

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА



Я.Б. Форкун, В. П. Самошкін, Г. В. Капустін

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт за темами  
„Трифазні кола, несинусоїдні кола, перехідні процеси, нелінійні кола”  
з дисципліни „Теоретичні основи електротехніки”  
(для студентів усіх форм навчання напрямів  
6.050701 - "Електротехніка та електротехнології "  
і 6.050702 - "Електромеханіка")

Харків  
ХНАМГ  
2010

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт за темами «Трифазні кола, несинусоїдні кола, перехідні процеси, нелінійні кола» з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» (для студентів усіх форм навчання напрямів 6.050701 - «Електротехніка та електротехнології» і 6.050702 - «Електромеханіка») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: Форкун Я.Б., Самошкін В.П., Капустін Г.В. – Х.: ХНАМГ, 2010. – 56 с.

Укладачі: доц., к.т.н. Я.Б. Форкун,  
доц., к.т.н. В. П. Самошкін,  
доц., к.т.н. Г.В. Капустін

Рецензент: проф., д.т.н. А.Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,  
протокол № 10 від 11.05.2010 р.

## Вступ

Електротехнікою називається 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.

**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, диференціальні рівняння, функціональні ряди, інтегральні перетворення Лапласа, векторна алгебра.

Теоретичні положення курсу засвоюються ґрунтовно тільки тоді, коли вони використані 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, тому вона повинна включати в себе всі необхідні розрахунки, але 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 вище вказаних спеціальностей стосовно часів, що відведені для цього типу занять.

Усі лабораторні роботи студенти виконують на універсальних навчально-дослідницьких лабораторних стендах УДЛС-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 набір-ного поля стенду, порядкові номери і зразкові параметри яких наведені в табл.1.

## ПРАВИЛА БЕЗПЕКИ В ЛАБОРАТОРІЇ ТОЕ

До виконання лабораторних робіт допускаються студенти, які пройшли ін-структаж з техніки безпеки з наступним записом про це в спеціальному журналі. Значення напруг, з якими студент має справу при аналізі кіл на стендах УДЛС-1, не становлять небезпеки для життя людини. Усі джерела живлення забезпечені захистом від перевантажень. Тому збирання, перевірку і включення електричних кіл студенти проводять самостійно. Однак з огляду на те, що все обладнання ла-бораторії, 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.

По закінченні роботи на стенді необхідно виключити живлення всіх актив-них блоків стенда і вимірювальних приладів.

## ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

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 скласти залік за темою роботи.

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

Перед тим як приступити до виконання роботи студент отримує допуск, який свідчить про те, що він підготовлений до занять (вивчив теоретичний мате-ріал, підготував чернетку, зробив необхідні попередні розрахунки). Під час робо-

ти за стендом забороняється голосно розмовляти, ходити по лабораторії, залишати лабораторію без дозволу викладача. Експериментальні дані, занесені в чернетку, наприкінці кожного досліду подають викладачеві. У разі невірних результатів досліди повторюють.

До захисту роботи допускається студент, який виконав і оформив звіт про лабораторну роботу. 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).

### ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ ПРО ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Звіти виконують в учнівських зошитах або на аркушах формату А4.

Текст 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 державних стандартів на міліметровці із застосуванням креслярського знаряддя.

Зразок титульного аркуша зошита, що містить всі звіти лабораторних робіт, наведений нижче. Після захисту останньої роботи студент повинен здати зошит викладачеві.

Звіт про лабораторну роботу повинен містити:

- назву роботи;
- мету роботи;
- перелік приладів, обладнання і елементів;
- назву першого досліду й принципову схему досліджуваного кола;
- результати дослідження за першим дослідом (таблиці, графіки, розрахункові формули й обчислення);
- назву другого досліду і т. ін. (див. попередні пункти);
- висновки.

Оформлення кожної роботи повинно починатися з нової сторінки.

Літерні позначення основних електричних величин і їхніх одиниць наведені в табл. 2. Позначення дані в російському алфавіті.

ЗРАЗОК ТИТУЛЬНОГО АРКУША:

---

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА  
КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧНОЇ ТА ЗАГАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

ЗВІТИ  
ПРО ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ  
З ДИСЦИПЛІНИ "ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ"

Виконала  
студентка групи ЕТРВ 2008-1  
2 курсу

Костромицька Я.О.

Перевірила  
доц. кафедри

Форкун Я.Б.

ХАРКІВ - ХНАМГ – 2010

---

Таблиця 1 - Порядкові номери і зразкові параметри 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	

Таблиця 2 - Літерні позначення основних електричних величин і їхніх одиниць

Найменування фізичної величини	Позначення		Найменування фізичної величини	Позначення	
	вели- чина	оди- ниця		вели- чина	оди- ниця
Ємність	$C$	Ф	Частота: - коливальна - кутова	$f$ $\omega$	Гц рад/с
Заряд	$Q$	Кл	Струм	$I, i$	А
Індукція	$B$	Тл	Потенціал	$V, \varphi$	В
Індуктивність - власна - взаємна	$L$ $M$	Гн Гн	Потокозчеплення	$\psi$	Вб
Коефіцієнт потужності в синусоїдальному режимі	$\cos\varphi$	—	Проникливість (діелектрична) - вакууму - абсолютна - відносна	$\epsilon_0$ $\epsilon_a$ $\epsilon$	Ф/м Ф/м —
Коефіцієнт трансформації	$n$	—	Проникливість (магнітна) - порожноті - абсолютна - відносна	$\mu_0$ $\mu_a$ $\mu$	Гн/м Гн/м —
Магнітний потік	$\Phi$	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	$\varphi$	рад(°)
Напруженість поля: - електричного - магнітного	$E$ $H$	В/м А/м	Опір - повний - активний - реактивний	$Z$ $R$ $X$	Ом Ом Ом
Початкова фаза	$\psi$	рад(°)	Число фаз багатофазної системи	$m$	—
Період	$T$	с	Число витків	$n$	—
Постійна часу	$\tau$	с	Енергія електромагнітна	$W$	Дж



## 1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### 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 УДІС-1 (блок змінної трифазної напруги);
- елементи набірної плати 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 відрізняються одна від одної на кут  $\frac{2 \cdot \pi}{m}$  ( $m$  - кількість фаз) - це багатофазні симетри-

чні 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 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 (нейтральну точку або, якщо вона заземлена, в нульову) - таке з'єднання називається зіркою.

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

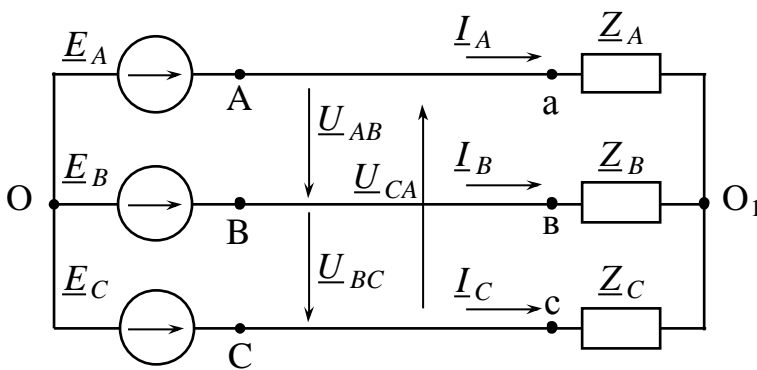


Рис. 1.1 - Трифазне коло „зірка-зірка” за відсутності нульового проводу

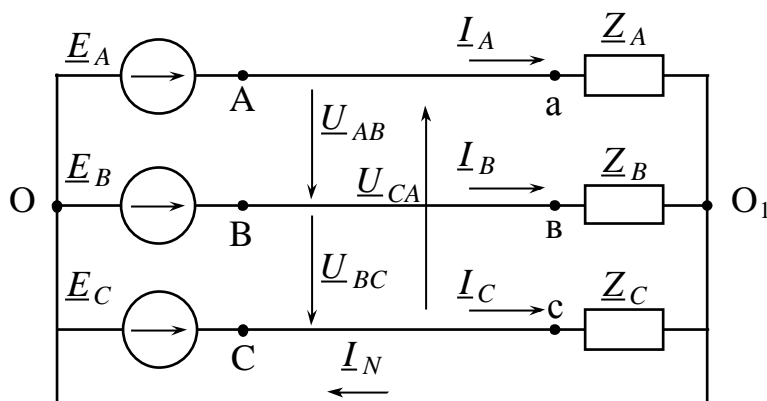


Рис.1.2 - Трифазне коло „зірка-зірка” з нульовим проводом

При з'єднанні „зірка-зірка” обмотки генератора та фазні навантаження з'єднуються зіркою. Таке трифазне коло може бути без нейтрального проводу (трипровідна система, рис.1.1) або з ним (чотирпровідна 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 навантаження, називаються 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



### Несиметричний режим

При несиметричному навантаженні ( $Z_A \neq Z_B \neq Z_C$ ) 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 впливає 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:

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

### Чотирипровідна система

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 табл.3, 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 (див. табл. 4÷8).

Таблиця 3 - Вихідні дані

Номер варіанту	$E_{\Phi}$ , В	$R_{\Phi}$ , №
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 ( $Z_A = Z_B = Z_C = R_{\Phi}$  - активний опір, де  $R_{\Phi}$  - відповідно до табл.3)

1.5.1.1. Зібрати схему рис.1.1 „зірка-зірка” за відсутності нульового проводу відповідно до свого варіанта. Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.4. Результати експериментів занести до табл.4.

1.5.1.2. З'єднати точки О і  $O_1$  проводом (схема „зірка-зірка” з нульовим проводом,  $Y/Y_0$ ) - рис.1.2. Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.4. Результати експериментів занести до табл.4.

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  $R_{\Phi}$ . Тобто  $R_{\Phi} = X_C$ , а величина ємності

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

Розраховану ємність "внести" до схеми (рис.1.2) у фазу «А» з блоку змінної ємності стенду. Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.5. Результати експериментів занести до табл.5.

Таблиця 4 - Результати розрахунків та експериментів кола „зірка-зірка”  
при симетричному навантаженні

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

Таблиця 5 - Результати розрахунків та експериментів для кола „зірка-зірка” з  
нульовим проводом при несиметричному навантаженні

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

1.5.2.2. У схемі, що складена для пункту 1.5.2.1, вимкнути нульовий про-  
від. Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.6. Результати експеримен-  
тів занести до табл.6.

Таблиця 6 - Результати розрахунків та експериментів для кола „зірка-зірка” за  
відсутності нульового проводу при несиметричному навантаженні

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

### 1.5.3. Дослідження аварійних режимів у трифазному колі

#### 1.5.3.1. Обрив лінійного проводу в фазі «А»

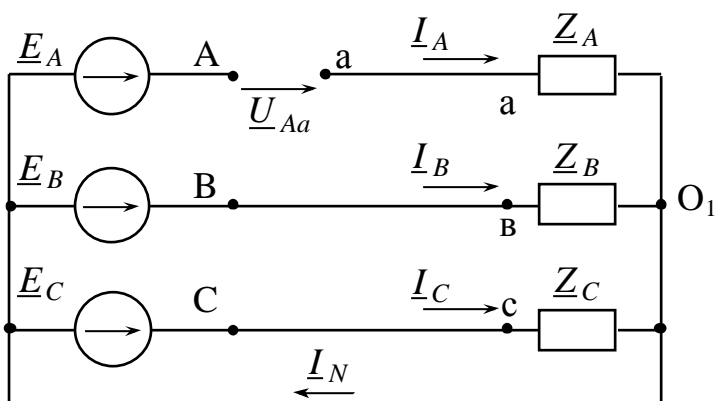


Рис.1.4 – Обрив лінійного проводу в фазі «А»

У схемі, що складена для пункту 1.5.2.1, вимкнути лінійний провід у фазі «А» – рис.1.4 і виміряти всі величини, що вказані у табл.7, частина  $Y/Y_0$ . Результати експериментів занести до табл.7.

Вимкнути нульовий провід у схемі рис.1.4 і виміряти всі величини, що вказані у табл.7, частина  $Y/Y$ . Результати експериментів занести до табл.7.

Таблиця 7 - Результати розрахунків та експериментів для кола „зірка-зірка” за відсутності і з нульовим проводом в режимі обриву лінійного проводу

Спосіб з'єднання навантаження	Визначено	$I_N$ (мА)	$I_A$ (мА)	$I_B$ (мА)	$I_C$ (мА)	$U_{AO}$ — $U_{aO1}$ (В)	$U_{BO}$ — $U_{bO1}$ (В)	$U_{CO}$ — $U_{cO1}$ (В)	$U_{Aa}$ (В)	$U_{AB}$ (В)	$U_{BC}$ (В)	$U_{CA}$ (В)	$U_{ab}$ (В)	$U_{bc}$ (В)	$U_{ca}$ (В)	$U_{O1O}$ (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 (рис.1.5). Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.8. Результати експериментів занести до табл.8.

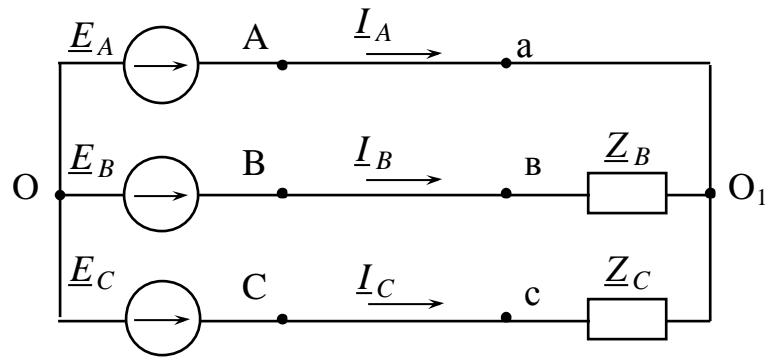


Рис.1.5 – Коротке замикання в фазі «А»

Таблиця 8 - Результати розрахунків та експериментів для кола „зірка-зірка” при короткому замиканні у фазі «А»

Спосіб з'єднання навантажен- ня	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)	(В)	(В)	(В)	(В)	(мА)	(мА)	(мА)	(В)
Y / Y	розрахунком										
	експериментом										

#### 1.6. Обробка експериментальних даних

**Примітка:** для розрахунків треба використовувати експериментальні дані значень  $E_\Phi$  та  $R_\Phi$ .

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 табл.4.

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 табл.4. 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 табл.5.

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. Результа-



ти розрахунків занести до табл.6.

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 до табл.7.

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 табл.7.

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 табл.8.

### 1.7. Висновки

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

### 1.8. Контрольні запитання

1. Які системи називають багатофазними? Чому трифазні системи отримали найбільше розповсюдження? Що таке порядок чергування фаз?
2. Яке навантаження називається симетричним та несиметричним?
3. Які переваги з'єднання зіркою? Яка точка кола називається нульовою, а яка нейтральною?
4. Дайте визначення лінійних і фазних струмів і напруг.
5. Які існують співвідношення між лінійними й фазними струмами і напругами в колах „зірка-зірка”?
6. Чи може струм в нульовому проводі дорівнювати нулю при несиметричному навантаженні фаз?
7. Чому не застосовується трифазна трипровідна система при несиметричному навантаженні? Що таке „викривлення фаз”?
8. 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. Яким чином проводять баланс потужностей в трифазних колах?

## 2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### 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 УДЛС-1 (блок змінної трифазної напруги);
- елементи набірної частини 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 будувати векторні діаграми 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, вна-

слідок чого вона знаходиться під лінійною напругою. Лінійна напруга одночасно є і фазною напругою, тобто:  $\underline{U}_л = \underline{U}_ф$ . (2.1)

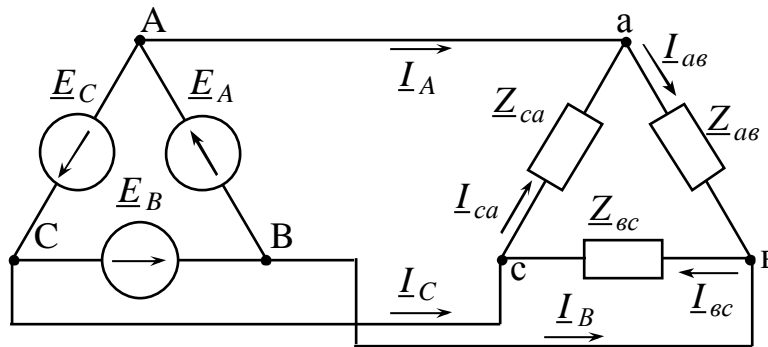


Рис. 2.1 - Трифазне коло „трикутник-трикутник”

У роботі досліджується схема „зірка-трикутник”, коли обмотки генератора з’єднані зіркою, а навантаження - трикутником (рис.2.2). За позитивний напрямок лінійних струмів ( $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ ) приймається напрямок від джерела до навантаження. Позитивний напрямок 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  $\underline{I}_{са}$ ).

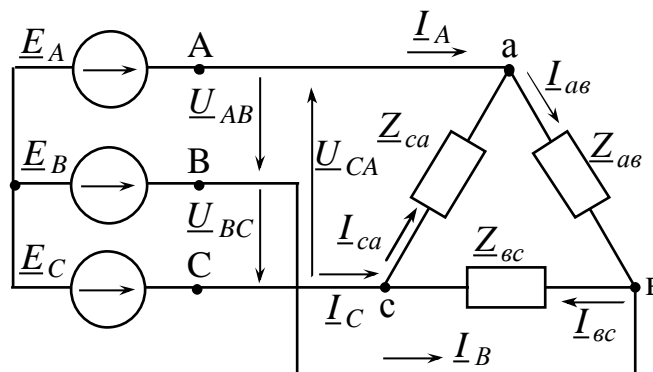


Рис. 2.2– Трифазне коло „зірка-трикутник”

Комплекси фазних струмів для схеми рис.2.2 без урахування опорів провідів 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  $X_{\phi}$ ,  $R_{\phi}$  – 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  $30^\circ$  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 рис.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  $\underline{I}_{ab}$ ,  $\underline{I}_{bc}$ , 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  $\underline{U}_{AO}$ ,  $\underline{U}_{BO}$ ,  $\underline{U}_{CO}$ .

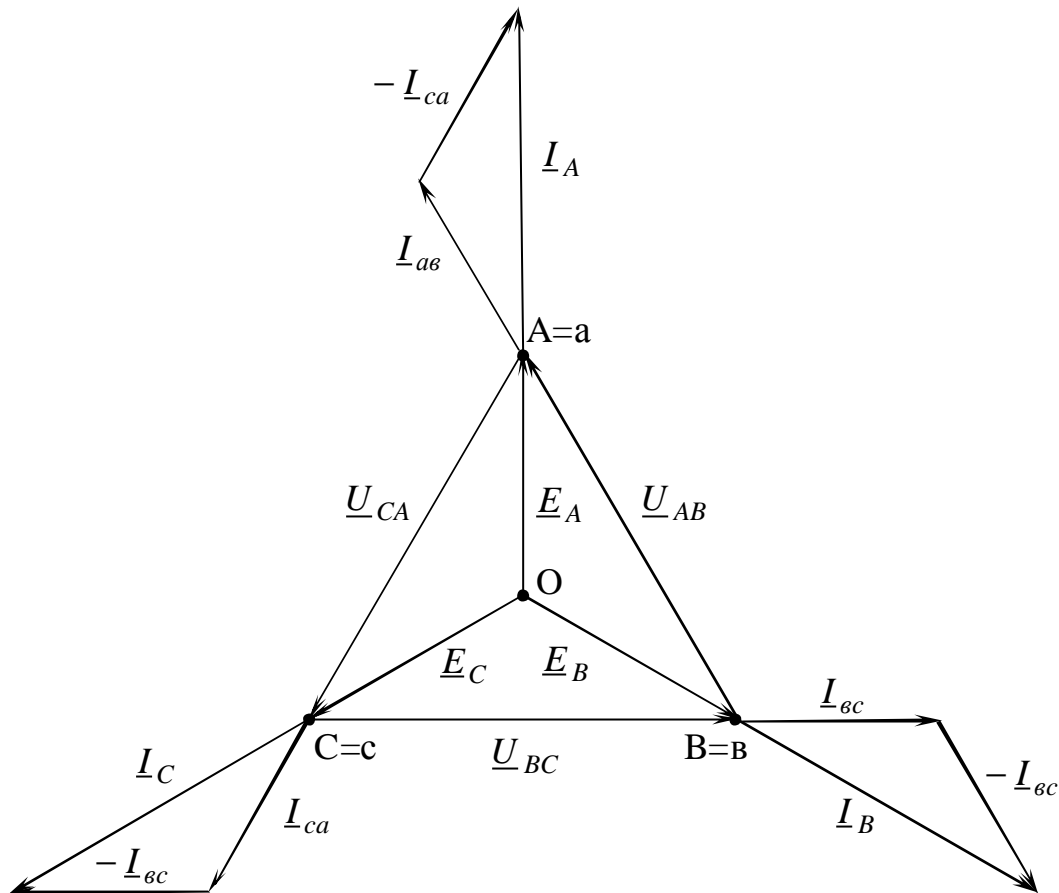


Рис. 2.3 - Векторна діаграма струмів і напруг при з'єднанні симетричного навантаження ( $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = R_{\phi}$ ) трикутником

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.

#### Аварійні режими роботи трифазного кола „зірка-трикутник”

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 номінальною лінійною напругою

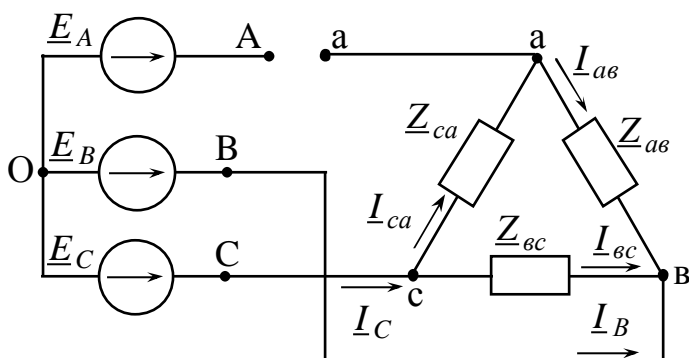


Рис.2.4 – обрив лінійного проводу у фазі «А»

номінальною лінійною напругою  $\underline{U}_{BC}$ , тому струм  $I_{bc}$  у цій фазі не зміниться. Опори фаз  $Z_{ab}$  і  $Z_{ca}$  виявляться послідовно з'єднаними й підімкненими до напруги „-  $\underline{U}_{BC}$ ”. Якщо  $Z_{ab} = Z_{ca}$ , то напруга „-  $\underline{U}_{BC}$ ” розподіляється між ними порівну і кожен з опорів опиниться під напругою „-  $0.5 \cdot \underline{U}_{BC}$ ”.

Якщо  $Z_{ab} \neq Z_{ca}$ , то напруга „-  $\underline{U}_{BC}$ ” розподілиться прямо пропорційно величинам цих опорів, при цьому у фазах „ав” і „са” протікатиме один і той же струм:

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

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

При обриві одного з фазних проводів, наприклад, у фазі „bc” (рис.2.5), фазний струм  $I_{bc} = 0$ , струми  $I_{ca}$  та  $I_{ab}$  залишаються без змін. Тому лінійний струм  $I_A = I_{ab} - I_{ca}$  зберігає своє значення, а лінійні струми  $I_B$  та  $I_C$  змінюються:

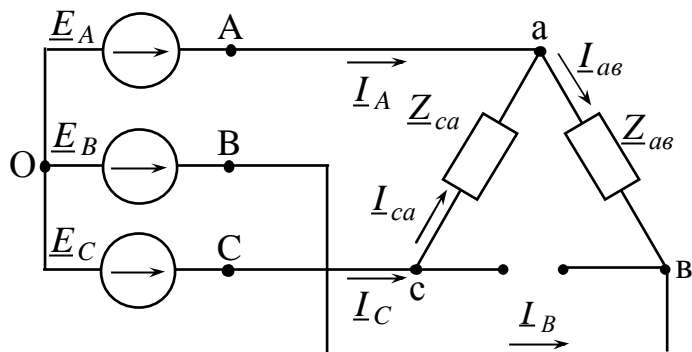


Рис.2.5 – Обрив фазного проводу у фазі «bc»

Таким чином, зміна навантаження в одній з фаз зумовлює одночасну зміну двох лінійних струмів і не впливає на величину третього лінійного струму, на величини фазних напруг та струмів двох інших фаз.

## Розрахунок трифазного кола „зірка-трикутник” з урахуванням опорів проводів, що підводять

Розглянемо загальний випадок такого кола, 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:

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

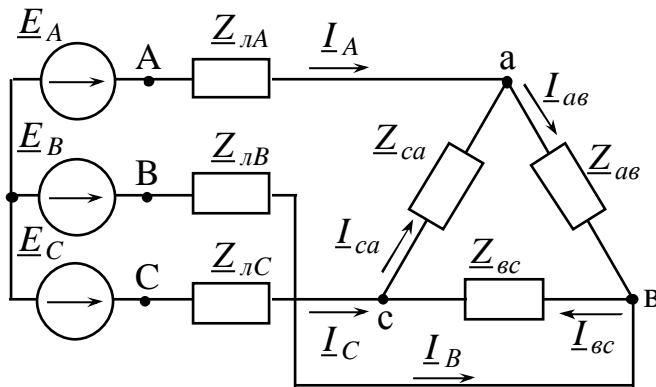


Рис. 2.6 - Схема „зірка-трикутник” з опорами в лінійних проводах

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

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \frac{\underline{Z}_\phi}{3}. \quad (2.10)$$

У результаті перетворення одержуємо еквівалентну схему, зображену на рис.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'єднувальних проводів ввімкнені послідовно з опорами відповідних променів зірки):

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_a + \underline{Z}_{LA}, \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{Z}_B = \underline{Z}_b + \underline{Z}_{LB}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}; \quad (2.11)$$

$$\underline{Z}_C = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{LC}, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C};$$

- 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:

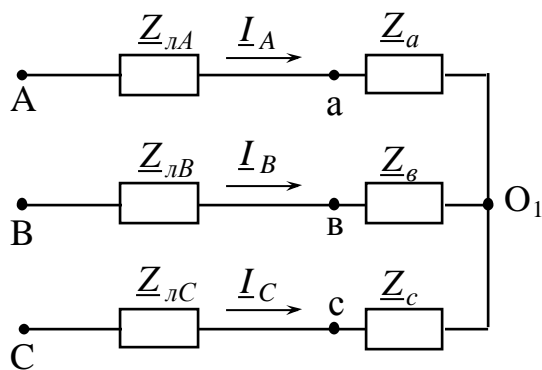


Рис. 2.7 - Еквівалентна схема

$$I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}, \quad (2.14)$$

де  $U_{ab}; U_{bc}; U_{ca}$  - лінійні напруги на навантаженні:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_{aO_1} - U_{bO_1} = I_A \cdot Z_a - I_B \cdot Z_b; \\ U_{bc} &= U_{bO_1} - U_{cO_1} = I_B \cdot Z_b - I_C \cdot Z_c; \\ U_{ca} &= U_{cO_1} - U_{aO_1} = I_C \cdot Z_c - I_A \cdot Z_a. \end{aligned} \quad (2.15)$$

## 2.5. Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, що наведені у табл. 9, 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 (див. табл. 10).

2.5.1. Дослідження трифазного кола „зірка-трикутник” при симетричному навантаженні ( $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = R_\phi$ )

Зібрати схему відповідно до свого варіанта (рис.2.2). Фазні навантаження  $Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca}$  - активні опори  $R_\phi$ , що вибирають відповідно до свого варіанта з табл.9. Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.10 (пункт 1). Результати експериментів занести до табл.10.

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 табл.10 (пункт 2). Результати експериментів занести до табл.10.

2.5.2.2. У схемі, що складена для пункту 2.5.1, вимкнути навантаження у фазі «вс» (рис.2.5). Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.10 (пункт 3). Результати експериментів занести до табл.10.

2.5.3. Замінити активне навантаження у фазі «вс» ємнісним опором  $X_C$ , що рівняється  $R_\phi$ . Тобто  $R_\phi = X_C$ , а величина ємності  $C = \frac{10^6}{R_\phi \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$  мкФ. (2.16)

Розраховану ємність „внести” до схеми (рис.2.2) у фазу «вс» з блоку змінної ємності замість активного опору  $R_\phi$ . Провести виміри всіх величин, що вказані у табл.10 (пункт 4). Результати експериментів занести до табл.10.

Таблиця 9 - Вихідні дані

Номер варіанту	$E_{\Phi}$ , В	$R_{\Phi}$ , №	$R_{\text{л}}$ , №
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 10 - Результати розрахунків та експериментів

№	Вид схеми	Визначено	$I_{\text{ав}}$	$I_{\text{вс}}$	$I_{\text{са}}$	$I_{\text{А}}$	$I_{\text{В}}$	$I_{\text{С}}$	$U_{\text{ав}}$	$U_{\text{вс}}$	$U_{\text{са}}$
			(мА)	(мА)	(мА)	(мА)	(мА)	(мА)	$U_{\text{AB}}$ (В)	$U_{\text{BC}}$ (В)	$U_{\text{CA}}$ (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  $\underline{Z}_{\text{ав}} = \underline{Z}_{\text{вс}} = \underline{Z}_{\text{са}} = R_{\Phi}$ ) та з активними опорами в лінійних проводах  $R_{\text{л}}$



Зібрати схему (рис.2.6). Фазні навантаження  $Z_{ав}; Z_{вс}$  - активні опори  $R_{\phi}$ , навантаження  $Z_{вс}$  - ємнісний опір відповідно до пункту 2.5.3, навантаження в лінійних проводах - активні опори  $R_{л}$  відповідно до табл.9. Провести виміри. Результати експериментів занести до табл.10 (пункт 5).

## 2.6. Обробка експериментальних даних

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

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 табл.10 (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 табл.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 табл.10 (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 табл.10 (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 табл.10 (пункт 5).

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

- в обраному масштабі за напругою ( $m_U, \frac{\hat{A}}{\text{мм}}$ ) 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 рис.2.3);
- знаходять положення точок «а», «в», «с» таким чином:  
 $\varphi_0 = 0; \varphi_a = \varphi_0 + \underline{E}_A - \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_L; \varphi_0 = 0; \varphi_v = \varphi_0 + \underline{E}_B - \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_L;$   
 $\varphi_0 = 0; \varphi_c = \varphi_0 + \underline{E}_C - \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_L;$
- в масштабі за струмом ( $m_I, \frac{A}{\text{мм}}$ ) будують з точок «а», «в», «с» вектори фазних

струмів  $I_{av}$ ,  $I_{vc}$ ,  $I_{ca}$  відповідно; а потім геометрично отримують вектори лінійних струмів  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  за першим законом Кірхгофа, а саме

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; I_B = I_{vc} - I_{av}; I_C = I_{ca} - I_{vc};$$

Для схем рис.2.2 (пункти 2.5.1, 2.5.3) положення точок «а», «в», «с» знаходити не треба, тому що  $A=a$ ,  $B=v$ ,  $C=c$  (див. діаграму рис.2.3).

Для схем рис.2.4, 2.5 (пункт 2.5.2) положення точки «а» визначається розрахунком комплексним значенням напруги на розриві  $\underline{U}_{Aa}$  ( $B=v$ ,  $C=c$ ).

## 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. Як поєднати приймачі однофазного струму трикутником?
2. Назвіть основні переваги й недоліки поєднання трикутником.
3. Які існують співвідношення між лінійними й фазними струмами та напругами при з'єднанні трикутником?
4. Назвіть порядок розрахунку симетричних і несиметричних кіл при з'єднанні навантаження трикутником без урахування опорів лінійних проводів.
5. Назвіть порядок розрахунку симетричних і несиметричних кіл при з'єднанні навантаження трикутником з урахуванням опорів ліній проводів.
6. Як відобразиться перегорання одного з лінійних запобіжників на розжарювання трьох однакових груп ламп, з'єднаних трикутником?

### 3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

#### 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 УДЛС-1;
- елементи набірної плати;
- амперметр Щ4300, Щ4313;
- мультиметр;
- осцилограф С1-68.

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 кін 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 таких кін є розкладання функцій напруги і струму в тригонометричні ряди Фур'є:

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

$$\text{де } A^{(0)} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} f(\omega t) d\omega t - \text{нульова гармоніка (чи постійна складова);} \quad (3.2)$$

$$A_m^{(k)'} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \sin(k \cdot \omega t) d\omega t - \text{амплітуда синусоїдної складової гармоніки з номером } k; \quad (3.3)$$

$$A_m^{(k)''} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cdot \cos(k \cdot \omega t) d\omega t - \text{амплітуда косинусоїдної складової гармоніки з номером } k. \quad (3.4)$$

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

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

$$\text{де } A_m^{(k)} = \sqrt{A_m^{(k)'}^2 + A_m^{(k)''^2}}; \varphi^{(k)} = \arctg \frac{A_m^{(k)''}}{A_m^{(k)'}} - \text{амплітуда та початкова фаза } k\text{-ї гармоніки.} \quad (3.6)$$

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 неправильної 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  $2\pi$  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 синусоїдної та косинусоїдної складових  $k$ -ї гармоніки відповідно:

$$A_m^{(k)/} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t) \cdot \Delta \omega t = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} f_p(\omega t) \cdot \sin_p(k\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} =$$

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

$$A_m^{(k)//} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} (f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t) \cdot \Delta \omega t) = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{p=1}^{p=n} \left( f_p(\omega t) \cdot \cos_p(k\omega t) \cdot \frac{2\pi}{n} \right) =$$

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

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. табл.11).

Таблиця 11 – Види симетрії несинусоїдних періодичних кривих

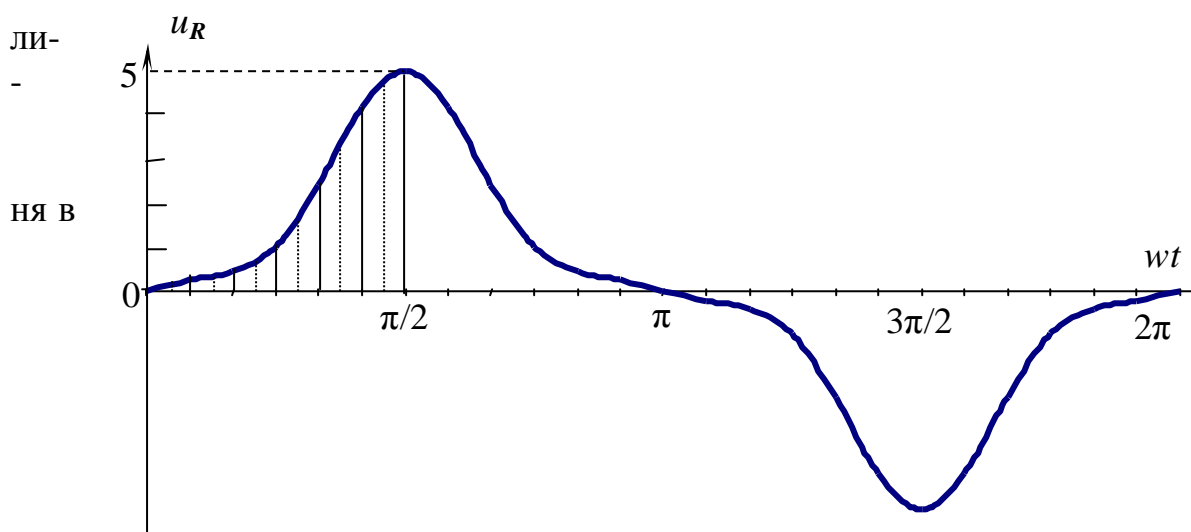
№ п/п	Симетрія відносно	Математична умова	Особливості розкладання (гармоніки, що відсутні)
1.	Осі ординат	$f(\omega t) = f(-\omega t)$	$A_m^{(k)/}$
2.	Початку координат	$f(\omega t) = -f(-\omega t)$	$A^{(0)} = A_m^{(k)//}$
3.	Осі абсцис	$f(\omega t) = -f(\omega t + \pi)$	$A^{(0)} = A_m^{(2k)/} = A_m^{(2k)//}$
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 почат-

ку 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 табл.12 (обмежуємося трьома членами ряду).



Таб-  
ця 12  
Роз-  
кла-  
дан-  
ряд

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

Фур'є функції  $u_R(\omega t)$

p	$u_R(\omega t)$	к=1			к=3			к=5		
		$\omega t$	$\sin \omega t$	$u \cdot \sin \omega t$	$3\omega t$	$\sin 3\omega t$	$u \cdot \sin 3\omega t$	$5\omega t$	$\sin 5\omega t$	$u \cdot \sin 5\omega t$
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

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

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. Для гармоніки з 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. Тому 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 сум окремих гармонік.

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

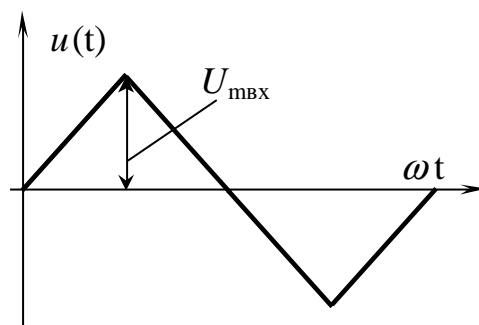


Рис. 3.2

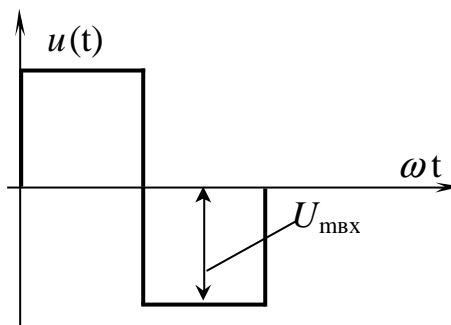


Рис. 3.3

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):

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

Таким чином, миттєве значення напруги на вході кола,

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

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

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

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

- Записуємо комплекси вхідної напруги для окремих гармонік, В -

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

- 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:

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

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

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



- Записуємо миттєве значення струму, А:

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

Розрахунок схеми, що має активно-ємнісний характер (рис.3.7) проводимо 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:

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

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

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

- Миттєве значення струму, А:

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

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

### 3.5. Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, що наведені в табл.13, 14, за номером стенду. Але слід відзначити, що вихідні дані можуть бути відкориговані викладачем з метою отримання більш характерної форми несинусоїдної кривої на екрані осцилографа (*примітка*: для виконання експериментальної частини роботи треба мати кальку).

#### 3.5.1. Знайомство з роботою осцилографа

Ввімкнути осцилограф 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.

3.5.2 Отримання несинусоїдного струму в колі з нелінійним елементом (експеримент 1)

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 УДЛС-1. Встановити

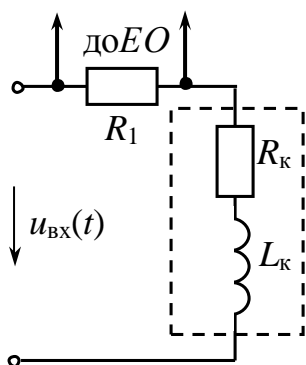


Рис.3.4 – Схема для отримання несинусоїдного струму

величини діючого значення  $U_{\text{вх}}$  та частоти  $f$  синусоїдної напруги відповідно до вихідних даних, що наведені у табл.13, 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.

3.5.2.2. Під'єднати осцилограф до входу кола і виміряти величини  $U_{\text{маг}}$ ,  $f$  (стале зображення кривої та її необхідний розмір отримують за допомогою ручок керування „Усиление Y”, „Длительность развертки”, „Стабильность”, „Уровень”). Порівняти результати з встановленими за допомогою мультиметра діючим значенням  $U_{\text{вх}}$ .

Зарисувати криву вхідної напруги з екрана осцилографа на кальку. Масш-

таби зображення по осях  $Y$  та  $X$  повинні бути підібрані так, щоб крива займала не менше 0,75 площі екрана. 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 13 – 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 входній напрузі (експеримент 2)

3.5.3.1. Зібрати електричне коло рис.3.5. Значення  $U_m$  (встановлюється за осцилографом),  $f$  (встановлюється за мультиметром),  $R_2$ , а також форму напруги взяти з табл.14 відповідно до свого варіанта. Опір  $R_1$  для всіх варіантів – це опір  $R_{01}$  з елементів набірного поля.

3.5.3.2. Під'єднати осцилограф до входу кола і отримати на екрані сталі зображення несинусоїдної входної напруги; зарисувати криву з екрану осцилографа на кальку (вхідна напруга однакова для схем рис.3.5, рис.3.6, рис.3.7). Записати масштаби за напругою і часом.

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

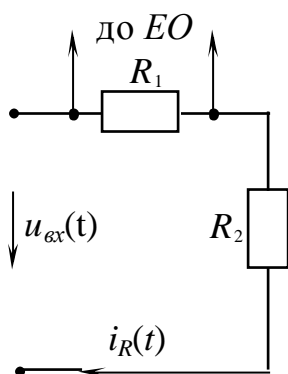


Рис.3.5

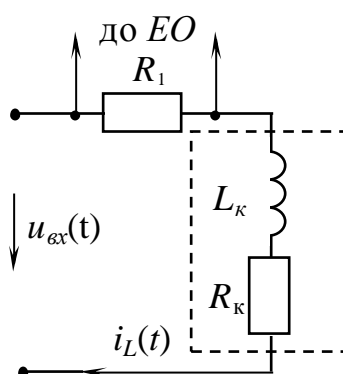


Рис.3.6

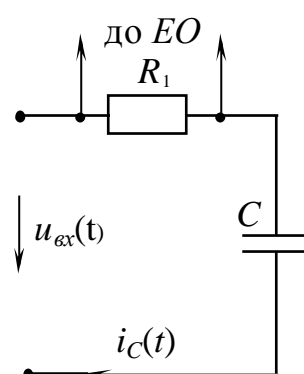


Рис.3.7

3.5.3.3. Зібрати електричні коло рис.3.6. Значення  $L_k$ ,  $R_k$  взяти з табл. 14 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 електричні коло рис.3.7. Значення  $C$  взяти з табл.14 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.

Таблиця 14 – 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

### 3.6. Обробка експериментальних даних

3.6.1. Розкласти криву несинусоїдного 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 на міліметровому папері хвильову діаграму несинусоїдного

струму  $i(\omega t)$  (скласти графічно хвильові діаграми окремих гармонік).

3.6.2. За даними пункту 3.5.3 аналітично розрахувати  $i(\omega t)$  для схем рис.3.5, рис.3.6, рис.3.7 (тобто -  $i_R(\omega t), i_L(\omega t), i_C(\omega t)$ ) і порівняти їх з отриманими за допомогою осцилографа.

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.

### 3.8. Контрольні запитання

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?
5. Наведіть визначення середніх й діючих значень несинусоїдного струму і напруги.
6. Якими коефіцієнтами характеризують несинусоїдні струми та напруги?
7. Наведіть визначення активної, реактивної, повної та потужності викривлення несинусоїдного струму.
8. 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

### 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 .

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 розділі „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.

Струм і напругу перехідного процесу можна розглядати як ті, що склада-

ються відповідно із струму і напруги примусового режиму та струму і напруги вільного режиму:

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

де  $u_{\text{в}}$ ,  $i_{\text{в}}$  - 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);

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

Слід відзначити, що тема „Перехідні процеси” 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.

Порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом

1. Довільно направляємо струми у вітках.
2. Записуємо для кожного струму та напруги загальне рішення у вигляді (4.1).
3. Визначаємо незалежні початкові умови.
4. Знаходимо залежні початкові умови (складаємо і вирішуємо систему рівнянь для схеми після комутації за законами Кірхгофа та моменту часу  $t=0$ ).
5. Знаходимо примусові складові усіх струмів і напруг шляхом розрахунку схеми після комутації (сталій режим; час після комутації  $t \rightarrow \infty$ ).
6. Складаємо характеристичне рівняння (метод вхідного опору або головного визначника), вирішуємо його і за кількістю та типом коренів записуємо вид вільних складових струмів і напруг.
7. Визначаємо постійні інтегрування за допомогою незалежних і залежних початкових умов.

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

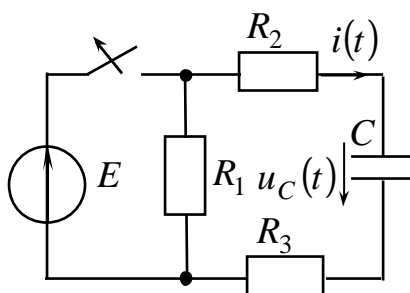


Рис. 4.1 – Розряд ємності

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

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

Розряд ємності на активний опір (рис.4.1)

До комутації ємність заряджена до напруги джерела ЕРС  $E$ , потім, після відключення джерела, розряджається через опір  $(R_1 + R_2 + R_3)$ .

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

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 рис.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)

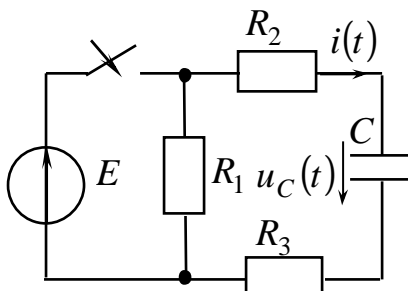


Рис. 4.2 – Заряд ємності

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 ви-

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

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

Використовуючи незалежну початкову умову, маємо  $u_{\tilde{N}}(0) = 0 = 10 + A \Rightarrow$

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

Струм вітки з ємністю:

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

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



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

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

Розряд індуктивності на активний опір (рис.4.3)

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

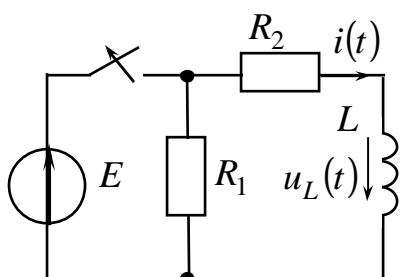


Рис. 4.3 – Розряд індуктивності

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

Характеристичне рівняння:

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

Таким чином, вільна складова

$$i_{\hat{a}} = A \cdot e^{p \cdot t} = A \cdot e^{-5714,29 \cdot t}, \quad \text{а загальне рішення} \\ i(t) = i_{i\partial} + i_{\hat{a}} = A \cdot e^{-5714,29 \cdot t}.$$

Постійну інтегрування  $A$  визначаємо, використовуючи незалежну початкову умову  $i(0) = 0,067 \Rightarrow A = 0,067$ .

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

$$i(t) = 0,067 \cdot e^{-5714,29 \cdot t}, \text{ А; } u_L(t) = 0,035 \cdot \frac{d[0,067 \cdot e^{-5714,29 \cdot t}]}{dt} = -134 \cdot e^{-5714,29 \cdot t}, \text{ В.}$$

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

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

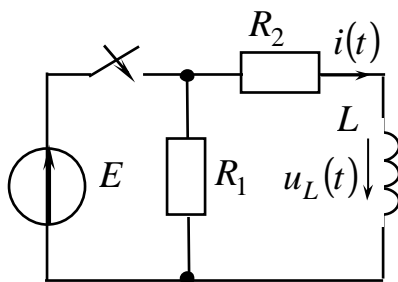


Рис. 4.4 – Заряд індуктивності

Незалежна початкова умова:  $i(0) = 0$  А.

Примусова складова струму:

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

Характеристичне рівняння:

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

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

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

Таким чином, струм та напруга на індуктивності

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

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

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

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

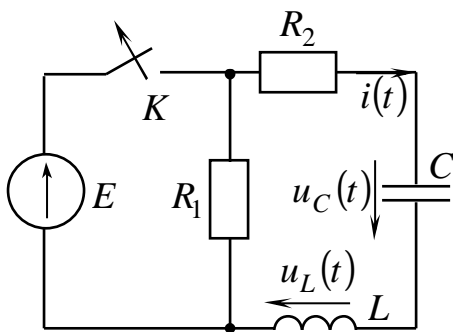


Рис.4.5 - Відключення  $R$ - $L$ - $C$  кола від джерела постійної напруги

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:

$$u_C(0) = E = 10 \text{ В}; i(0) = 0.$$

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) – **апериодичний** режим;
- дійсними й рівними, коли  $R_1 + R_2 = R_{кр} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$  – **критичний** режим;
- комплексно-спряженими, коли  $R_1 + R_2 < R_{кр} = 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$  – **коливальний** режим.

$$\text{Після підстановки вихідних даних, маємо: } p^2 + \frac{450}{0,07} \cdot p + \frac{1}{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,07} = 0 \Rightarrow$$

$$p^2 + 6428,6 \cdot p + 9523809,5 = 0 \Rightarrow \text{корені - } p_1 = -2315,7 \text{ с}^{-1}; p_2 = -4113,1 \text{ с}^{-1}$$

Оскільки, корені є дійсними та різними., то вільна складова напруги на ємності має вигляд:  $u_{C_6} = A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t} = A_1 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}$ .

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:

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

$$\begin{aligned} i(t) &= C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot [-2315,7 \cdot 22,88 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} - 4113,1 \cdot (-12,88) \cdot e^{-4113,1 \cdot t}] = \\ &= -0,0795 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + 0,0795 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}, \text{ А}. \end{aligned}$$

$$u_L(t) = \frac{L di(t)}{dt} = 0,07 \cdot \frac{d[-0,0795 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} + 0,0795 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}]}{dt} = 1288 \cdot e^{-2315,7 \cdot t} - 2288 \cdot e^{-4113,1 \cdot t}, \text{ В}.$$

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

$$p_{1,2} = -\frac{R_1 + R_2}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_1 + R_2}{2L}\right)^2 - \frac{1}{C \cdot L}} = -2857,1 \pm j \cdot 1166,5 \text{ с}^{-1}, \text{ вільна складова напруги на ємності - } u_{C_6} = A \cdot e^{-2857,1 \cdot t} \cdot \sin(1166,5 \cdot t + \alpha).$$

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

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

Коефіцієнти  $A_1$  і  $\alpha$  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 -  $u_C(t) = 26,47 \cdot e^{-2857,1 \cdot t} \sin(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ)$ , В; а

струм вітки  $R$ - $L$ - $C$ :  $i(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} = C \cdot 26,47 \cdot e^{-2857,1 \cdot t} [-2857,1 \cdot \sin(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ) + 1166,5 \cdot \cos(1166,5 \cdot t + 22,2^\circ)]$ . 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  $R$ - $L$ - $C$ :

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

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

Постійну часу у випадку коливального режиму визначають так:

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

#### 4.5. Порядок виконання роботи

Роботу виконують відповідно до вихідних даних, що наведені в табл.15, 16, 17, за номером стенду. Доцільно спочатку перед проведенням експерименту виконати необхідні розрахунки, які потім перевіряють у процесі проведення експериментальної частини лабораторної роботи. 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 (експеримент 1).

Зібрати електричне коло рис.4.1. Елементи  $R_3$ ,  $C$  – це відповідно змінний опір і змінна ємність з блоку змінних пасивних елементів стенда УДЛС-1. Значення останніх взяти з табл.15 відповідно до свого варіанту. Опори  $R_1$ ,  $R_2$  для усіх варіантів – це опори  $R01$ ,  $R02$  з елементів набірної плати. У якості джерела  $E$  використати регульоване джерело постійної напруги (значення  $E$  взяти з табл.15, воно є незмінним для всіх експериментів), ключ  $K$  – електронний ключ з блоку постійних напруг стенду.

Під'єднати осцилограф паралельно конденсатору  $C$  і отримати стає зо-

браження кривої за допомогою ручок керування „Усиление Y”, „Длительность развертки”, „Стабильность”, „Уровень”.

Зарисувати криву (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.

Таблиця 15 – 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

Зменшити, а потім збільшити ємність приблизно в 2 рази й зробити висновок, дивлячись на зображення кривої на екрані, як змінюється постійна часу при цьому.

Встановити вихідне значення ємності й під'єднати осцилограф паралельно опору  $R_2$ . Зарисувати криву струму під час перехідного процесу (дві частини: заряд і розряд 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.

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

Зібрати електричне коло (рис.4.3). Елементи  $R_2$ ,  $L$  – відповідно змінний опір і змінна індуктивність з блоку змінних пасивних елементів стенду. Значення останніх взяти з табл.16 відповідно до свого варіанта. Опір  $R_1$  для всіх варіантів – це опір  $R_{01}$  з елементів набірної коробки.

Під'єднати осцилограф паралельно індуктивності  $L$  й отримати стає зображення кривої (див. пункт 4.5.1). Зарисувати криву (дві частини: заряд і розряд індуктивності) з екрану осцилографа на кальку. 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 та зробити висновок, дивлячись на зображення кривої на екрані, як змінюється постійна часу при цьому.

Встановити вихідне значення індуктивності та під'єднати осцилограф паралельно опору  $R_2$ . Зарисувати криву струму під час перехідного процесу (2 час-

тини: заряд та розряд ємності). Записати масштаби за напругою і часом.

Таблиця 16 – 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 (експеримент 3)

Зібрати електричне коло (рис.4.5). Значення елементів взяти з табл.17. Елементи  $L$ ,  $C$  – індуктивність і ємність з елементів набірного поля (в табл.17 вказані

їх номери). Опір  $R_2$  – змінний опір з блоку змінних пасивних елементів стенду УДЛС-1. Опір  $R_1$  для усіх варіантів – це опір  $R_{01}$  з елементів набірного поля. Значення ЕРС  $E$  взяти з пункту 4.5.1.

Таблиця 17 – Вихідні дані експерименту 3

№ варіанту	$L$ , №	$R_2$ , Ом	$C$ , №	№ варіанту	$L$ , №	$R_2$ , Ом	$C$ , №
1	27	630	15	8	28	540	16
2	28	510	17	9	29	420	18
3	29	420	19	10	28	480	15
4	27	570	16	11	29	390	16
5	27	480	18	12	28	300	17
6	29	420	17	13	27	480	18
7	27	450	15	14	29	370	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. Переконалися, 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. 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. Перекона-  
тися, що таким чином буде отриманим коливальний режим.

Під'єднати осцилограф паралельно опору  $R_2$ , паралельно ємності  $C$ , пара-  
лельно індуктивності  $L$  й зарисувати криві  $u_{R2}(t)$ ,  $u_C(t)$ ,  $u_L(t)$  з екрану осцилог-  
рафа на кальку. Записати масштаби за напругою і часом.

#### 4.6. Обробка експериментальних даних

4.6.1. За даними експерименту 4.5.1 розрахувати класичним методом зако-  
ни  $u_C(t)$ ,  $i(t)$  під час перехідного процесу (див. пункт 4.4, задача 1 „Дослідження  
перехідних процесів у  $R-C$  колі при відключенні й підключенні до джерела пос-  
тійної напруги”), а також значення постійної часу. Визначити також постійну ча-  
су графічно, переконатись, що результати розрахунків і експериментів однакові.

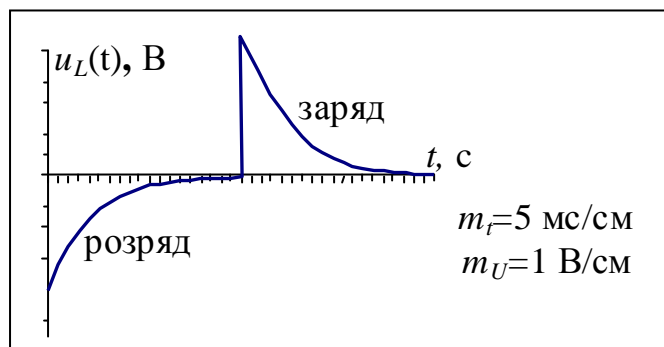
4.6.2. За даними експерименту 4.5.2 розрахувати класичним методом зако-  
ни  $i(t)$ ,  $u_L(t)$  під час перехідного процесу (див. пункту 4.4, задача 2 „Дослідження  
перехідних процесів у  $R-L$  колі при відключенні й підключенні до джерела пос-  
тійної напруги”), а також значення постійної часу. Визначити також постійну часу  
графічно, переконатись, що результати розрахунків і експериментів однакові.

4.6.1. За даними експерименту 4.5.3 розрахувати класичним методом зако-  
ни  $u_{R2}(t)$ ,  $u_C(t)$ ,  $u_L(t)$ ,  $i(t)$  під час перехідного процесу в  $R-L-C$  колі при відми-  
канні його від джерела постійної напруги (див. пункт 4.4, задача 3 „Дослідження  
перехідних процесів у коливальному  $R-L-C$  колі при відмиканні його від джерела  
постійної напруги”) в двох режимах роботи кола: аперіодичному і коливальному.

Примітка. Кальки треба розміщувати поряд з відповідним розрахунком  
(експериментом).

Напруга на індуктивності під час  
перехідного процесу (експеримент 2)

Приклад оформлення кальки в  
звіті.



#### 4.7. Висновки

За результатами першого та другого експериментів зробити висновки

- відносно характеру напруги на індуктивності та ємності в колах першого порядку, які подібні досліджуваним в роботі;

- відносно характеру струму через індуктивність та ємність в колах першого порядку, які подібні досліджуваним в роботі.

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 запитання

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.

5. Охарактеризуйте вид вільного процесу залежно від коренів характеристичного рівняння.

6. Поясніть, як визначають постійні інтегрування у класичному методі.

7. Наведіть порядок розрахунку перехідних процесів класичним методом.

8. Охарактеризуйте інші методи розрахунку перехідних процесів: операторний та метод інтеграла Дюамеля.



## 5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### Нелінійні кола 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 УДЛС-1 (блок постійної напруги);
- елементи набірної плати;
- 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 має відношення до розділів „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

Нелінійне коло – це коло, що містить хоча б один нелінійний елемент, який не може бути охарактеризований лінійними залежностями типу

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

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

$$u = f(i, \frac{di}{dt}), \quad \psi = f(i, \frac{d\psi}{dt}), \quad q = f(u, \frac{dq}{dt}), \quad (5.2)$$

тобто в загальному випадку спостерігається залежність не тільки від змінної, але й від швидкості її зміни. Якщо ми говоримо про нелінійні кола постійного струму, то їх характеризують нелійними вольт-амперними ( $u = f(i)$ ), вебер-амперними ( $\psi = f(i)$ ) і кулон-вольтними ( $q = f(u)$ ) характеристиками. Якщо ж ми розглядаємо кола постійного струму, то залежності (5.2) – це нелінійна 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.

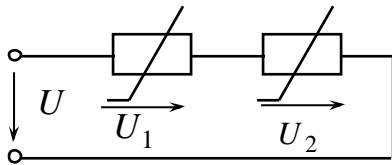


Рис. 5.1

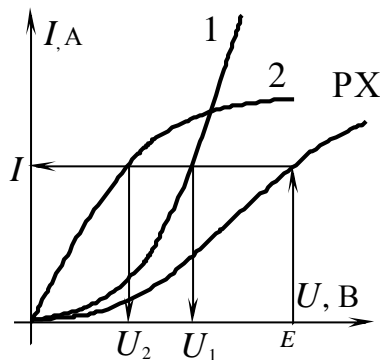


Рис. 5.2

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) – (рис. 5.2).

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

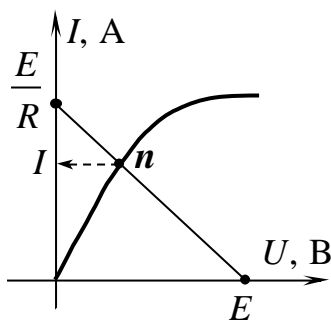


Рис. 5.3

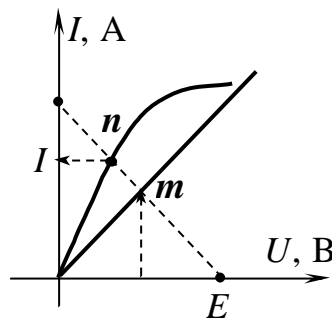


Рис. 5.4

замикання ( $U_{HA} = 0$ ,  $I = \frac{E}{R}$ ).

Потім будують пряму, що сполучає ці точки і перетинає ВАХ нелінійного елемента – рис. 5.3 ( $n$  – шукана точка, що визначає значення струму  $I$ ).

Також в цьому випадку

можна застосувати і наступний спосіб (рис. 5.4):

- побудувати ВАХ лінійного елемента за двома точками;
- відкласти за віссю напруги значення  $EPC\ E$ ;
- з середини величини  $E$  відновити перпендикуляр до його перетину з ВАХ лінійного елемента (точка  $m$ );
- провести допоміжну пряму через точки  $E$  і  $m$ , яка перетне ВАХ нелінійного елемента.

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).

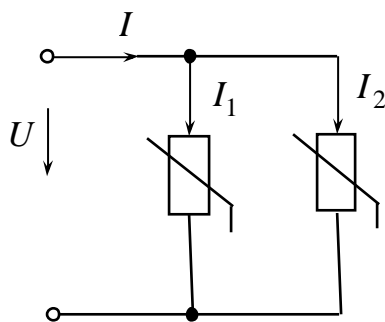


Рис. 5.5

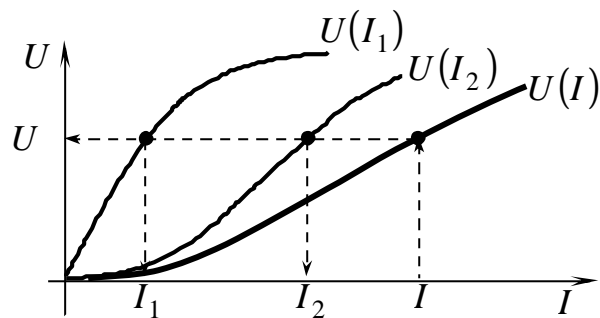


Рис. 5.6

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

Розрахунок змішаного з'єднання нелінійних елементів містить етапи розрахунку кіл з паралельним і послідовним з'єднанням елементів. Для схеми рис. 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 рис. 5.8. При цьому повинна бути побудована результуюча ВАХ умовного нелінійного елемента «2-3».

Подальший розрахунок схеми на рис. 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 заданим воль-амперними характеристиками елементів «2» і «3» визначаємо струми в паралельних вітках  $I_2$  і  $I_3$ .

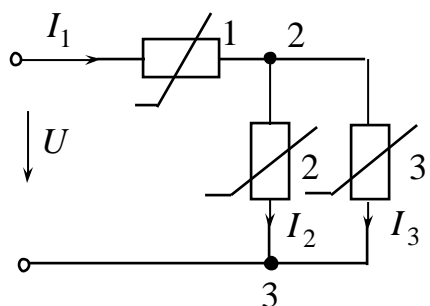


Рис. 5.7

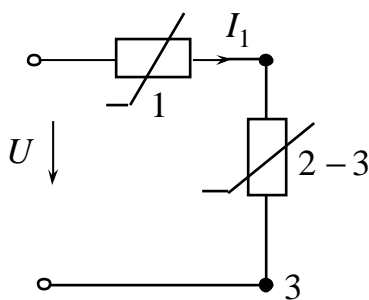


Рис. 5.8

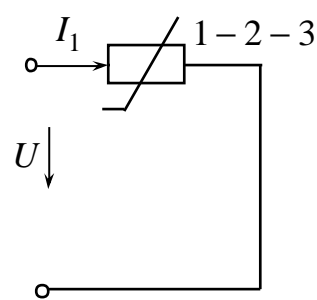


Рис. 5.9

### 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  $R_d$ .

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

Таблиця 18 – Дані для побудови ВАХ

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

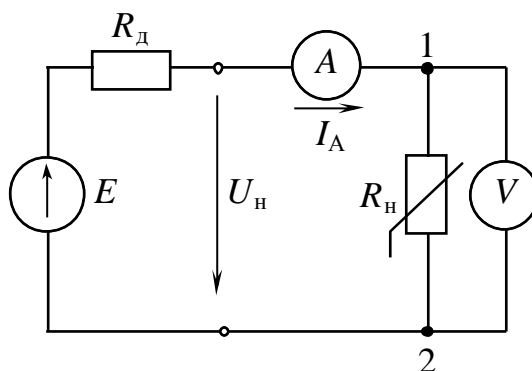


Рис.5.10 – Електричне коло для зняття ВАХ

$R$

Плавно змінюючи значення напруги джерела ЕРС  $E$ , встановлюємо струм у колі з кроком 10 мА в діапазоні від 0 до 100 мА і вимірюємо при кожному значенні струму напругу на елементі. Результати розрахунків та експериментів занести до табл.18.

5.5.2. Дослідження послідовного з'єднання нелінійного елемента (лампи розжарювання) і лінійного елемента  $R_L$

Зібрати електричне коло (рис.5.11). Встановити вхідну напругу  $U_{вх}$  за вказівкою викладача в діапазоні 4÷10 В. Виміряти значення струму та напруг на елементах. Результати експерименту занести до табл.19.

5.5.3. Дослідження паралельного з'єднання нелінійного елемента (лампи розжарювання) і лінійного елемента  $R_{03}$  ( $R_L$  на схемі)

Зібрати електричне коло (рис.5.12). 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 табл.20.

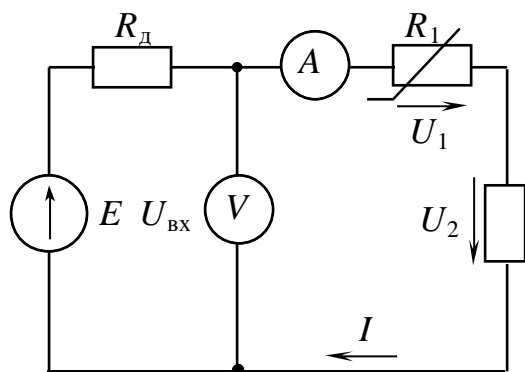


Рис.5.11 – Послідовне з'єднання нелінійних елементів

Таблиця 19 – Результати експерименту та розрахунку (п.5.5.2)

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

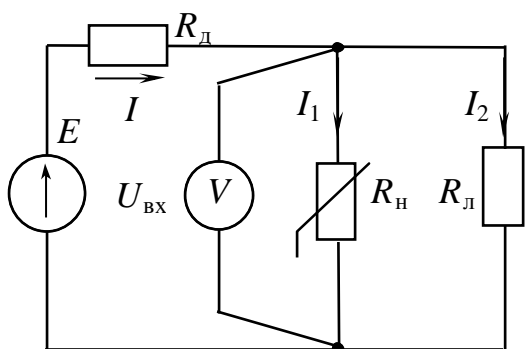


Рис.5.12 – Паралельне з'єднання нелінійних елементів

Таблиця 20 – 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.5.13). У якості нелінійних елементів  $R_1$ ,  $R_2$  взят-

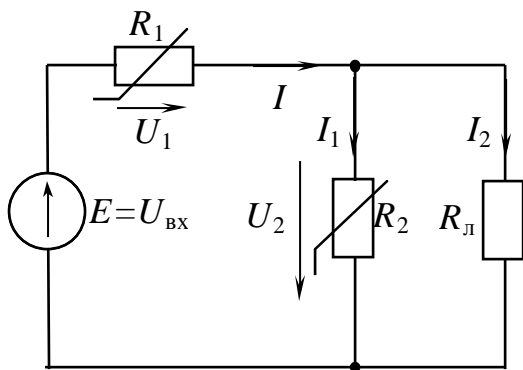


Рис.5.13 – Змішане з'єднання нелінійних елементів

ти відповідно діод і лампу розжарювання. Встановити вхідну напругу  $U_{\text{BX}}$  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 табл.21.

## 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  $R_{03}$ ) у одній системі координат. Рекомендується вибирати такі масштаби: за напругою:  $m_U=1$  В/см, за струмом -  $m_I=10$  мА/см, по осі  $Y$  відкладають значення струму, по осі  $X$  – значення напруги.

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  $R_{03}$  і скласти ці ВАХ по вісі струму. Порівняти отримані результати з даними експерименту 5.5.2 і занести їх до табл.19.

5.6.3. Зробити графоаналітичним методом розрахунок паралельного з'єднання нелінійного і лінійного елементів (визначити значення струмів  $I_1$ ,  $I_2$  і напруги  $U_{\text{BX}}$  на паралельних вітках). Для цього на третьому графіку побудувати ВАХ лампи розжарювання і лінійного елемента  $R_{03}$  та додати ці ВАХ за осі напруги. Порівняти отримані результати з даними експерименту 5.5.3 і занести їх до табл.20.

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  $R_{03}$  по осі напруги, а потім отриману результуючу характеристику паралельного з'єднання скласти с характеристикою діода по осі струму. Порівняти отримані результати з даними експерименту 5.5.4 та занести їх до табл.21.

Таблиця 21 – Результати експерименту та розрахунку (п.5.5.4)

Визначено	$U_{вх}$ , В	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$I$ , мА	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА
експерментом						
розрахунком						

### 5.7. Контрольні запитання

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. Практичне застосування нелінійних елементів постійного струму.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник, М.: Гардарики, 2002 – 640 с.
2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей: Учебник для вузов - М.: Энергоатомиздат, 1989– 528 с.
3. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. 4-е издание, дополненное для самостоятельного изучения курса. - Издательство «Питер», 2004 (т. 1 – 462 с., т. 2 – 575 с., т. 3 – 376 с.).
4. М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. Задачник по теории линейных электрических цепей. – М.: «Высшая школа», 1990– 544 с.
5. М.П. Рибалко, В.О.Єсауленко, В.І. Костенко. Теоретичні основи електротехніки. Лінійні електричні кола: Підручник. – Донецьк: Новий світ, 2003 -513 с.
6. Перхач В.С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола. - К: Вища школа, 1992 – 439 с.

Навчальне видання

ФОРКУН Яна Борисівна,  
САМОШКІН Володимир Петрович,  
КАПУСТІН Геннадій Валентинович

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт за темами «Трифазні кола, несинусоїдні кола, перехідні процеси, нелінійні кола» з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки» (для студентів усіх форм навчання напрямів 6.050701 - «Електротехніка та електротехнології» і 6.050702 - «Електромеханіка»)

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*  
Редактор *М.З. Аляб'єв*

План 2010, поз. 267М

---

Підп. до друку 23. 05. 2010  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60 x 84 1/16  
Ум. друк. арк. 2,6  
Тираж 50 пр.

---

Видавець і виготовлювачі  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК №731 від 19.12.2001