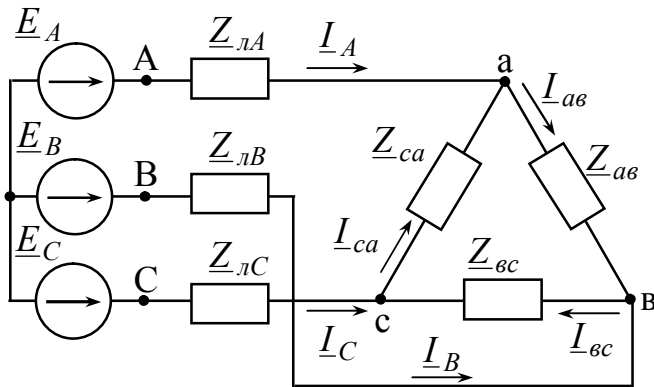


Рисунок 2.6 – Схема «зірка-трикутник» з опорами в лінійних проводах

Якщо навантаження фаз симетричне ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\phi$), то опір променів еквівалентної зірки: $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_\phi}{3}$. (2.10)

У результаті перетворення одержуємо еквівалентну схему, зображену на рисунку 2.7, лінійні струми якої розраховують як для схеми «зірка-зірка» при несиметричному навантаженні за відсутності нульового 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 з'єднують проводів ввімкнені послідовно з опорами відповідних променів зірки):

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_a + \underline{Z}_{lA}, \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_b + \underline{Z}_{lB}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B};$$

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{lC}, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}; \quad (2.11)$$

- визначають напругу зміщення нейтралі \underline{U}_{O_1O} :

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}; \quad (2.12)$$

- лінійні струми:

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

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

законом Ома: $\underline{I}_{ab} = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{U_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{U_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}, \quad (2.14)$

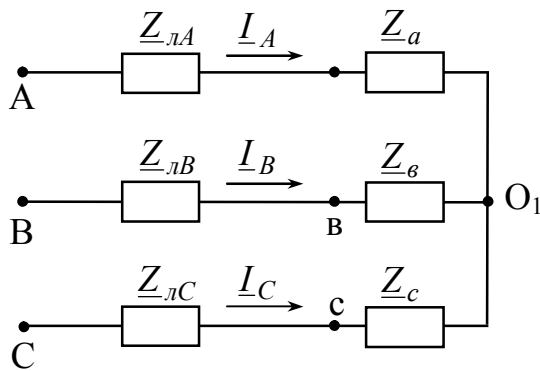


Рисунок 2.7 – Еквівалентна схема

де $\underline{U}_{ab}; \underline{U}_{bc}; \underline{U}_{ca}$ – лінійні напруги на навантаженні:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ab} &= \underline{U}_{aO_1} - \underline{U}_{bO_1} = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a - \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_b; \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{U}_{bO_1} - \underline{U}_{cO_1} = \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_b - \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c; \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{U}_{cO_1} - \underline{U}_{aO_1} = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c - \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a. \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.5 Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, що наведені у таблиці 2.1,

за номером стенду. 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.

2.5.1 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при симетричному навантаженні ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R_\phi$)

Зібрати схему відповідно до свого варіанта (рис. 2.2). Фазні навантаження $\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{bc}, \underline{Z}_{ca}$ – активні опори R_ϕ , що вибирають відповідно до свого варіанта з таблиці 2.1. Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 2.2 (пункт 1). Результати експериментів занести до таблиці 2.2.

2.5.2 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при аварійних режимах

2.5.2.1 У схемі, що складена для пункту 2.5.1, вимкнути лінійний провід у фазі «А» (рис. 2.4). Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 2.2 (пункт 2). Результати експериментів занести до таблиці 2.2.

2.5.2.2 У схемі, що складена для пункту 2.5.1, вимкнути навантаження у фазі «bc» (рис. 2.5). Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 2.2 (пункт 3). Результати експериментів занести до таблиці 2.2.

2.5.3 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні

Замінити активне навантаження у фазі «bc» 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 до схеми рисунку 2.2 у фазу «bc» з блоку змінної ємності замість активного опору R_ϕ . Провести виміри всіх величин, що вказані у таблиці 2.2 (пункт 4). Результати експериментів занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

Номер варіанту	E_{Φ} , В	R_{Φ} , №	$R_{л}$, №
1	15	07	01
2	16	08	02
3	18	09	01
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

№	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)	(мА)	—	—
									U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
									(В)	(В)	(В)
1	Симетричне навантаження	розрахунком									
		експериментом									
2	Обрив лінійного проводу («А»)	розрахунком									
		експериментом									
3	Обрив фазного проводу («вс»)	розрахунком									
		експериментом									
4	Несиметричне навантаження («вс»)	розрахунком									
		експериментом									
5	Несиметр. навантаж. (або симетричне), актив. опори в лініях	розрахунком									
		експериментом									

2.5.4 Дослідження трифазного кола «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні (або, за вказівкою викладача, при симетричному навантаженні $\underline{Z}_{ав} = \underline{Z}_{вс} = \underline{Z}_{са} = R_{\phi}$) та з активними опорами в лінійних проводах $R_{л}$.

Зібрати схему – рисунок 2.6. Фазні навантаження $\underline{Z}_{ав}; \underline{Z}_{вс}$ – активні опори R_{ϕ} , навантаження $\underline{Z}_{вс}$ – ємнісний опір відповідно до пункту 2.5.3, навантаження в лінійних проводах – активні опори $R_{л}$ відповідно до таблиці 2.1. Провести виміри. Результати експериментів занести до таблиці 2.2 (пункт 5).

2.6 Обробка експериментальних даних

Примітка: для розрахунків треба використовувати експериментальні дані значень E_{ϕ} та R_{ϕ} .

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

2.6.2 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 до таблиці 10 (пункт 2).

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

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

2.6.5 Для схеми «зірка-трикутник» при несиметричному навантаженні з активними опорами в лінійних проводах ($R_{л}$) розрахувати лінійні напруги $\underline{U}_{ав}, \underline{U}_{вс}, \underline{U}_{са}$ на навантаженнях, фазні й лінійні струми, побудувати векторну діаграму напруг і струмів. Результати розрахунків занести до таблиці 2.2 (пункт 5).

Побудова векторної діаграми напруг та струмів трифазного кола для схеми рисунку 2.6 полягає в наступному:

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

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

- знаходять положення точок «а», «в», «с» таким чином:

$$\underline{\varphi}_0 = 0; \quad \underline{\varphi}_a = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_A - \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_L; \quad \underline{\varphi}_0 = 0; \quad \underline{\varphi}_b = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_B - \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_L;$$

$$\underline{\varphi}_0 = 0; \quad \underline{\varphi}_c = \underline{\varphi}_0 + \underline{E}_C - \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_L;$$

- в масштабі за струмом ($m_I, \frac{A}{\tilde{n}i}$) будують з точок «а», «в», «с» вектори фазних струмів \underline{I}_{ab} , \underline{I}_{bc} , \underline{I}_{ca} відповідно; а потім геометрично отримують вектори лінійних струмів \underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C за першим законом Кірхгофа, а саме $\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}$; $\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}$;

Для схем рисунку 2.2 (пункти 2.5.1, 2.5.3) положення точок «а», «в», «с» знаходити не треба, тому що А=а, В=в, С=с (див. діаграму на рис. 2.3).

Для схеми рисунку 2.4 (пункт 2.5.2.1) положення точки «а» визначається розрахованим комплексним значенням напруги на розриві \underline{U}_{Aa} (В=в, С=с).

2.7 Висновки

За результатами роботи зробити висновки відносно виконання законів Ома і Кірхгофа, а також про причини можливих похибок.

2.8 Контрольні запитання

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

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

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

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

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

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження впливу характеру опору на форму кривої струму в колах несинусоїдного періодичного струму

3.1 Мета роботи:

- ознайомлення з роботою осцилографа;
- дослідження 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 кола, що живиться несинусоїдною періодичною напругою.

3.2 Обладнання і прилади:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд УИЛС-1;
- елементи набірної поля стенду;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр;
- аналоговий осцилограф С1-68, або цифровий осцилограф

3.3 Підготовчий етап лабораторної роботи полягає у вивченні теоретичного матеріалу [1 – с. 204-226, 2 – с.200-220].

Результатом підготовчого етапу є:

- вміння проводити розкладання в ряд Фур'є несинусоїдних кривих;
- набуття навичок з проведення розрахунку кіл з несинусоїдними струмами та напругами.

3.4 Загальні відомості

В електротехніці з різних причин можуть виникнути несинусоїдні періодичні струми та напруги (наявність в колі джерела, що виробляє несинусоїдну напругу; наявність в колі з джерелами синусоїдної напруги нелінійних елементів та ін.).

Основою розрахунку .:

$$f(\omega t) = A^{(0)} + A_m^{(1)'} \cdot \sin(\omega t) + A_m^{(1)''} \cdot \cos(\omega t) + A_m^{(2)'} \cdot \sin(2 \cdot \omega t) + A_m^{(2)''} \cdot \cos(2 \cdot \omega t) + A_m^{(3)'} \cdot \sin(3 \cdot \omega t) + A_m^{(3)''} \cdot \cos(3 \cdot \omega t) + \dots + A_m^{(k)'} \cdot \sin(k \cdot \omega t) + A_m^{(k)''} \cdot \cos(k \cdot \omega t) + \dots \quad (3.1)$$

Нульова гармоніка (чи постійна складова):

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

Амплітуда синусної складової гармоніки з номером k :

$$A_m^{(k)'} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} f(\omega t) \cdot \sin(k \cdot \omega t) d\omega t. \quad (3.3)$$

Амплітуда косинусної складової гармоніки з номером k .

$$A_m^{(k)''} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} f(\omega t) \cdot \cos(k \cdot \omega t) d\omega t. \quad (3.4)$$

Ряд Фур'є може також бути записаний у вигляді суми нульової гармоніки та синусних складових з 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)

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

Діюче значення несинусоїдної періодичної функції:

$$A = \sqrt{A^{(0)2} + \frac{A_m^{(1)2}}{2} + \frac{A_m^{(2)2}}{2} + \frac{A_m^{(3)2}}{2} + \dots + \frac{A_m^{(k)2}}{2}}. \quad (3.7)$$

Несинусоїдні періодичні криві характеризують коефіцієнтами:

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

Усі несинусоїдні періодичні криві, з якими мають справу в електротехніці, поділяються на дві групи: криві геометрично правильної форми й криві не-правильної форми. Ряди Фур'є для несинусоїдних періодичних кривих геометрично правильної форми наведені в довідковій літературі (або в підручниках).

Несинусоїдні періодичні криві 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 – $\Delta\omega t = \frac{2\pi}{n}$ (звичайно $n=24$).

Таким чином, амплітуда нульової гармоніки дорівнює:

$$A^{(0)} \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \Delta\omega t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} \left(f_p(\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} \right) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t), \quad (3.8)$$

де p – поточний індекс; $p=1 \div n$;

$f_p(\omega t)$ – 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 :

$$A_m^{(k)'} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t) \cdot \Delta\omega t = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} = \quad (3.9)$$

$$= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t);$$

$$A_m^{(k)''} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t) \cdot \Delta\omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} \left(f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} \right) = \quad (3.10)$$

$$= \frac{2}{n} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t)),$$

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

Періодичні несинусоїдні криві можуть мати ті чи інші види симетрії, що спрощує їх розкладання в ряд Фур'є, бо ті чи інші гармоніки виключаються з ряду (див. таблицю 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 $u_R(\omega t)$ в ряд Фур'є (рис.3.1). Слід врахувати, що крива має два види симетрії (відносно початку координат та осі абсцис), отже можна обмежитися розкладанням чверті періоду. Такий ряд Фур'є повинен містити тільки непарні синусні складові, а саме: $u_R(\omega t) = U_{mR}^{(1)} \cdot \sin \omega t + U_{mR}^{(3)} \cdot \sin 3\omega t + U_{mR}^{(5)} \cdot \sin 5\omega t + \dots$

Розділимо чверть періоду функції $u_R(\omega t)$ на 6 рівних частин і виміряємо 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 та інші). Результати розкладання наведені в таблиці 3.2 (обмежуємося трьома членами ряду).

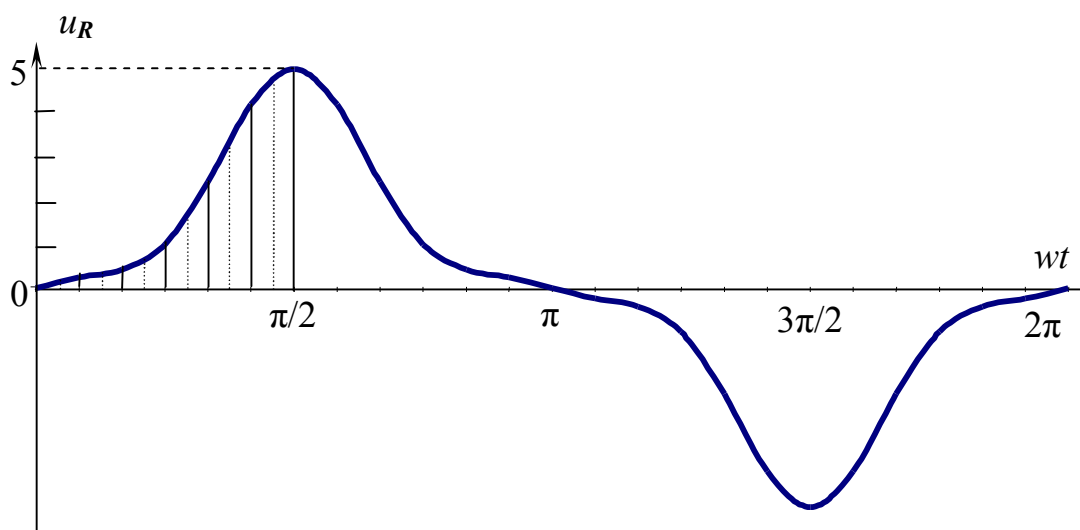


Рисунок 3.1 – Розкладання в ряд Фур'є несинусоїдної періодичної кривої $u_R(\omega t)$

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

p	$u_R(\omega t)$	κ=1			κ=3			κ=5		
		ωt	$\sin \omega t$	$u \cdot \sin \omega t$	$3\omega t$	$\sin 3\omega t$	$u \cdot \sin 3\omega t$	$5 \cdot \omega t$	$\sin \cdot 5\omega t$	$u \cdot \sin 5\omega t$
1	0,25	7,5	0,1305	0,0326	22,5	0,3827	0,0957	37,5	0,6088	0,1522
2	0,42	22,5	0,3827	0,1607	67,5	0,9239	0,3880	112,5	0,9239	0,3880
3	0,67	37,5	0,6088	0,4079	112,5	0,9239	0,6190	187,5	-0,1305	-0,0875
4	1,67	52,5	0,7934	1,3249	157,5	0,3828	0,6392	262,5	-0,9914	-1,6557
5	3,33	67,5	0,9239	3,0765	202,5	-0,3826	-1,2740	337,5	-0,3827	-1,2743
6	4,67	82,5	0,9914	4,6300	247,5	-0,9238	-4,3143	412,5	0,7934	3,7050
Сума		$\sum_1^6 1 = 9,6327$			$\sum_1^6 3 = -3,8464$			$\sum_1^6 5 = 1,2277$		

Знайдемо $U_{mR}^{(1)}$, $U_{mR}^{(3)}$; $U_{mR}^{(5)}$. Амплітуди дорівнюватимуть:

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

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

Таким чином, ряд Фур'є має вигляд

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

Розрахунок електричних кіл з періодичними несинусоїдними джерелами енергії

Треба відзначити, що кола з несинусоїдними джерелами енергії розраховують *методом суперпозицій (накладання)*. Порядок розрахунку наступний.

- представляють несинусоїдну напругу чи струм джерела рядом Фур'є.
- розраховують комплекси віток для окремих гармонік, так для гармоніки з

$$\text{номером } k: \underline{z}^{(k)} = R + j \cdot \left(k \cdot \omega L - \frac{1}{k \cdot \omega C} \right) = R + j \cdot \left(k \cdot X_L^{(1)} - \frac{X_C^{(1)}}{k} \right), \quad (3.11)$$

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

- розраховують струми і напруги на ділянках кола від дії нульової гармоніки джерела, враховуючи, що фізичний смисл нульової гармоніки, скажімо, напруги – це постійна напруга (падіння напруги на індуктивності від дії нульової гармоніки струму дорівнює нулю – $U_L^{(0)} = 0$, $X_L^{(0)} = 0$, а струм вітки з ємністю 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 т.д.

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

- записують ряди Фур'є для струмів і напруг на ділянках кола у вигляді суми окремих гармонік.

Розглянемо розрахунок електричних кіл з періодичними несинусоїдними напругами на вході на прикладі схем рисунків 3.5, 3.6, 3.7, що досліджуються в роботі.

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):

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

Таким чином, миттєве значення напруги на вході кола,

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

Миттєве значення струму для кола, що має активний характер (рис. 3.5):

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

Розрахунок схеми, що має активно-індуктивний характер (рис. 3.6), проводимо наступним чином.:

- Записуємо комплекси вхідної напруги для окремих гармонік, В –

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

- Визначаємо комплекси опорів кола для 1÷5 гармонік, Ом:

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

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

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

- Визначаємо комплекси амплітудних значень струмів для окремих гармонік, А:

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

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

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

- Записуємо миттєве значення струму, А:

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

Розрахунок схеми, що має активно-ємнісний характер (рис. 3.7) проводиться у такій ж послідовності:

- Визначаємо комплекси опорів кола для 1÷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:

$$\underline{I}_m^{(1)} = \frac{U_{\dot{\alpha}\ddot{\alpha}m}^{(1)}}{\underline{Z}^{(1)}} = \frac{\frac{8 \cdot U_{m\dot{\alpha}\ddot{\alpha}}}{\pi^2} \angle 0}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2} \angle -\varphi^{(1)}} = \frac{8 \cdot U_{m\dot{\alpha}\ddot{\alpha}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \angle \varphi^{(1)};$$

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

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

- Миттєве значення струму, А:

$$i_C(\omega t) = \frac{8 \cdot U_{m\dot{\alpha}\ddot{\alpha}}}{\pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi^{(1)}) - \frac{8 \cdot U_{m\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot t + \varphi^{(3)})}{9 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{3 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} + \\ + \frac{8 \cdot U_{m\dot{\alpha}\ddot{\alpha}}}{25 \cdot \pi^2 \cdot \sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{5 \cdot \omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \sin(5 \cdot \omega \cdot t + \varphi^{(5)}).$$

Якщо вхідна напруга має прямокутну форму, то методика розрахунку миттєвих значень струмів залишається без змін, тільки вхідна напруга матиме вигляд: $u_{ex}(\omega t) = \frac{4 \cdot U_{max}}{\pi} \left(\sin(\omega \cdot t) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot \omega \cdot t) \right)$, В.

3.5 Порядок виконання роботи

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

3.5.1 Знайомство з роботою аналогового осцилографа С1-68 або осцилографа

Ввімкнути осцилограф С1-68 і за інструкцією ознайомитися з його роботою, з призначенням ручок керування, що виведені на лицьову панель приладу. Перевірити баланс і калібрування за часом та амплітудою. Ручки вертикального та горизонтального калібрування в ході роботи повинні бути встановлені в положення, що забезпечують можливість і зручність вимірювань. (стале зображення кривої та її необхідний розмір отримують за допомогою ручок керування «Усиление Y», «Длительность развертки», «Стабильность», «Уровень»). Масштаби зображення по осях Y та X повинні бути підібрані так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрана.

При виконанні вимірювань за допомогою осцилографу SDS 1022 DL необхідно підключити вимірювальний кабель до роз'ємну першого каналу X (жовтий) та натиснути кнопку «живлення» у верхній частині корпусу. Вимірювання здійснюється після підключення виводів кабелю до відповідної ділянки схеми у автоматичному режимі (натиснути синю кнопку «AUTO»). Після автоматичної синхронізації на екрані відобразиться розгорнення вимірюваної напруги. За необхідністю можна здійснити додаткове масштабування за допомогою ручки «VERTICAL» першого (жовтого) каналу і ручки «HORIZONTAL». Натисканням кнопки «RUN/STOP» здійснюється зупинка розгортання (кнопка після цього підсвічується червоним). 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 осцилографу під осцилограмою.

Примітка: для виконання експериментальної частини роботи треба мати кальку, якщо використовують аналоговий осцилограф С1-68, якщо використо-

вують цифровий осцилограф SDS 1022 DL, то достатньо сфотографувати зображення, або зберегти його на флеш-накопичувач.

3.5.2 Отримання несинусоїдного струму в колі з нелінійним елементом

3.5.2.1 Зібрати електричне коло (рис. 3.4). У якості опора R_1 використати змінний опір R_4 ($R_1=10$ Ом) з блоку змінних опорів стенда УИЛС-1. Встановити величини діючого значення U_{ex} та частоти f синусоїдної напруги відповідно до вихідних даних, що наведені у таблиці 3.3, за номером стенду. Ці величини встановлюють за допомогою мультиметра, який під'єднують до входу кола.

У якості нелінійного елемента взяти індуктивність з феромагнітним осердям L_K з елементів набірного поля відповідно до свого варіанта.

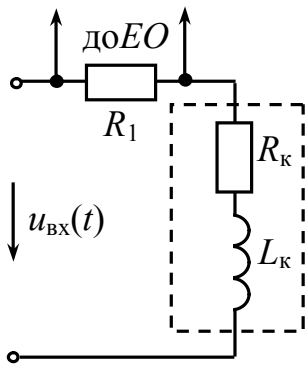


Рисунок 3.4 – Схема для отримання несинусоїдного струму

3.5.2.2 Під'єднати осцилограф до входу кола і виміряти величини U_{max} , f . Порівняти результати з встановленими за допомогою мультиметра діючим значенням U_{ex} . Зарисувати криву вхідної напруги з екрана осцилографа на кальку. Записати масштаби за напругою і часом.

3.5.2.3 Під'єднати осцилограф до опору R_1 й зарисувати криву несинусоїдної напруги $u_{R1}(t)$ за методикою пункту 3.5.2.2.

Примітка. Величини U , f можуть корегуватися викладачем.

Таблиця 3.3 – Вихідні дані експерименту 1

№ варіанта	U , В	L_K , №	f , КГц	№ варіанта	U , В	L_K , №	f , КГц
1	6	25	0,5	8	11	25	1,0
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

3.5.3 Експериментальна перевірка впливу характеру кола на форму струму при несинусоїдній вхідній напрузі

3.5.3.1 Зібрати електричне коло – рисунок 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.

3.5.3.2 Під'єднати осцилограф до входу кола і отримати на екрані сталe зображення несинусоїдної вхідної напруги; зарисувати криву з екрану осцилографа на кальку (вхідна напруга однакова для усіх схем рисунку 3.5). Записати масштаби за напругою і часом.

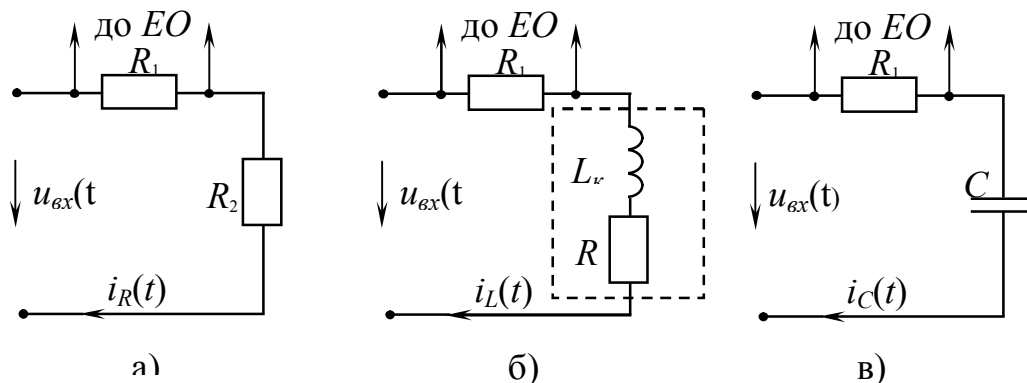


Рисунок 3.5 – Схеми для експериментальної перевірки впливу характеру кола на форму кривої струму

Під'єднати осцилограф до опору R_1 і зарисувати криву несинусоїдної напруги $u_{R1}(t)$. Записати масштаби за напругою і часом.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані експерименту 2

№ варіанта	$U_m, В$	Форма несинусоїдної напруги	$f, КГц$	$R_2, Ом$	$L, мГн$	$R_k, Ом$	$C, мкФ$
1	1,7	Трикутникова	0,5	42	15	22,5	5,2
2	2,5	Трикутникова	1,5	92	12	18	1,0
3	4	Прямокутна	2	100	20	30	0,07
4	2	Трикутникова	1,0	50	20	30	2,24
5	3	Трикутникова	1,0	70	30	45	1,8
6	5	Прямокутна	1,0	22	10	15	0,18
7	8	Трикутникова	5,0	400	14	21	0,08
8	4,5	Трикутникова	3,5	190	10	15	0,22
9	4	Прямокутна	1,0	60	15	22,5	0,14
10	6	Трикутникова	2,0	330	26	39	0,28
11	3,5	Прямокутна	1,5	10	25	37,5	0,22
12	4	Трикутникова	2,0	190	16	24	0,44
13	5	Прямокутна	1,5	60	18	27	0,1
14	2,5	Трикутникова	1,5	170	20	30	0,67

3.5.3.3 Зібрати електричне коло 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 зарисувати криву несинусоїдної напруги $u_{R_1}(t)$. Записати масштаби за напругою і часом.

3.5.3.4 Зібрати електричне коло рисунку 3.6,в. Значення ємності C взяти з таблиці 3.4 відповідно до свого варіанта. Під'єднати осцилограф до опору R_1 і зарисувати криву несинусоїдної напруги $u_{R_1}(t)$. Записати масштаби за напругою і часом.

3.6 Обробка експериментальних даних

3.6.1 Розкласти криву несинусоїдної напруги $u_{R_1}(\omega t)$, що отримана в пункті 3.5.2.3, графоаналітичним методом в ряд Фур'є (обмежуємося трьома членами ряду).

Записати ряд Фур'є для струму цього кола $i(\omega t)$ (ряд Фур'є $i(\omega t)$ отримується з ряду Фур'є $u_{R_1}(\omega t)$ шляхом ділення амплітуд гармонік $U_{mR_1}^{(1)}$, $U_{mR_1}^{(3)}$; $U_{mR_1}^{(5)}$ на величину опору $R_1=10$ Ом).

Побудувати хвильову діаграму несинусоїдного струму $i(\omega t)$. (скласти графічно хвильові діаграми окремих гармонік). Хвильова діаграма може бути побудована на міліметровому папері, або з застосуванням програм MathCad Professional, MS Excel та інших.

3.6.2 За даними пункту 3.5.3 аналітично розрахувати $i(\omega t)$ для усіх схем рисунку 3.5 (тобто - $i_R(\omega t), i_L(\omega t), i_C(\omega t)$) Побудувати хвильові діаграми несинусоїдних струмів $i_R(\omega t), i_L(\omega t), i_C(\omega t)$ (скласти графічно хвильові діаграми окремих гармонік). Хвильові діаграми можуть бути побудовані на міліметровому папері, або з застосуванням програм MathCad Professional, MS Excel та інших. Порівняти побудовані хвильові діаграми з отриманими за допомогою осцилографа зображеннями.

Примітка. Кальки осцилограм повинні бути в кожному звіті.

3.7 Висновки

За результатами роботи зробити висновки

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

3.8 Контрольні питання

1. Дайте визначення періодичних несинусоїдних струмів і напруг та вкажіть режими роботи електричних кіл, що призводять до виникнення несинусоїдних струмів і напруг.
2. Вкажіть особливості періодичних несинусоїдних кривих, що мають деякі види симетрії.
3. Поясніть, як проводять розклад в ряд Фур'є кривих геометрично неправильної форми.
4. Поясніть, який фізичний смисл 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 характеризують 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 з несинусоїдними джерелами енергії та вкажіть його особливості.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження перехідних процесів в колах постійного струму першого та другого порядку

4.1 Мета роботи:

- 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 відключенні джерела постійної напруги.

4.2 Обладнання і прилади:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд УДЛС-1;
- елементи набірної плати стенду;
- мультиметр;
- осцилограф С1-68, або цифровий осцилограф.

4.3 Підготовчий етап лабораторної роботи полягає у вивченні теоретичного матеріалу, що має відношення до розділу «Перехідні процеси в електричних колах» [1 – с. 226-260; 2 – с. 234–288].

Результатом підготовчого етапу є вміння проводити розрахунок перехідних процесів класичним методом у колах, що досліджуються (які саме струми й напруги треба розрахувати вказано в пункті «Обробка експериментальних даних»).

4.4 Загальні відомості

Включення, відключення, переключення активних і пасивних віток електричних кіл, зміна їх параметрів та інші комутаційні процеси обумовлюють зміну струмів і напруг на окремих ділянках кіл. При цьому перехід струмів і напруг від одних значень до інших в колах з індуктивностями та ємностями відбувається не миттєво, а протягом деякого часу. Практично цей час становить частки секунд, а теоретично дорівнює нескінченності. Процес переходу електричного кола від одного режиму до іншого, обумовлений зміною її 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 безпосередньо з цих значень.

Слід відзначити, що тема «Перехідні процеси в лінійних електричних колах і методи їх розрахунку» є важливою, досить складною та об'ємною. Тому обмежимося в цих методичних вказівках тільки коротким оглядом *класичного методу* розрахунку перехідних процесів та прикладами розрахунку перехідних процесів класичним методом електричних кіл, що практично досліджуються в роботі.

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

$$i(t) = i_{np} + i_{\delta}; \quad u(t) = u_{np} + u_{\delta}, \quad (4.1)$$

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

u_{δ} , i_{δ} – вільні складові напруги та струму, що обумовлені зміною енергії індуктивності та ємності.

Порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом:

- довільно направляємо 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 примусові складові усіх струмів і напруг шляхом розрахунку схеми після комутації (сталий режим; час після комутації $t \rightarrow \infty$);
- складаємо характеристичне рівняння (за методом вхідного опора або головного визначника), вирішуємо його і за кількістю та типом коренів записуємо вид вільних складових струмів і напруг;
- визначаємо постійні інтегрування за допомогою незалежних і залежних початкових умов.

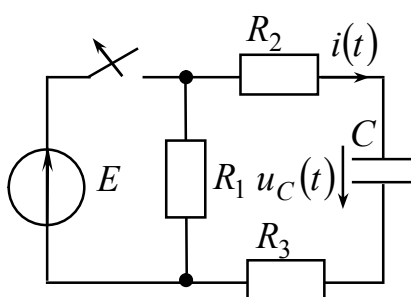


Рисунок 4.1 – Розряд ємності

Задача № 1. Дослідження перехідних процесів у R - C колі при відключенні й підключенні до джерела постійної напруги

Вихідні дані: $E = 10$ В; $C = 3$ мкФ;
 $R_1 = 50$ Ом; $R_2 = 75$ Ом; $R_3 = 150$ Ом.

Розряд ємності на активний опір (рис. 4.1)

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

Незалежна початкова умова: $u_C(0) = E = 10$ В.

Рішення для $i(t)$ і $u_C(t)$ шукаємо у вигляді: $i(t) = i_{np} + i_{\epsilon}$; $u_C(t) = u_{Cnp} + u_{C\epsilon}$,

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

$u_{C\epsilon}$ – вільна складова напруги на ємності.

Характеристичне рівняння для схеми на рисунку 4.1:

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

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

Загальне рішення з урахуванням позначеного 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:

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

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

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

Заряд ємності при підключенні R-C кола до джерела постійної напруги (рис. 4.2)

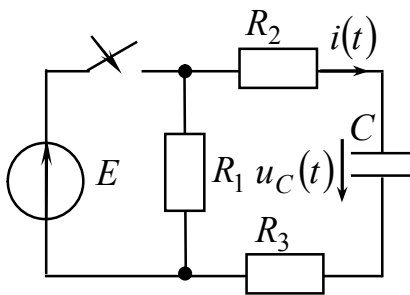


Рисунок 4.2 –
Заряд ємності

Незалежна початкова умова: $u_C(0) = 0$ В.

Примусова складова напруги на ємності:

$$u_{Cnp} = E = 10 \text{ В.}$$

Характеристичне рівняння:

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

$= -1481,48 \text{ с}^{-1}$. Таким чином, вільна складова має

вигляд – $u_{C\epsilon} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-1481,48 \cdot t}$.

Загальне рішення – $u_C(t) = u_{Cnp} + u_{C\epsilon} = 10 + A \cdot e^{-1481,48 \cdot t}$.

Використовуючи незалежну початкову умову, маємо $u_C(0) = 0 = 10 + A \Rightarrow$

$A = -10 \Rightarrow \text{напруга на ємності} - \underline{u_C(t) = 10 - 10 \cdot e^{-1481,48 \cdot t}}, \text{ В.}$

Струм вітки з ємністю:

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

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

Задача № 2 Дослідження перехідних процесів у $R-L$ колі при відключенні й підключенні до джерела постійної напруги

Вихідні дані: $E = 10 \text{ В}$; $L = 35 \text{ мГн}$; $R_1 = 50 \text{ Ом}$; $R_2 = 150 \text{ Ом}$.

Відключення $R-L$ кола від джерела постійної напруги (рис. 4.3)

Загальне рішення для струму вітки з індуктивністю та напруги на індуктивності: $i(t) = i_{i\delta} + i_{\hat{a}}$ і $u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$.

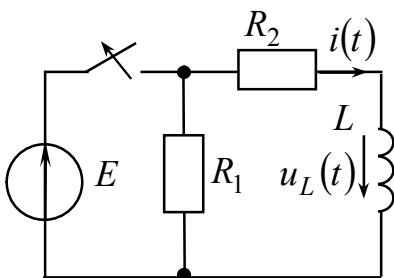


Рисунок 4.3 – Розряд індуктивності

Незалежна початкова умова:

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

Примусова складова струму: $i_{i\delta} = 0 \text{ А}$.

Характеристичне рівняння:

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

Таким чином, вільна складова $i_{\hat{a}} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-5714,29 \cdot t}$, а загальне рішення $i(t) = i_{i\delta} + i_{\hat{a}} = A \cdot e^{-5714,29 \cdot t}$. Постійну інтегрування A визначаємо, використовуючи незалежну початкову умову $i(0) = 0,067 \Rightarrow A = 0,067$.

Таким чином, струм та напруга на індуктивності: $\underline{i(t) = 0,067 \cdot e^{-5714,29 \cdot t}}, \text{ А}$;

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

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

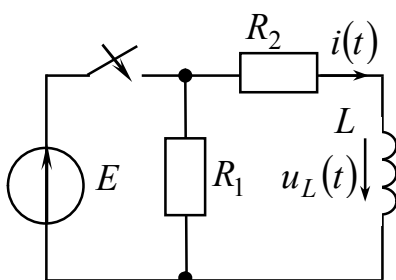


Рисунок 4.4 – Заряд індуктивності

Заряд індуктивності при підключенні $R-L$ кола до джерела постійної напруги (рис. 4.4)

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

Примусова складова струму:

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

Характеристичне рівняння:

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

Вільна складова струму: $i_e = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-4285,7 \cdot t}$.

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

Таким чином, струм та напруга на індуктивності

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

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

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

Задача № 3 Дослідження перехідних процесів у $R-L-C$ колі при відмиканні його від джерела постійної напруги (рис. 4.5)

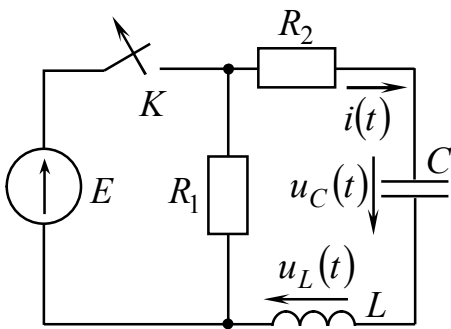


Рисунок 4.5 – Відключення $R-L-C$ кола від джерела постійної напруги

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

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

Загальне рішення для напруги на ємності: $u_C(t) = u_{Cв} + u_{Cnp}$.

Незалежні початкові умови: $i(0) = 0 \text{ А}$;
 $u_C(0) = E = 10 \text{ В}$.

Примусова складова напруги на ємності:
 $u_{Cnp} = 0 \text{ В}$.

Характеристичне рівняння:

$$Z_{ex}(p) = R_1 + R_2 + p \cdot L + \frac{1}{C \cdot p} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p^2 + \frac{R_1 + R_2}{L} \cdot p + \frac{1}{C \cdot L} = 0 \Rightarrow p_{1,2} = -\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot L}\right)^2 - \frac{1}{C \cdot L}} \quad \text{— корені}$$

характеристичного рівняння, що можуть бути:

- дійсними й різними, коли $R_1 + R_2 > R_{кр} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ ($R_{кр}$ — так званий критичний опір $R-L-C$ кола при підключенні його до джерела постійної напруги) — *апериодичний* режим;
- дійсними й рівними, коли $R_1 + R_2 = R_{кр} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ — *критичний* режим;

- комплексно-спряженими, коли $R_1 + R_2 < R_{kp} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$ – коливальний режим.

Після підстановки вихідних даних, маємо:

$$p^2 + \frac{450}{0,07} \cdot p + \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07} = 0 \Rightarrow p^2 + 6428,6 \cdot p + 9523809,5 = 0 \Rightarrow \text{корені –}$$

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

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

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 $u_C(0) = E = 10 \text{ В}$, $i(0) = 0 \text{ А}$:

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

$$A_1 = 22,88; A_2 = -12,88.$$

Напруга на ємності та струм через ємність дорівнюють:

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

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

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

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

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

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 $R_2 = 432 - R_1 = 382 \text{ Ом}$.

Візьмемо $R_2 = 350$ Ом, тоді корені характеристичного рівняння:

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

складова напруги на ємності – $u_{C_6} = A \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha)$.

Оскільки $u_{Cnp} = 0$ В, то $u_C(t) = u_{C_6} = A \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha)$, В.

Струм $i(t) = C \cdot \frac{du_C}{dt} = C \cdot A \cdot e^{-2857,1t} [-2857,1 \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha) + 1166,5 \cdot \cos(1166,5 \cdot t + \alpha)]$.

Коефіцієнти A і α знаходимо, використовуючи початкові умови:

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

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

$$\begin{aligned} u_C(t) &= 26,47 \cdot e^{-2857,1t} \sin(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ), \text{ В}; \quad i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 26,47 \cdot e^{-2857,1t} [-2857,1 \cdot \sin(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ) + 1166,5 \cdot \cos(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ)]. \end{aligned}$$

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

Тоді струм вітки R_2 -L-C:

$$\begin{aligned} i(t) &= -1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 26,47 \cdot \sqrt{2857,1^2 + 1166,5^2} \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin\left(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ - \arctg \frac{1166,5}{2857,1}\right) = \\ &= -0,122 \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t), \text{ А}. \end{aligned}$$

Напруга на індуктивності $u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = 26,355 \cdot e^{-2857,1t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t - 22,2^\circ)$, В.

Постійну часу у випадку коливального режиму визначають так:

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi}{8 \cdot \omega_0} = \frac{2 \cdot \pi}{1166,5 \cdot 8} = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ н}, \text{ де } \omega_0 - \text{ частота вільних коливань.}$$

4.5 Порядок виконання роботи

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

Примітка: для виконання експериментальної частини роботи треба мати кальку.

4.5.1 Дослідження перехідних процесів у R - C колі при відключенні й підключенні до джерела постійної напруги – розряд та заряд ємності (експерименту 1).

Зібрати електричне коло рисунку 4.1. Елементи R_3 , C – це відповідно змінний опір і змінна ємність з блоку змінних пасивних елементів стенда УИЛС-1. Значення останніх взяти з таблиці 4.1 відповідно до свого варіанту. Опори R_1 , R_2 для усіх варіантів – це опори $R01$, $R02$ з елементів набірної поля. У якості джерела E використати регульоване джерело постійної напруги (значення E взяти з табл. 4.1, воно є незмінним для всіх експериментів), ключ K – електронний ключ з блоку постійних напруг стенду.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані експерименту 1

№ варіанту	E , В	R_3 , Ом	C , мкФ	№ варіанту	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

Під'єднати осцилограф паралельно конденсатору C і отримати стале зображення кривої $u_C(t)$. Правила користування осцилографом С1-68, або цифровим осцилографом – дивись п. 3.5.1 попередньої лабораторної роботи.

Виміряти значення напруги на опорі R_2 мультиметром. Зарисувати криву $u_C(t)$ (2 частини: заряд і розряд ємності) з екрану осцилографа на кальку. Масштаби зображення за осями Y та X повинні бути підібрані так, щоб крива займала не менше 0,75 площини екрану. Записати масштаби за напругою і часом.

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

Встановити вихідне значення ємності й під'єднати осцилограф паралельно опорі R_2 . Зарисувати криву струму $i(t) = \frac{u_{R_2}(t)}{R_2}$ під час перехідного процесу

(дві частини: при заряді і розряді ємності). Масштаби зображення по осях Y та X повинні бути підібрані так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрану. Записати масштаби за напругою і часом.

Зменшити, а потім збільшити значення R_2 приблизно в 2 рази, знову зняти осцилограму кривої $i(t)$ при заряді і розряді ємності.

4.5.2 Дослідження перехідних процесів у $R-L$ колі при відключенні та підключенні до джерела постійної напруги (експеримент 2).

Зібрати електричне коло – рисунок 4.3. Елементи R_2, L – відповідно змінний опір і змінна індуктивність з блоку змінних пасивних елементів стенду. Значення останніх взяти з таблиці 4.2 відповідно до свого варіанта. Опір R_1 для всіх варіантів – це опір $R01$ з елементів набірної плати.

Під'єднати осцилограф паралельно індуктивності L й отримати стале зображення кривої $u_L(t)$. Зарисувати криву (дві частини: при відключенні та підключенні до джерела постійної напруги) з екрану осцилографа. Масштаби зображення за осями Y та X повинні бути підібрані так, щоб крива займала не менш 0,75 площини екрану. Записати масштаби за напругою та часом.

Зменшити, а потім збільшити індуктивність приблизно в 2 рази, знову зняти осцилограму кривої $u_L(t)$, тобто при відключенні та підключенні до джерела постійної напруги.

Встановити вихідне значення індуктивності та під'єднати осцилограф паралельно опорі R_2 . Зарисувати криву струму $i(t) = \frac{u_{R_2}(t)}{R_2}$ під час перехідного процесу (2 частини: при відключенні та підключенні до джерела постійної напруги). Записати масштаби за напругою і часом.

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

Таблиця 4.2 – Вихідні дані експерименту 2

№ варіанта	L , мГн	R_2 , Ом	№ варіанту	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

4.5.3 Дослідження перехідних процесів у коливальному $R-L-C$ колі при відмиканні його від джерела постійної напруги та при підключенні до останнього (експеримент 3)

Зібрати електричне коло – рисунок 4.5. Значення елементів взяти з таблиці 4.3. Елементи L, C – індуктивність і ємність з елементів набірного поля (в таблиці 4.3 вказані їх номери). Опір R_2 – змінний опір з блоку змінних пасивних елементів стенду УИЛС-1. Опір R_1 для усіх варіантів – це опір $R01$ з елементів набірного поля. Значення $EPC E$ взяти з таблиці 4.1.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані експерименту 3

№ варіанту	$L, \text{№}$	$R_2, \text{Ом}$	$C, \text{№}$	№ варіанту	$L, \text{№}$	$R_2, \text{Ом}$	$C, \text{№}$
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 опору R_2 , паралельно ємності C , паралельно індуктивності L й зарисувати криві $u_{R_2}(t), u_C(t), u_L(t)$ з екрану осцилографа на кальку (2 частини: при відключенні та підключенні до джерела постійної напруги). Переконайтеся, що криві відповідають саме аперіодичному режиму. Масштаби зображення по осях Y та X повинні бути підібрані так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрану. Записати масштаби за напругою і часом.

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 та в Додатку А цих методичних вказівок. Встановити значення змінного опору R_2 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. Переконайтеся, що таким чином буде отриманий коливальний режим.

Під'єднати осцилограф паралельно опору R_2 , паралельно ємності C , паралельно індуктивності L й зарисувати криві $u_{R_2}(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$ з екрану осцилографа на кальку (2 частини: при відключенні та підключенні до джерела постійної напруги) Записати масштаби за напругою і часом.

4.6 Обробка експериментальних даних

4.6.1 За даними експерименту 4.5.1 розрахувати класичним методом закони $u_C(t)$, $i(t)$, $u_L(t)$ під час перехідного процесу (див. пункт 4.4, задача 1 «Дослідження перехідних процесів у $R-C$ колі при відключенні й підключенні до джерела постійної напруги»), а також значення постійної часу. Зробити висновок, як змінюється постійна часу при зміні параметрів C та R_2 . Визначити також постійну часу графічно, переконатись, що результати розрахунків і експериментів однакові.

4.6.2 За даними експерименту 4.5.2 розрахувати класичним методом закони $i(t)$, $u_L(t)$ під час перехідного процесу (див. пункту 4.4, задача 2 «Дослідження перехідних процесів у $R-L$ колі при відключенні й підключенні до джерела постійної напруги»), а також значення постійної часу. Зробити висновок, як змінюється постійна часу при зміні L та R_2 . Визначити також постійну часу графічно, переконатись, що результати розрахунків і експериментів однакові.

4.6.3 За даними експерименту 4.5.3 розрахувати класичним методом закони $u_{R_2}(t)$, $u_C(t)$, $u_L(t)$, $i(t)$ під час перехідного процесу в $R-L-C$ колі при відмиканні його від джерела постійної напруги та при підключенні до останнього (див. пункт 4.4, задача 3) в двох режимах роботи кола: аперіодичному і коливальному. Розрахунок $R-L-C$ кола при підключенні його до джерела постійної напруги зробити самостійно за методикою задачі № 3 в загальних відомостях цих методичних вказівок.

Примітка. Кальки треба розміщувати поряд з відповідним розрахунком (експериментом). Приклад оформлення кальки в звіті наведено на рисунку 4.6.

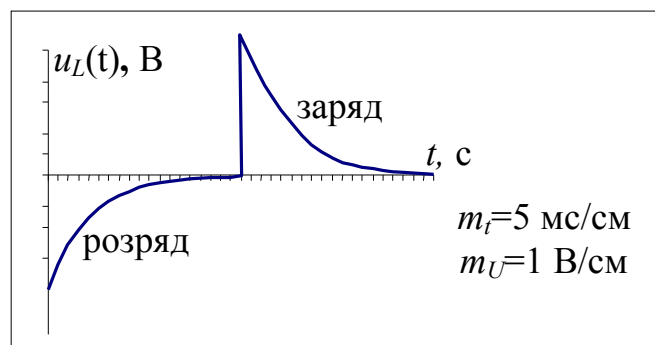


Рисунок 4.6 – Напруга на L під час перехідного процесу

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 в 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.

4.8 Контрольні питання

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

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження нелінійних електричних кіл постійного струму

5.1 Мета роботи:

- експериментальна перевірка графоаналітичного методу розрахунку;
- нелінійних кіл постійного струму.

5.2 Обладнання і прилади:

- універсальний навчально-дослідницький лабораторний стенд УИЛС-1 (блок постійної напруги);
- елементи набірної плати стенду;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр.

5.3 Підготовчий етап лабораторної роботи містить вивчення теоретичного матеріалу [1 – с. 404-416, 2 – с. 386-429]

Результатом підготовчого етапу є:

- вивчення теоретичного матеріалу, що пов'язаний «Нелінійні кола. Загальна характеристика нелінійних кіл та методів їх розрахунку. Нелінійні кола постійного струму»;
- набуття навичок з проведення розрахунку нелінійних кіл постійного струму.

5.4 Загальні відомості

Лінійні електричні кола містять лише лінійні елементи, для яких залежність між напругами, струмами, зарядами, магнітними потоками (потокозчепленнями) виражають лінійними функціями виду

$$u = R \cdot i, \quad \psi = L \cdot i, \quad q = C \cdot u. \quad (5.1)$$

Нелінійні електричні кола містять хоча б один нелінійний елемент (НЕ), який не може бути описаний за допомогою постійних коефіцієнтів. У цьому випадку залежності (5.1) мають вигляд:

$$u = f\left(i, \frac{di}{dt}\right), \quad \psi = f\left(i, \frac{di}{dt}\right), \quad q = f\left(u, \frac{du}{dt}\right), \quad (5.2)$$

тобто в загальному випадку спостерігається залежність не тільки від змінної, але й від швидкості її зміни. Якщо ж ми розглядаємо кола постійного струму, то залежності (5.2) – це нелінійні вольт-амперна характеристика (ВАХ) $u = f(i)$, вебер-амперна характеристика $\psi = f(i)$ і кулон-вольтна характеристика $q = f(u)$.

Нелінійні елементи поділяють на нелінійні опори, нелінійну індуктивність і ємності. При постійних струмах у якості нелінійних елементів можуть розглядатися лише нелінійні резистивні елементи.

Розрахунок нелінійних кіл постійного струму проводять графоаналітичним методом, для чого ВАХ елементів повинні бути заданими у вигляді графіків або аналітичними виразами. Полягає розрахунок в побудові результуючих ВАХ.

З методів, які розглядалися раніше, для розрахунку нелінійних кіл постійного струму застосовують:

- метод двох вузлів;
- заміну декількох паралельно з'єднаних віток однією еквівалентною;
- метод еквівалентного генератора.

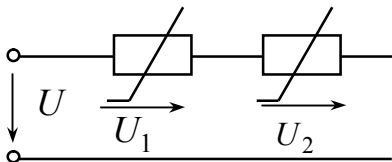


Рисунок 5.1

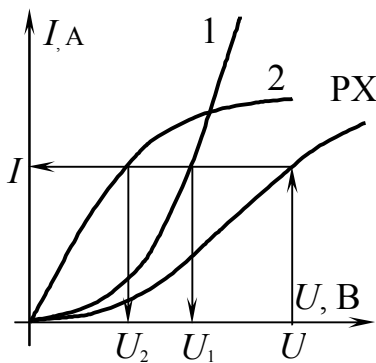


Рисунок 5.2

При послідовному з'єднанні розрахунок (схема на рис. 5.1) базується на другому законі Кірхгофа: $U = U_1 + U_2$. Один з параметрів, а саме напруга на вході кола U або струм I , повинен бути заданим для визначення струму I (або напруги U), а також напруг на елементах U_1 і U_2 . Оскільки з'єднання послідовне, то загальним параметром є струм. Довільно задаємося різними значеннями струму і додаємо напруги на нелінійних елементах при кожному конкретному значенні струму, тобто будуємо результуючу ВАХ (PX) – рисунок 5.2.

Розглянемо окремий випадок, коли послідовно з'єднані активний опір і нелінійний елемент. Тоді немає необхідності будувати результуючу характеристику: $I = f(U_{H\hat{A}} + I \cdot R)$. У цьому випадку розглядають рівняння $E = I \cdot R + U_{H\hat{A}}$ в режимі неробочого ходу ($I = 0, U_{H\hat{A}} = E$) і в режимі короткого замикання

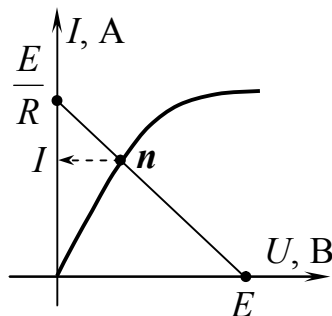


Рисунок 5.3

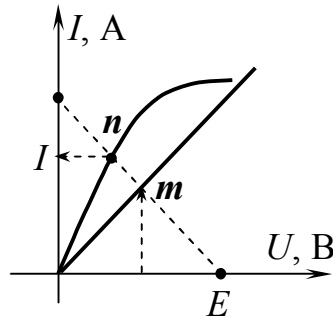


Рисунок 5.4

замикання ($U_{H\hat{A}} = 0, I = \frac{E}{R}$). Потім будують пряму, що сполучає точки с координатами $(E, 0)$, $(0, \frac{E}{R})$ і перетинає ВАХ нелінійного елемента – рисунок 5.3 (n – шукана точка, що визначає I).

Також в цьому випадку можна застосувати і наступний спосіб (рис. 5.4):

- побудувати ВАХ лінійного елемента за двома точками;
- відкласти значення ЕРС E ;
- з точки з координатами $(E, 0)$ побудувати перпендикуляр до його

перетину з ВАХ лінійного елемента (точка m);

- провести допоміжну пряму через точки E і m , яка перетне ВАХ нелінійного елемента (n – шукана точка, що визначає значення струму I).

При паралельному з'єднанні елементів (рис. 5.5) загальним параметром є напруга. Тому результуючу ВАХ будують за першим законом Кірхгофа: $I = I_1 + I_2$ (рис. 5.6).

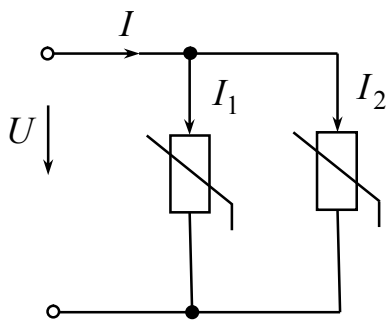


Рисунок 5.5

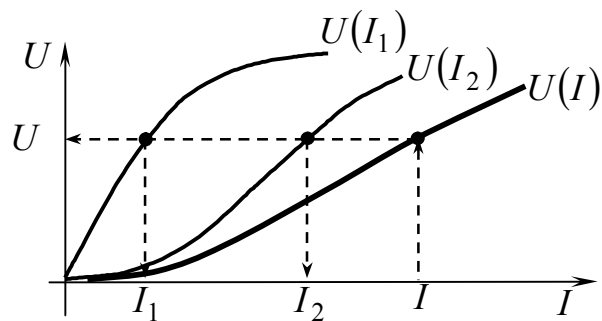


Рисунок 5.6

Якщо була задана напруга U , а струми в паралельних вітках невідомі, то за напругою на вході кола U визначають струми I_1, I_2 нелінійних елементів за їх ВАХ, а потім за першим законом Кірхгофа – загальний струм $I = I_1 + I_2$. Якщо був заданий струм I , то необхідно будувати результуючу характеристику $U = f(I_1 + I_2) = f(I)$.

Розрахунок змішаного з'єднання нелінійних елементів містить етапи розрахунку кіл з паралельним і послідовним з'єднанням елементів. Для схеми рисунку 5.7 після заміни двох паралельно з'єднаних нелінійних елементів «2» і «3» одним еквівалентним нелінійним опором «2-3» одержуємо послідовне з'єднання елементів «1» і «2-3» – схема на рисунку 5.8. При цьому повинна бути побудована результуюча ВАХ умовного нелінійного елемента «2-3».

Подальший розрахунок схеми на рисунку 5.8, якщо задана напруга U , проводимо так:

- будуємо результуючу ВАХ послідовно з'єднаних елементів «1» і «2-3»;
- визначаємо струм I_1 , а також напруги на першому нелінійному елементі U_1 і на паралельних вітках U_{23} ;
- за напругою U_{23} і заданими вольт-амперними характеристиками еле

ментів «2» і «3» визначаємо струми в паралельних вітках I_2 і I_3 .

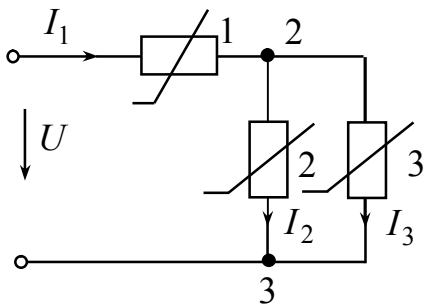


Рисунок 5.7

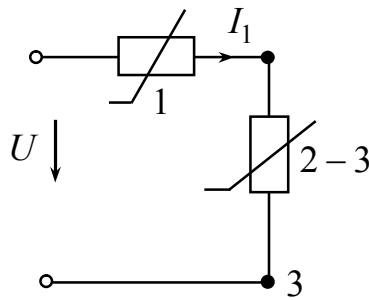


Рисунок 5.8

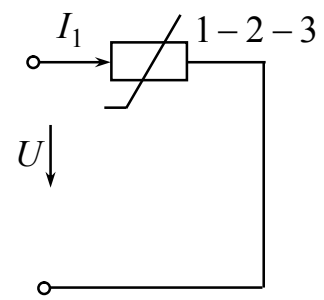


Рисунок 5.9

5.5 Порядок виконання роботи

Схеми треба складати таким чином, щоб мати змогу провести виміри (де це потрібно). Робота не потребує попередніх розрахунків. Для виконання роботи кожний студент повинен мати міліметровий папір (3 листа розміром А4).

5.5.1 Зняття та побудування вольт-амперних характеристик (ВАХ) нелінійних елементів (лампа розжарювання та діод) та лінійного елементу R_L .

Зібрати електричне коло (рис. 5.10). У якості джерела E використати регульоване джерело постійної напруги. Нелінійні елементи, що видаються викладачем, та лінійний опір R_L ставлять на місце R_H . Опори R_L та R_L для всіх варіантів – це лінійні опори $R02$ та $R03$ з елементів набірної поля.

Таблиця 5.1 – Дані для побудови ВАХ

$I, \text{ mA}$	$U, \text{ B}$		
	Діод VD	лампа розжарювання	лінійний опір $R03$
0			√
10			-
20			-
30			-
40			-
50			-
60			-
70			√
80			-
90			-
100			-

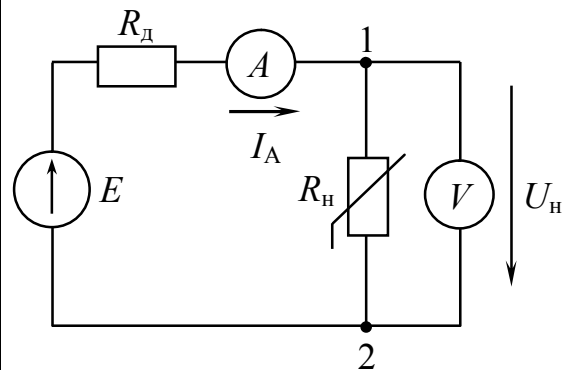


Рисунок 5.1 –
Електричне коло для зняття ВАХ

Плавно змінюючи значення напруги джерела ЕРС E , встановлювати струм у колі з кроком 10 мА в діапазоні від 0 до 100 мА і вимірювати при кожному значенні струму напругу на елементі. Результати розрахунків та експериментів занести до таблиці 5.1.

5.5.2 Дослідження послідовного з'єднання нелінійного елемента (лампи розжарювання – R_1 на схемі) і лінійного елемента (R_03 – R_2 на схемі)

Зібрати електричне коло (рис. 5.2). Встановити вхідну напругу $U_{вх}$ за вказівкою викладача в діапазоні 4-10 В. Виміряти значення струму та напруг на елементах. Результати експерименту занести до таблиці 5.2.

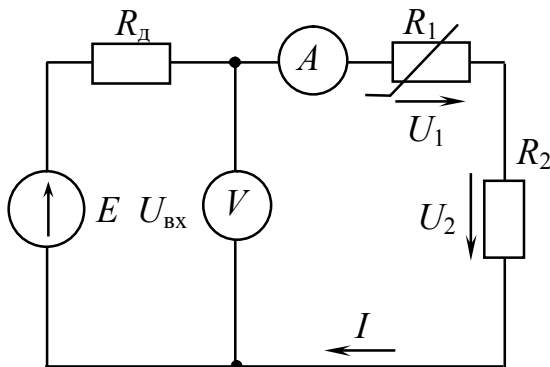


Рисунок 5.11 – Послідовне з'єднання нелінійних елементів

Таблиця 5.2 – Результати експерименту та розрахунку (п.5.5.2)

Визначено	$U_{вх}, В$	$I, мА$	$U_1, В$	$U_2, В$
експериментом				
розрахунком				

5.5.3 Дослідження паралельного з'єднання нелінійного елемента (лампи розжарювання – R_1 на схемі) і лінійного елемента R_03 (R_2 на схемі)

Зібрати електричне коло (рис. 5.3). Встановити вхідний струм I за вказівкою викладача в діапазоні 50÷90 мА. Виміряти значення струмів I_1, I_2 та напругу на елементах $U_{вх}$. Результати експерименту занести до таблиці 5.3

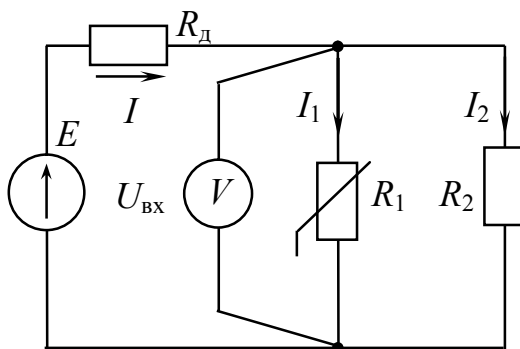


Рисунок 5.3 – Паралельне з'єднання нелінійних елементів

Таблиця 5.3 – Результати експерименту та розрахунку (п.5.5.3)

Визначено	$I, мА$	$U_{вх}, В$	$I_1, мА$	$I_2, мА$
експериментом				
розрахунком				

5.5.4 Дослідження змішаного з'єднання нелінійних елементів (лампи розжарювання та діоду) і лінійного елемента R_03

Зібрати електричне коло (рис. 5.4). У якості нелінійних елементів R_1, R_2

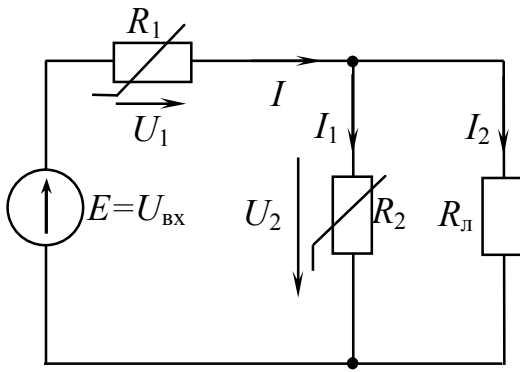


Рисунок 5.4 – Змішане з’єднання нелінійних елементів

взяти відповідно діод і лампу розжарювання. Встановити вхідну напругу $U_{\text{вх}}$ за вказівкою викладача в діапазоні 5-8 В. Виміряти значення струмів I , I_1 , I_2 і напругу на елементах U_1 (напруга на діоді), U_2 (напруга на паралельних вітках). Результати експерименту занести до таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Результати експерименту та розрахунку (п.5.5.4)

Визначено	$U_{\text{вх}}$, В	U_1 , В	U_2 , В	I , мА	I_1 , мА	I_2 , мА
експериментом						
розрахунком						

5.6 Обробка експериментальних даних

5.6.1 За даними експерименту 5.5.1 на міліметровому папері побудувати ВАХ усіх елементів (лампи розжарювання, діоду та лінійного елемента $R03$) у одній системі координат. Рекомендується вибирати такі масштаби: за напругою: $m_U=2$ В/см (ось абсцис), за струмом – $m_I=20$ мА/см (ось ординат).

5.6.2 Зробити графоаналітичним методом розрахунок послідовного з’єднання нелінійного і лінійного елементів (визначити значення струму та напруг на елементах). Для цього на другому графіку побудувати ВАХ лампи розжарювання та лінійного елемента $R03$ і скласти ці ВАХ, як це потрібно для послідовного з’єднання. Порівняти отримані результати з даними експерименту 5.5.2 і занести їх до таблиці 5.2.

5.6.3 Зробити графоаналітичним методом розрахунок паралельного з’єднання нелінійного і лінійного елементів (визначити значення струмів I_1 , I_2 і напруги $U_{\text{вх}}$ на паралельних вітках). Для цього на третьому графіку побудувати ВАХ лампи розжарювання і лінійного елемента $R03$ та скласти ці ВАХ як потрібно для паралельного з’єднання. Порівняти отримані результати з даними експерименту 5.5.3 і занести їх до таблиці 5.3.

5.6.4 Зробити графоаналітичним методом розрахунок змішаного з’єднання нелінійних та лінійного елементів (визначити значення струмів I , I_1 , I_2 та напруг U_1 , U_2). Для цього на першому графіку скласти ВАХ лампи розжарювання і лінійного елемента $R03$ як потрібно для паралельного з’єднання, а потім отриману результуючу характеристику паралельного з’єднання скласти с

характеристикою діода як потрібно для послідовного з'єднання. Порівняти отримані результати з даними експерименту 5.5.4 та занести їх до таблиці 5.4.

5.7 Контрольні питання

1. Дайте визначення та наведіть основні властивості нелінійних електричних кіл постійного струму.
2. Які особливості характеризують розрахунок нелінійних кіл у порівнянні з лінійними?
3. Поясніть, як проводять розрахунок нелінійних кіл при послідовному з'єднанні нелінійних елементів.
4. Поясніть, як проводять розрахунок нелінійних кіл при паралельному з'єднанні нелінійних елементів.
5. Поясніть, як проводять розрахунок нелінійних кіл при і змішаному з'єднанні елементів.
6. Дайте визначення статичного та диференційного опорів нелінійних елементів.
7. Поясніть, як проводять заміну нелінійного елемента лінійним опором та *ЕРС*.
8. Наведіть приклади практичного застосування нелінійних елементів постійного струму.

ДОДАТКИ

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	1000	—	—			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	

Основні електричні величини і їх позначення

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

Найменування фізичної величини	Позначення		Найменування фізичної величини	Позначення	
	величина	одиниця		величина	одиниця
Ємність	C	Ф	Частота: • коливань; • кутова	f ω	Гц рад/с
Заряд	q	Кл	Струм	I, i	А
Індукція	B	Тл	Потенціал	V, φ	В Во
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	—
Постійна часу	τ	с	Енергія електромагнітна	W	Дж

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2002. – 640 с.
2. Зевеке Г. В. Основы теории цепей : учеб. для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, Н. Н. Нетушил, П. И. Страхов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
3. Рибалко М. П. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола : підручник / М. П. Рибалко, В. О. Есауленко, В. І. Костенко. – Донецьк : Новий світ, 2003. – 513 с.
4. Воробкевіч А. Ю. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки : навч. посібник. / А. Ю. Воробкевіч, О. І. Шегедін. – Київ : Магнолія плюс, 2004. – ч. 1. – 224 с.
5. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола : підручник / В. С. Перхач – Київ : Вища школа, 1992. – 439 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»

(для студентів усіх форм навчання напрямів
6.050701 – Електротехніка та електротехнології,
6.050702 – Електромеханіка
та студентів за спеціальністю 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка)

Укладачі: **ФОРКУН** Яна Борисівна,
ГЛІБОВА Марина Леонідівна,
САБАЛАСВА Наталія Олегівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 248 М

Підп. до друку 20. 04. 2016	Формат 60x84/16
Друк на ризографі	Ум. друк. арк. 3,5
Зам. №	Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.