

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, В. Ю. Лободзинський

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ - 1 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітніми програмами «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні
комплекси», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електричні
станції», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»,
«Електричні машини і апарати»,
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент: Чумак В.В., канд. техн. наук, доц., кафедра електромеханіки
Відповідальний редактор: Бойко В. С., д-р. техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 26.05.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенергетичної та автоматики
(протокол № 9 від 17.05.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання
Бурик Микола Петрович, канд. техн. наук, доц.
Спінул Людмила Юріївна, канд. техн. наук, доц.
Лободзинський Вадим Юрійович, канд. техн. наук, доц.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ - 1 ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Теоретичні основи електротехніки - 1: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освітніми програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електричні станції», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод», «Електричні машини і апарати», спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / М.П. Бурик; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 73 с.

Представлено лабораторний практикум з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки - 1", у яких проводяться аналіз моделей реального джерела постійного струму; законів Ома та Кірхгофа; потенціальних діаграм електричного кола; еквівалентних перетворень пасивних ділянок електричних кіл; методу накладання; активного двополюсника; послідовного, паралельного та мішаного сполучення елементів електричного кола синусоїдного струму; електричних кіл із взаємною індуктивністю; резонансу напруг.

Призначений для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, В. Ю. Лободзинський 2022
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
Основні положення	7
1. Основні правила техніки безпеки	9
2. Технічні характеристики і конструкція лабораторного стенду	10
3. Зміст звіту	12
4. Лабораторна робота №1. Моделювання реального джерела постійної напруги	13
5. Лабораторна робота №2. Закони Ома та Кірхгофа потенціальна діаграма електричного кола	21
6. Лабораторна робота №3. Еквівалентні перетворення пасивних ділянок електричних кіл	32
7. Лабораторна робота №4. Метод накладання	42
8. Лабораторна робота №5. Дослідження активного двополюсника	52
9. Лабораторна робота №6. Послідовне, паралельне та мішане сполучення елементів електричного кола	64
10. Лабораторна робота №7. Електричні кола зі взаємною індуктивністю	78
11. Лабораторна робота №8. Резонанс напруг	90
ДОДАТОК А Приклад оформлення титульного аркуша лабораторної роботи	96

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВАХ – вольт-амперна характеристика
Дж – джерела живлення
ДСТУ – державного стандарту України
ЕРС – електрорушійна сила
ЄСКД – єдина система конструкторської документації
 $K_{зв}$ – коефіцієнт індуктивного зв'язку
ККД – коефіцієнт корисної дії
НДЛС – навчально-дослідницький лабораторний стенд
 Φ – магнітний потік
 A – амперметр
 B – реактивна провідність
 C – ємність конденсатора
 d – коефіцієнт згасання контуру
 E – джерело ЕРС
 f – лінійна частота
 J – джерело постійного струму
 G – активна провідність або джерело постійної напруги
 I – електричний струм
 i – миттєве значення струму
 L – індуктивність
 M – взаємна індуктивність
 P – активна потужність
 Q – реактивна потужність або добротність контуру
 R – активний опір резистора
 T – період коливання струму
 t – час
 U – електрична напруга
 U_M – напруга взаємодуктивності
 u – миттєве значення напруги
 V – вольтметр

X – реактивний опір електричного кола

X_C – реактивний опір конденсатора

X_L – реактивний опір котушки індуктивності

X_M – реактивний опір взаємодуктивності

Y – повна провідність електричного кола

$\underline{Y}$ – повна комплексна провідність

Z – повний опір електричного кола

$\underline{Z}$ – повний комплексний опір

η – коефіцієнт корисної дії

ρ – реактивний опір котушки індуктивності або конденсатора в режимі резонансу

φ – електричний потенціал або кут зсуву фаз між напругою та струмом

ψ – початкова фаза

ω – кутова частота

ВСТУП

Кредитний модуль «Теоретичні основи електротехніки - 1» призначений для підготовки бакалаврів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та за освітніми програмами «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси», «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії», «Електричні станції», «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» та «Електричні машини і апарати».

Мета навчального посібника до виконання лабораторних робіт полягає у закріпленні набутих теоретичних положень шляхом експериментального дослідження, формуванні умінь використовувати методи моделювання процесів у електричних та магнітних колах під час дії постійних та синусоїдних ЕРС за допомогою законів Кірхгофа та Ома, методів контурних струмів, вузлових потенціалів, еквівалентного генератора та методу накладання.

До складу навчального посібника входять лабораторні роботи, у яких аналізуються: моделі реального джерела постійного струму; закони Ома та Кірхгофа; потенціальні діаграми електричного кола; еквівалентні перетворення пасивних ділянок електричних кіл; метод накладання; активний двополусник; послідовне, паралельне та мішане сполучення елементів електричного кола синусоїдного струму; топографічні діаграми напруг та суміщенні векторні діаграми струмів; електричні кола із взаємною індуктивністю та резонанс напруг в електричному колі з лінійними елементами.

Кожна лабораторна робота має основні теоретичні відомості та складається з наступних частин:

- експериментального дослідження;
- обробки отриманих даних.

Навчальний посібник призначений для студентів денної та заочної форм навчання, які вивчають дисципліну "Теоретичні основи електротехніки - 1".

Основні положення

Виконання лабораторних робіт допомагає студентам засвоїти теоретичний матеріал та здійснити експериментальну перевірку законів та методів теорії електричних кіл, набути практичні навички роботи з лабораторним устаткуванням та вимірювальною апаратурою.

Для виконання лабораторних робіт студентська група поділяється на бригади по 3-4 особи, але не менше двох згідно правил безпеки. За кожною бригадою закріплюється робоче місце на увесь час лабораторного практикуму.

Підготовка кожного студента до лабораторної роботи передбачає:

1. Ознайомлення з порядком виконання запланованої лабораторної та теоретичним матеріалом за темою роботи. Для цього потрібно скористатися «Навчальним посібником», який представлений у друкованому вигляді та у вигляді електронних документів на сайті кафедри. «Навчальний посібник» містить інформацію не лише щодо робочого завдання, але й стислі теоретичні відомості за темою лабораторного дослідження. Якісна підготовка до наступного лабораторного заняття передбачає також самостійну роботу студентів над окремими розділами підручників, зазначених в «Навчальному посібнику»;

2. Підготовку звітного протоколу встановленого зразка, в якому мають бути:
а) титульний лист; б) мета роботи; в) хід роботи; г) розрахункові формули, які використовуються при виконанні робочого завдання; д) висновки за експериментальними даними та графіками.

3. Формулювання відповідей на запитання, які пропонуються в «Навчальному посібнику», для поглибленого розуміння сутності лабораторного дослідження.

На початку заняття викладач визначає рівень готовності кожного студента до проведення досліджень та приймає рішення щодо можливості допуску студента до роботи. Студент, не підготовлений до виконання лабораторної роботи, до її виконання не допускається.

Під час виконання лабораторної роботи студенти виконують робоче завдання: складають електричне коло згідно схеми, здійснюють вимірювання електричних величин, передбачених протоколом роботи, заносять дослідні дані у відповідні

таблиці та перевіряють розрахункові співвідношення. Тільки після схвалення викладачем одержаних результатів студенти мають право демонтувати електричне коло, яке досліджували, та скласти інше. Наприкінці заняття викладач візує усі екземпляри лабораторних звітів, що свідчить про виконання кожним студентом експериментальної частини лабораторної роботи.

Студент самостійно має здійснити обробку результатів експериментів та підготувати відповіді на контрольні питання. *На наступному лабораторному занятті студент зобов'язаний подати викладачу до захисту повністю оформлений звіт попередньої лабораторної роботи та пред'явити підготовлений протокол для виконання чергової роботи. Студент, який не оформив або не захистив дві лабораторні роботи, відсторонюється від наступного лабораторного заняття. Його участь у подальших лабораторних заняттях можлива лише за умови ліквідації заборгованості.*

На першому занятті викладач проводить інструктаж з техніки безпеки виконання лабораторних робіт та показує робочі місця студентських бригад: надає інформацію щодо побудови навчально-дослідних стендів та правил користування вимірювальними приладами.

Основні правила техніки безпеки

1. При виконанні робіт на електротехнічних пристроях слід неухильно дотримуватись правил техніки безпеки, оскільки електрична напруга від 36 (В) є небезпечною для життя людини.

2. Заборонено виконувати дослідження на робочому місці поодинці.

3. Електричне коло дозволяється складати лише за умови відсутності напруги на вихідних затискачах джерел живлення, що забезпечується відповідним положенням вимикачів активних блоків НДЛС та загальним вимикачем розподільчого щита лабораторії. Це правило стосується і випадків, коли під час дослідів виникає потреба будь-яких змін в електричному колі, що досліджується (замінити вимірювальний прилад, приєднати додаткове джерело живлення, змінити характер навантаження).

4. Без дозволу викладача студентам забороняється вмикати джерела живлення і подавати напругу на складене ними електричне коло. Увімкнення та вимкнення електричного кола слід здійснювати однією рукою. Інша рука при цьому не повинна торкатися елементів електричного кола. Бажано, щоб обличчя особи, яка виконує комутаційні операції, знаходилося якомога далі від комутаційної апаратури.

5. Забороняється торкатися до струмопровідних частин електричного кола, доки коло знаходиться під напругою.

6. Забороняється виконувати будь-які операції з обладнанням розподільного щита лабораторії. У разі виявлення іскріння контактів, запаху горілої ізоляції або нагрітого металу слід негайно вимкнути блок НДЛС з джерелами, які живлять електричне коло, та знеструмити вимірювальні прилади. Негайно звернутися за допомогою до викладача, який має право вимкнути рубильник на розподільному щиті.

7. Усі особисті речі, що не мають відношення до виконання лабораторної роботи студенти зобов'язані залишити у спеціально призначеному для цього місці у лабораторії.

8. Під час лабораторних занять студенти мають додержуватись тиші та порядку, не виходити з приміщення без дозволу викладача.

9. Лабораторне заняття триває без перерви і закінчується за 5 хвилин до перерви перед наступною парою.

10. Наприкінці заняття потрібно привести робоче місце у порядок та повернути лаборанту додаткове обладнання, яке було надано бригаді для виконання роботи.

Технічні характеристики і конструкція лабораторного стенду

Дослідження електричних кіл виконується на навчально-дослідному лабораторному стенді (НДЛС) «Практика». Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі: з'єднувальні дроти, набірні резистори та перемички. Для здійснення вимірювань параметрів електричних величин використовують вольтметр.

Пульт НДЛС – 1 2.00.00 (рис. 1) складається з трьох частин: ліва частина – це джерела електричної енергії (три активних блока), середня частина є складальним полем, права частина вміщує блоки пасивних елементів (навантаження).

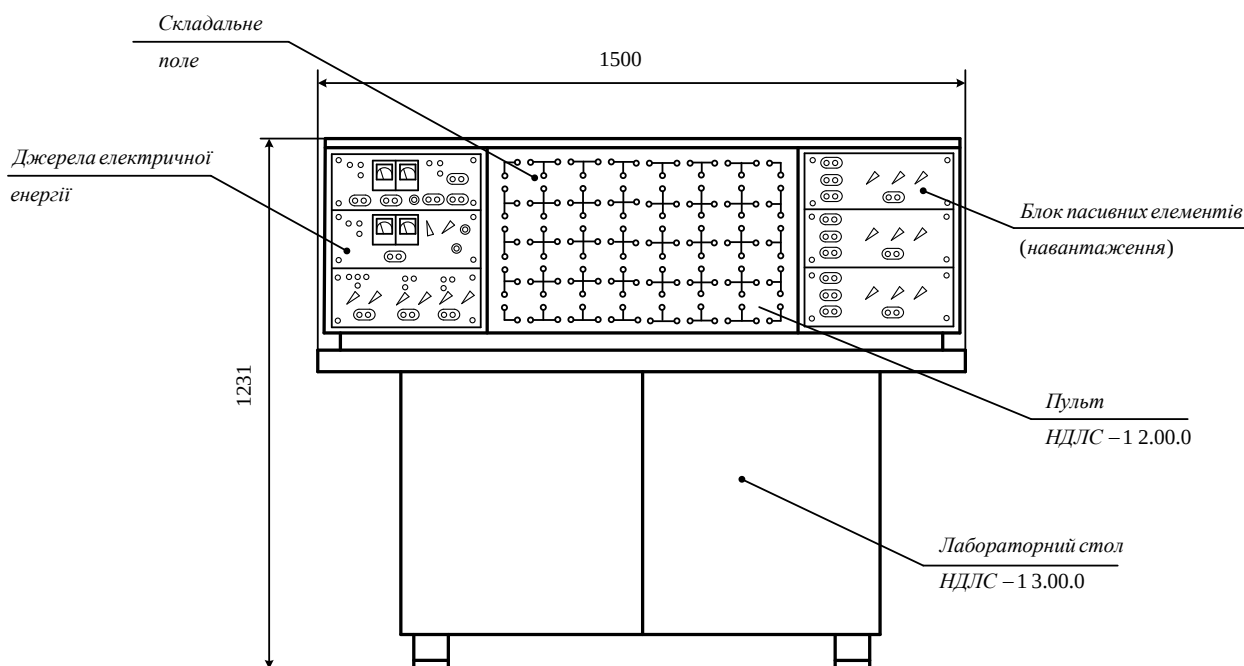


Рисунок 1 – Навчально-дослідний лабораторний стенд «НДЛС-1»

Джерела енергії стенду згруповані у блоки постійної напруги, змінної напруги та трифазної напруги. Блок трифазної напруги працює на промисловій частоті 50 (Гц). Діюче значення кожної фазної напруги змінюється за допомогою перемикачів у межах від 1 до 9 (В) та від 0 до 40 (В). Кожна фаза має вихід на розетку. Початки та кінці трьох фаз джерела виведені на передню панель блоку, що дає змогу з'єднувати фази за схемою «зірки» чи «трикутника».

За допомогою загального тумблера «Мережа», який розміщений на передній панелі, підключаються фази джерела напруги (положення «Вкл»). При цьому висвітлюється індикатор «Мережа». У блоці трифазної напруги, окрім тумблера «Мережа», також присутні тумблери для вмикання кожної фази окремо. Усі джерела живлення мають швидкодіючу електронну систему захисту від перевантажень. Струм спрацьовування захисту дорівнює 1 (А). При перевантаженнях у блоках спрацьовує захист, про що сповіщає індикатор «Захист». Для наступного використання джерела енергії слід усунути причину, яка веде до спрацьовування захисту, та натиснути на кнопку «Захист». При цьому коло захисту розмикається, індикатор «Захист» гасне, що свідчить про готовність джерела живлення до подальшої роботи.

Пасивні елементи НДЛС згруповані на кілька блоків: по два однакових блоки резисторів та конденсаторів та один блок індуктивностей. На передніх панелях блоків є гнізда для приєднання проводів, за допомогою яких елементи блоків вмикаються у схему.

Блок резисторів вміщує три резистори ($R_1 = 100$ (Ом), $R_2 = 200$ (Ом), $R_3 = 400$ (Ом)) та магазин опорів R_4 , опір якого змінюється від 1 до 999 (Ом). Гранична активна потужність дорівнює 5 (Вт).

Блок конденсаторів вміщує три конденсатори з ємностями $C_1 = 0.1$ (мкФ), $C_2 = 10$ (мкФ), $C_3 = 20$ (мкФ) та магазин конденсаторів C_4 , що змінює ємність у межах 0,01...9,99 (мкФ). Гранична допустима напруга на конденсаторах дорівнює 160 (В).

Блок індуктивностей вміщує три котушки індуктивності: $L_1 = 1$ (Гн), $L_2 = 1.5$ (Гн), $L_3 = 2$ (Гн), та магазин індуктивностей L_4 з діапазоном зміни

індуктивності від 0.1 до 999 (мГн). Котушки L_1 та L_2 мають індуктивний зв'язок. Допустимий струм через котушки індуктивності становить 0.2 (А).

Складальне поле є панеллю з 67 парами роз'ємних з'єднань, які мають між собою на внутрішній стороні панелі запаєні у вузли по 4, 3 або 2 роз'ємних з'єднань. Роз'ємні з'єднання призначені для закріплення набірних елементів електричних кіл та дротів.

Набірні елементи – це резистори, конденсатори та котушки індуктивності. До комплекту НДЛС входить набір з'єднувальних проводів зі штекерами, призначених для приєднання до складального поля джерел енергії, пасивних елементів.

Зміст звіту

Протокол з лабораторної роботи має містити матеріали, що оформлюються відповідно до правил та вимог ЄСКД та ДСТУ:

- титульний аркуш, прилад якого наведено у додатку А;
- мету та послідовність виконання лабораторної роботи;
- електричні схеми з параметрами елементів, що досліджуються;
- таблиці величин, що вимірюються та розраховуються;
- умови завдання для варіанту бригади;
- формули обчислень, повинні бути представлені у заданому порядку: рівняння у літерних позначеннях, рівняння у числах, відповідь та одиниці виміру;
- діаграми та графіки, що побудовані за результатами експериментів і розрахунків;
- програми та результати моделювання у математичних середовищах (якщо програми використовувались під час обрахунку результатів або для виведення графіків);
- висновки за даними лабораторної роботи (проаналізувати величини електричних координат досліджуваних схем, що були отримані експериментальним, розрахунковим та графічним методами).

Лабораторна робота №1

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи

Ознайомити студентів з робочим місцем – універсальним навчально-дослідним лабораторним стендом (НДЛС) та умовами його експлуатації.

Надати студентам первинні навички складання схем на стендах та користування цифровим мультиметром для здійснення вимірювань струмів, напруг та опорів пасивних ділянок кіл.

Навчитися будувати вольт-амперні характеристики активних та пасивних ділянок електричного кола та визначати параметри еквівалентної схеми заміщення джерела постійної напруги.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи необхідно:

1. Ознайомитися з порядком виконання роботи і методичними вказівками.
2. Скласти протокол звіту з лабораторної роботи.

Опис лабораторного устаткування

Експериментальну схему збирають на складальному полі універсального науково-дослідного лабораторного стенда. Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Живлення схеми здійснюється від одного з двох джерел із блока постійної напруги стенда (за рекомендацією викладача): нерегульованого $Дж_1$ або регульованого $Дж_2$. В якості навантаження застосовують резистори із магазину опорів, який розміщено у блоці опорів стенда. Під час експериментальних досліджень потрібно скористатися цифровим мультиметром (клас точності 3).

Слід звернути увагу, що джерела із блока постійних напруг стенда вмикаються в схеми разом з паралельно увімкненими балансними опорами (резистор R_7 на рис. 1.1) в складних колах з кількома джерелами енергії.

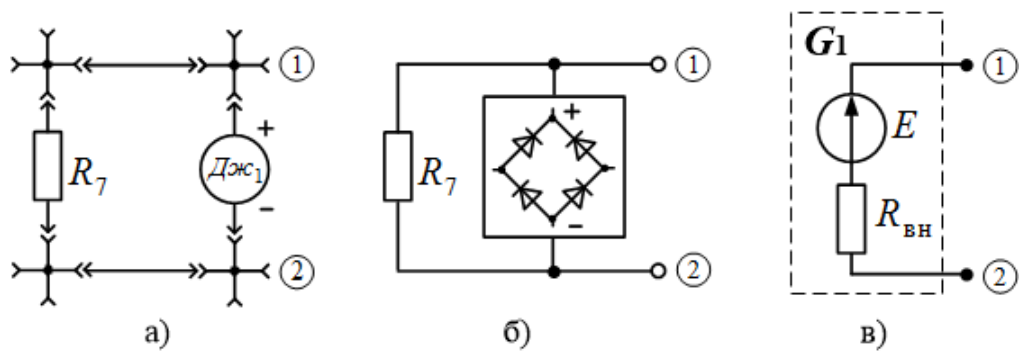


Рис. 1.1. Схема джерела постійної напруги G_1 :

монтажна на складальному полі науково-дослідного стенда (а),

спрощена структурна (б), заміщення (в)

Увімкнення балансних опорів пояснюється схемотехнічними особливостями побудови джерел блоку постійної напруги. До складу цих джерел входить мостова схема випрямлення на діодах, яка не допускає протікання струму проти напрямку дії електрорушійної сили. З метою лінеаризації навантажувальної характеристики та створення умов для протікання струму проти напрямку дії електрорушійної сили паралельно до випрямляча вмикають баластний резистор.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати на складальному полі стенда схему, яка виконує функції джерела постійної напруги G_1 (рис. 1.1, а).

2. Приєднати до точок ① і ② вольтметр (рис. 1.2) і визначити величину електрорушійної сили E джерела живлення G_1 . Одержаний результат записати в перший рядок табл. 1.1.

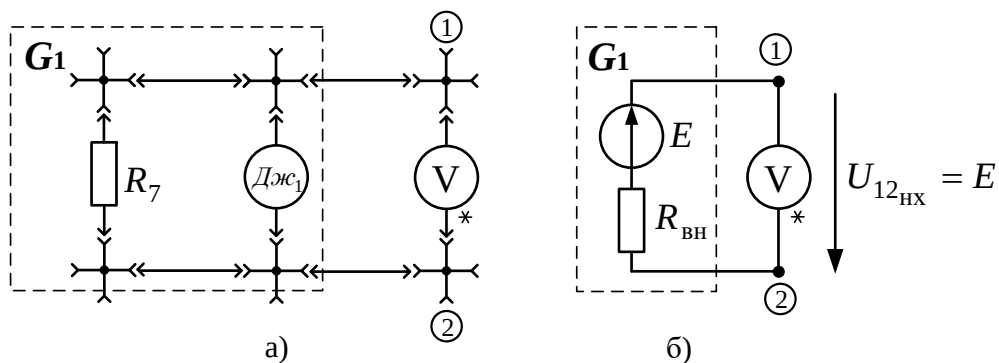


Рис. 1.2. Схема реального джерела постійної напруги G_1 в режимі

неробочого ходу: монтажна (а), заміщення (б)

Таблиця 1.1

$E = U_{12_{\text{нх}}}$, В	$U_{G_1} = U_{\text{н}} = U_{12}$, В	$I_{\text{н}}$, А	$R_{\text{вн}} = \frac{E - U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}$, Ом	$R_{\text{н}}$, Ом
	—	0	—	$R_{\text{н}} \rightarrow \infty$
	$U_1 =$	$I_1 =$		$R_1 =$
	$U_2 =$	$I_2 =$		$R_2 =$
	$U_3 =$	$I_3 =$		$R_3 =$

3. Приєднати до схеми джерела постійної напруги G_1 навантаження $R_{\text{н}}$ (рис. 1.3). В якості навантаження задіяти магазин опорів. Увімкнути у схему амперметр послідовно з навантаженням.

4. Зняти дані для побудови вольт-амперної характеристики джерела напруги G_1 . Для цього при трьох різних значеннях опору навантаження виміряти напругу між затискачами джерела $U_{G_1} = U_{12} = U_{\text{н}}$ за допомогою вольтметра і струм через навантаження $I_{\text{н}}$ за допомогою амперметра. Результати досліджень записати у відповідні рядки табл. 1.1.

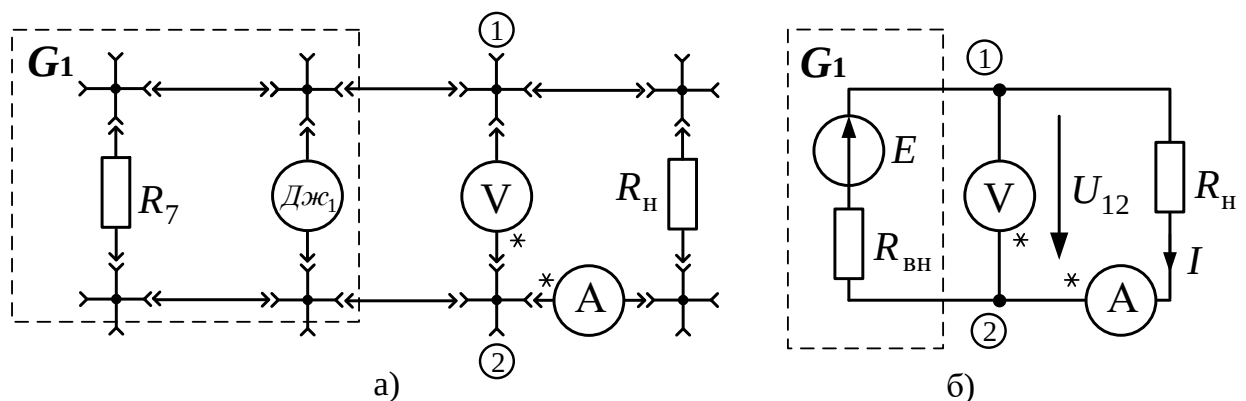


Рис. 1.3. Схема для дослідження вольт-амперних характеристик джерела напруги та резистора навантаження: монтажна (а), заміщення (б)

За рекомендацією викладача виконати пункти 5, 6 робочого завдання:

5. Повторити досліди пунктів 1...4 робочого завдання для джерела постійної напруги G_2 , зібраного із джерела регульованої постійної напруги ДЖ_2 і резистора R_6 .

6. Зняти дані для побудови вольт-амперних характеристик двох резисторів навантаження зі значеннями опорів R_1, R_3 . Для цього змінити 5-7 разів значення напруги регульованого джерела G_2 у схемі, зображеній на рис. 1.3, і записати відповідні покази амперметра.

Обробка результатів експерименту

1. За дослідними даними побудувати вольт-амперну характеристику $U_{G_1}(I)$ джерела постійної напруги G_1 .

2. Розрахувати значення внутрішнього опору $R_{вн}$ джерела постійної напруги G_1 для трьох робочих режимів і записати результати у відповідні рядки табл. 1.1.

3. Нарисувати схему заміщення реального джерела постійної напруги G_1 (рис. 1.1, в) та позначити параметри елементів схеми. Значення внутрішнього опору розрахувати як середнє арифметичне трьох величин, отриманих за дослідними даними.

4. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

За рекомендацією викладача

5. Повторити пункти 1...3 обробки результатів експерименту для регульованого джерела постійної напруги G_2 : побудувати вольт-амперну характеристику, нарисувати схему заміщення та вказати параметри елементів схеми заміщення.

6. За дослідними даними побудувати вольт-амперні характеристики для резисторів навантаження зі значеннями опорів R_1, R_3 : $U_{R_1}(I_n), U_{R_3}(I_n)$.

Методичні вказівки

Сукупність пристроїв, що утворюють шляхи для електричного струму, називають **електричним колом**. Основними елементами електричних кіл є джерела електроенергії, пристрої для її передавання та перетворення параметрів напруг і струмів, а також приймачі електроенергії. **Джерелами електроенергії** називають *пристрої, в яких теплова, хімічна, механічна енергія перетворюється на електричну*. Приймачами є пристрої, в яких електрична енергія перетворюється на інші види енергії: механічну, теплову, хімічну тощо.

В лабораторних роботах першого циклу досліджуються електричні кола з лінійними елементами – елементами, які мають прямолінійні вольт-амперні характеристики (ВАХ). **Вольт-амперна характеристика** – це залежність між струмом, що проходить через елемент, та напругою на його затискачах. ВАХ лінійного приймача електроенергії, наприклад резистора, являє прямою лінію, яка проходить через початок координат (рис. 1.4, а).

Як відомо, рівняння такої прямої $y = k \cdot x$. В координатах напруга-струм ($y = U$, $x = I$) рівняння приймає вигляд

$$U = I \cdot R, \quad (1.1)$$

де коефіцієнтом пропорційності є опір резистора R . Таке співвідношення називають компонентним рівнянням для резистора або законом Ома для пасивної ділянки кола. На рис. 1.4, а надані ВАХ для трьох лінійних резисторів $R_1 > R_2 > R_3$ (при одній і тій самій напрузі U_1 найменший струм I_1 протікає через найбільший опір R_1).

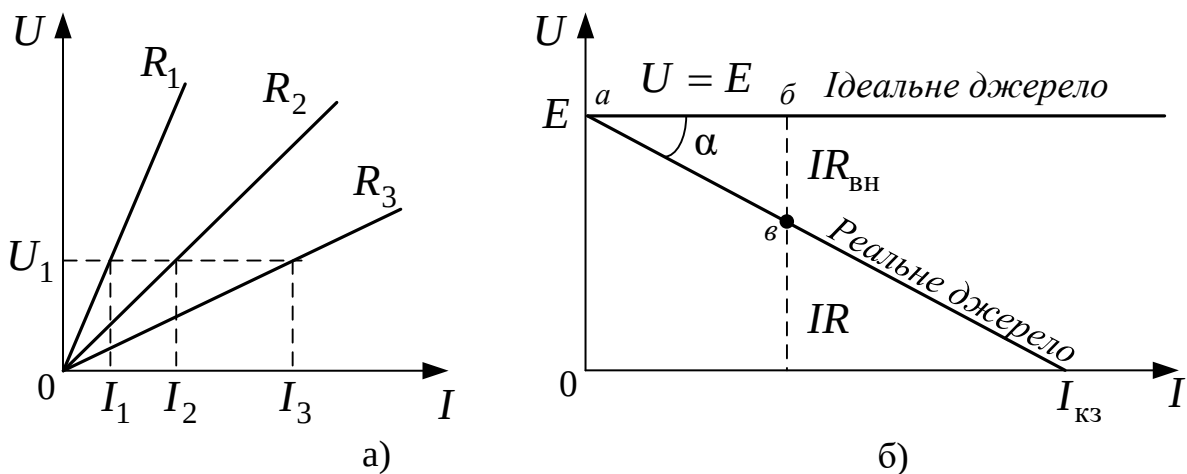


Рис. 1.4. Вольт-амперні характеристики: лінійних резисторів (а), ідеального та реального джерел напруги (б)

Джерело електроенергії характеризується, насамперед, електрорушійною силою (ЕРС) E . **Електрорушійна сила (ЕРС)** – це фізична скалярна величина, яка

чисельно дорівнює роботі сторонніх сил з перенесення одиничного додатного заряду від від'ємного полюса до додатного всередині джерела.

Під дією стороннього електричного поля на затискачах джерела виникає різниця потенціалів. Електрорушійна сила чисельно дорівнює різниці потенціалів між додатним і від'ємним затискачами джерела енергії в режимі неробочого ходу (рис. 1.2). ВАХ реального лінійного джерела зображена на рис. 11.4, б. Це пряма лінія, яка відсікає відрізки на осях.

Рівняння такої прямої має вигляд: $y = k \cdot x + b$, причому коефіцієнт k приймає від'ємне значення. В координатах струму і напруги ВАХ реального джерела напруги записується як рівняння (1.2)

$$U = E - I \cdot R_{\text{вн}}, \quad (1.2)$$

де коефіцієнт $R_{\text{вн}}$ – внутрішній опір джерела.

Із рівняння (1.2) виходить, що за відсутності струму ($I = 0$) напруга на джерелі збігається зі значенням ЕРС. В режимі короткого замикання ($R_{\text{н}} = 0$) через реальне джерело протікає найбільший із можливих струмів – струм короткого замикання $I_{\text{кз}}$, а напруга на клеммах дорівнює нулю ($U = 0$).

У ідеального джерела напруги відсутній внутрішній опір ($R_{\text{вн}} = 0$) і напруга на затискачах не залежить від струму (ВАХ показана на рис. 1.4, б. Напруга на затискачах реального джерела залежить від струму, який протікає через джерело, отже, реальне джерело має внутрішній опір $R_{\text{вн}}$, на якому спостерігається спад напруги $I \cdot R_{\text{вн}}$. Розрахункову формулу для обчислення значення внутрішнього опору отримують із співвідношення (1.2)

$$R_{\text{вн}} = \frac{E - U}{I}. \quad (1.3)$$

Значення внутрішнього опору можна визначити також за вольт-амперною характеристикою (рис. 1.4, б). Якщо прийняти, що m_u – масштаб за віссю напруг, m_i – масштаб за віссю струмів, то $m_u \cdot бв = IR_{\text{вн}}$, $m_i \cdot аб = I$.

Звідки

$$R_{\text{вн}} = \frac{m_u \cdot \text{бв}}{m_i \cdot \text{аб}} = \operatorname{tg} \alpha \cdot k, \text{ де } k = \frac{m_u}{m_i}. \quad (1.4)$$

На рис. 1.3,б зображене найпростіше електричне коло, що складається із джерела G_1 (частина кола всередині пунктирного прямокутника), навантаженого на резистор $R_{\text{н}}$. Резистор приєднаний до джерела з'єднувальними провідниками, малими опорами яких зазвичай нехтують. Через це потенціали вздовж провідників не змінюються, і напруги на джерелі та резисторі однакові $U_{\text{дж}} = U_{\text{н}} = U_{12}$. В контурі протікає один струм $I = I_{\text{н}}$, тому рівняння (11.2) набуває вигляду: $U_{\text{н}} = E - I \cdot R_{\text{вн}}$. Підставляючи у цей вираз компонентне рівняння резистора замість напруги на навантаженні $I \cdot R_{\text{н}} = E - I \cdot R_{\text{вн}}$, можна отримати закон **Ома для нерозгалуженого кола** на рис. 1.3

$$I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}} \quad (1.5)$$

Питання для самостійної роботи

1. Чим різняться вольт-амперні характеристики реального джерела енергії та ідеального джерела напруги?
2. Який вигляд має паралельна схема заміщення реального джерела, до складу якої входить ідеальне джерело струму? Які досліди потрібно виконати для визначення параметрів такої схеми заміщення?
3. Нарисуйте паралельну схему заміщення реального джерела G_1 , скориставшись параметрами отриманої послідовної схеми заміщення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Щерба А.А. Електротехніка / А.А. Щерба, Н.І. Поворознюк. Частина І. Електричні кола: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с., [§ 1.1, § 1.2].

2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Т1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с., [§ 2.1, § 3.1.3].

3. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання / І.А. Петренко: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с., [§ 1.7].

4. Щерба А. А. Електротехніка. ТЕ-1. Електричні та магнітні кола за постійних струмів [Електронний ресурс]: дистанційний курс / А. А. Щерба, І. А. Петренко, І. А. Курило, Г. І. Сторожилова, В. С. Бойко, А. А. Шуляк, І. Н. Намацалюк – 54,24 авт.арк., 22,3 Мб. – Київ: УІТО НТУУ «КПІ», сертифікат НПМ № 2542, 2012. – Лекція 1, § 1.2. Схеми заміщення електричних кіл. Режим доступу до курсу: <http://udec.ntu-kpi.kiev.ua/moodle/course/view/php?id=253>.

Лабораторна робота №2
ЗАКОНИ ОМА ТА КІРХГОФА. ПОТЕНЦІАЛЬНА ДІАГРАМА
ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА

Мета роботи

Перевірити справедливість основних законів електротехніки – законів Ома і Кірхгофа.

Закріпити навички використання цифрового мультиметра в режимах амперметра, вольтметра та омметра.

Навчитися будувати потенціальні діаграми для контурів електричних кіл постійного струму.

Порівняти експериментальні данні з результатами теоретичного аналізу для двох лінійних кіл, нерозгалуженого та розгалуженого.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи необхідно:

3. Ознайомитися з порядком виконання роботи і методичними вказівками.
4. Скласти протокол звіту з лабораторної роботи.
3. Дати відповіді на наступні питання:

а) Як формулюється закон Ома для вітки електричного кола? Для нерозгалуженого кола?

б) Як формулюються перший та другий закони Кірхгофа?

в) Яким чином можна перевірити, чи задовольняють одержані дослідним шляхом струми і напруги перший та другий закони Кірхгофа?

г) Скільки незалежних рівнянь необхідно і достатньо скласти для розгалуженого електричного кола за першим законом Кірхгофа? За другим законом Кірхгофа? Всього?

д) Що являє собою потенціальна діаграма для електричного контура?

е) Як визначити за потенціальною діаграмою напругу між будь-якими двома точками електричного кола? Величину та напрямок струму на ділянці електричного кола?

4. Пригадайте, як дослідним шляхом визначити ЕРС та внутрішній опір джерела напруги (див. лабораторну роботу №1).

Опис лабораторного устаткування

Схеми, що досліджуються, збираються на складальному полі універсального науково-дослідного лабораторного стенда. Живлення обох схем здійснюється від двох джерел $Дж_1$ та $Дж_2$ із блока постійної напруги стенда. Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Для експериментальних досліджень використовують цифровий мультиметр.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 2.1. Умовні позначення $Дж_1$ та $Дж_2$ використані для, відповідно, нерегульованого та регульованого джерел постійної напруги, які розміщені у блоці постійних напруг дослідного стенда. Значення ЕРС E_2 джерела постійної регульованої напруги задає викладач. Резистори R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 – це набірні елементи з незмінними опорами. Під час складання схеми на робочому полі виміряти опори резисторів $R_1 - R_5$ і результати вимірів записати у табл. 2.1.

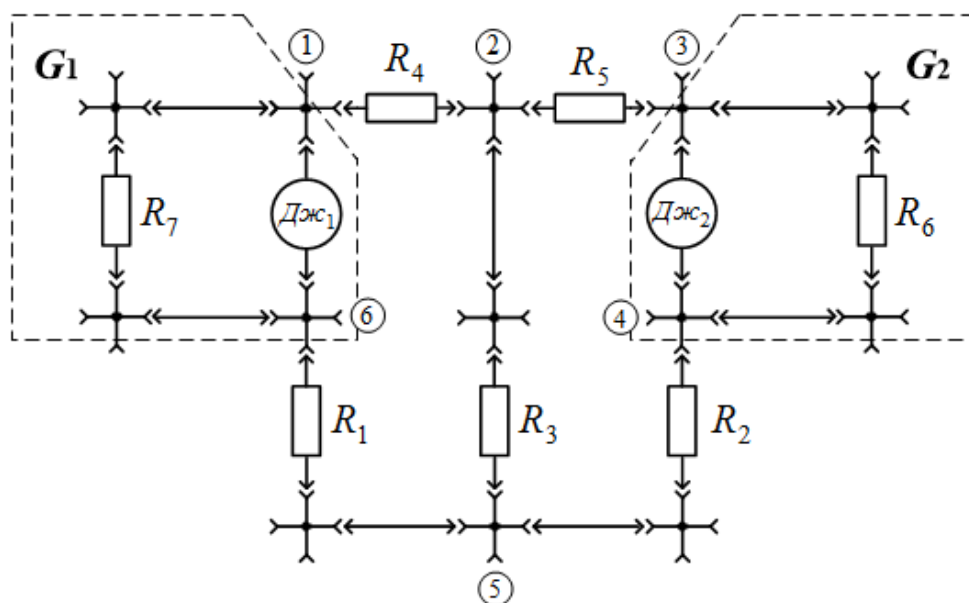


Рис. 2.1. Монтажна схема електричного кола на складальному полі

Таблиця 2.1

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5

2. Вважаючи частини кола, які відмічені штриховими рамками на рис. 2.1, за джерела постійної напруги G_1 та G_2 , виконати досліди для визначення значень параметрів їхніх схем заміщення: ЕРС та внутрішніх опорів (див. лаб. роботу № 1). Експериментальні дані та результати обчислень записати у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

	E	U_H	I_H	$R_{BH} = \frac{E - U_H}{I_H}$
для G_1				
для G_2				

3. Виміряти напруги між пронумерованими точками електричного кола за умови розімкненої та замкненої вітки з резистором R_3 (рис. 2.2). Значення напруг записати у відповідні рядки табл. 2.3. Перевірити виконання другого закону Кірхгофа для контурів обох електричних кіл: нерозгалуженого кола (за умови розімкненого ключа-перемички Π_3) та розгалуженого кола (за умови замкненого ключа-перемички Π_3).

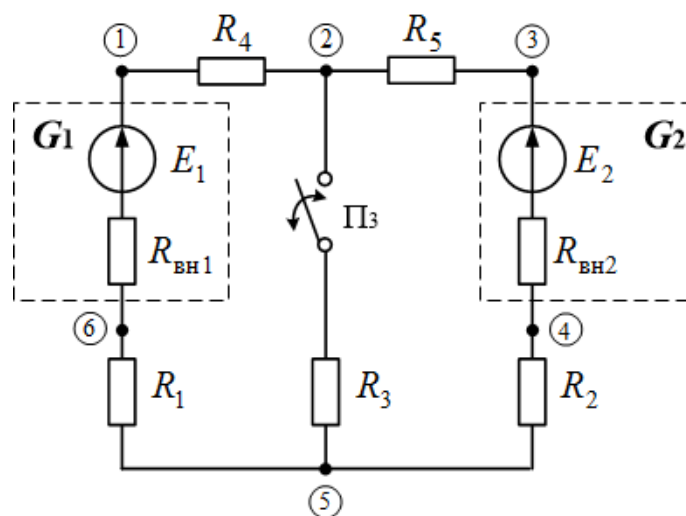


Рис. 2.2. Схема заміщення електричного кола

Таблиця 2.3

Положення ключа- перемички П ₃	Вид роботи	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}	U_{56}	U_{61}	$\sum U_{ij}$
Розімкнений	Дослід							
	Розрахунок							
Замкнений	Дослід							
	Розрахунок							

4. Виміряти потенціали всіх пронумерованих точок кола (рис. 2.2) відносно опорної $\varphi_i = 0$ за умови розімкненого і замкненого ключа П₃. Номер опорного вузла зазначає викладач. Значення потенціалів записати у табл. 2.4. Вирахувати напруги на ділянках кола як різниці потенціалів (наприклад, $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$), записати результати у табл. 2.4 та порівняти з результатами вимірів напруг із табл. 2.3.

Таблиця 2.4

Положення ключа	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}	U_{56}	U_{61}
Розімкнений												
Замкнений												

5. Довільно обрати напрями струмів у вітках кола і указати їх на схемі заміщення кола (рис. 2.2). Виміряти струми у вітках кола згідно з обраним напрямом за умови розімкненого вимикача П₃ (нерозгалужене коло) і замкненого вимикача П₃ (розгалужене коло). Значення струмів записати у таблицю 2.5. Перевірити виконання першого закону Кірхгофа в обох колах.

Таблиця 2.5

Положення ключа	Вид роботи	I_1	I_2	I_3	$\pm \sum I_i$
Розімкнений	Дослід				
	Розрахунок				
Замкнений	Дослід				
	Розрахунок				

Обробка результатів експерименту

1. Для нерозгалуженого електричного кола (схема на рис. 2.2. за умови розімкненого ключа P_3):
 - а) Записати рівняння Ома для нерозгалуженого кола і розрахувати струм у колі за вимірними параметрами компонентів кола (табл. 2.1, 2.2). Записати отриманий результат у відповідний рядок табл. 2.5 та порівняти з дослідним значенням;
 - б) Розрахувати напруги на елементах кола і потенціали пронумерованих точок кола, використовуючи розраховане значення струму. Результати розрахунків записати у відповідні рядки табл. 2.3 та 2.4 і порівняти з результатами лабораторних досліджень;
 - с) Побудувати потенціальну діаграму.
2. Для розгалуженого електричного кола (схема на рис. 2.2 за умови замкненого ключа P_3):
 - а) Визначити сили струмів у кожній вітці електричного кола за законом Ома для пасивної ділянки кола та ділянки з джерелом ЕРС, скориставшись даними про параметри елементів кола та потенціали вузлів ② і ⑤ (табл. 2.1, 2.2, 2.4). Записати отримані результати у відповідний рядок табл. 2.5 та порівняти з дослідними значеннями;
 - б) Записати рівняння математичної моделі кола за законами Кірхгофа і розрахувати струми у вітках кола. Порівняти розрахункові значення струмів з результатами лабораторних досліджень (табл. 2.5);

- в) Розрахувати напруги на елементах кола і потенціали пронумерованих точок кола, використовуючи розраховані значення струмів у вітках кола та дані про параметри елементів. Результати розрахунків записати у відповідні рядки табл. 2.3 та 2.4 і порівняти з результатами лабораторних досліджень;
- г) Побудувати потенціальну діаграму для контура з двома джерелами ЕРС.

3. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Методичні вказівки

Для вимірювань сили струмів у вітках і напруг на ділянках електричного кола у лабораторії кафедри теоретичної електротехніки використовують спеціальний прилад – **цифровий мультиметр**. Перевагами цифрових приладів є малі похибки у широкому діапазоні вимірювань та індикація результатів у цифровому вигляді. У **режимі амперметра** мультиметр вмикають у коло послідовно з елементами вітки, струм через яку слід виміряти (у розрив вітки замість перемички). Внутрішній опір приладу незначний. На рис. 2.3, а наведена схема вимірювання сили струму I у колі постійного струму прилад вмикають від'ємною клемою у напрямі струму, що вимірюється (рис. 2.3, а). Від'ємна клемма мультиметра позначена зірочкою на передній панелі мультиметра.

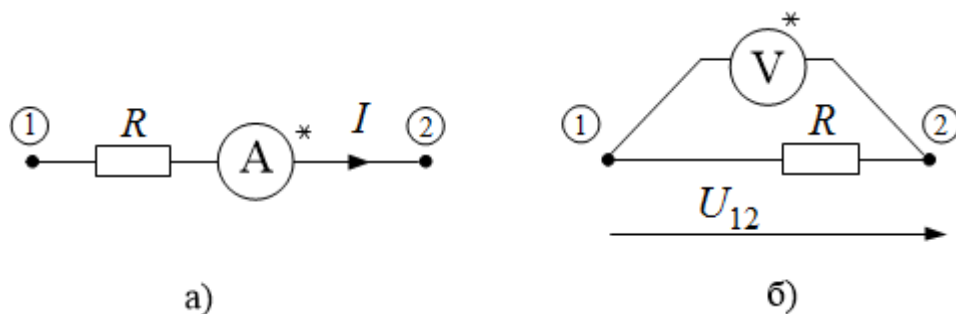


Рис. 2.3. Увімкнення вимірювальних приладів у коло постійного струму:
амперметра (а), вольтметра (б)

У **режимі вольтметра** мультиметр вмикають між вузлами кола (паралельно елементам). Внутрішній опір приладу великий. У колах постійного струму вольтметр вмикають від'ємною клемою до кінцевої точки шляху визначення напруги (рис. 2.3, б).

У режимі омметра мультиметр вмикають між вихідними вузлами пасивного двополюсника. Омметром не можна виміряти опір активного двополюсника.

Фундаментальними (основними) законами теорії електричних кіл називають закон Ома і закони Кірхгофа (перший і другий), які лежать в основі всіх методів аналізу електричних кіл.

Закон Ома встановлює зв'язок між електричним струмом і напругою на ділянці кола за умови однорідного поля і прямолінійного провідника з визначеним опором.

Закон Ома для вітки кола з джерелом ЕРС: сила струму на нерозгалуженій ділянці електричного кола визначається як частка від ділення різниці потенціалів на кінцях ділянки і алгебраїчної суми ЕРС джерел живлення, які входять до складу цієї ділянки, на арифметичну суму послідовно увімкнених опорів цієї ділянки

$$I_{ab} = \frac{\varphi_a - \varphi_b \pm \sum_s E_s}{\sum_k R_k}. \quad (2.1)$$

У чисельнику виразу (2.1) значення ЕРС враховуються з додатними знаками, якщо напрями струму і ЕРС співпадають, і з від'ємними, якщо струм і ЕРС спрямовані назустріч.

Часткові випадки

1) **Закон Ома для пасивної ділянки кола** (без джерел ЕРС)

$$I_{ab} = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{\sum_k R_k}. \quad (2.2)$$

2) **Закон Ома для одноконтурного кола** для визначення струму у нерозгалуженому колі, яке складається із послідовно увімкнених джерел напруги і резисторів

$$I_{ab} = \frac{\mp \sum_s E_s}{R_1 + R_2 + R_3}. \quad (2.3)$$

Перший закон Кірхгофа формулюється для вузла електричного кола: алгебраїчна сума струмів у всіх вітках кола, приєднаних до будь-якого вузла

електричного кола, дорівнює нулеві

$$\pm \sum_k I_k = 0, \quad (2.4)$$

де k – кількість віток, приєднаних до вузла.

Знаки в алгебраїчній сумі залежать від напрямку струмів: струмам, що спрямовані до вузла, приписують один знак, а струмам, спрямованим від вузла, – інший. Інакше кажучи, сума струмів, що підходять до вузла, дорівнює сумі струмів, які відходять від вузла.

Другий закон Кірхгофа формулюється для контура електричного кола:
алгебраїчна сума напруг на ділянках будь-якого контура дорівнює нулеві

$$\pm \sum_k U_k = 0, \quad (2.5)$$

де k – кількість віток, що складають контур.

Для того щоб записати рівняння згідно з другим законом Кірхгофа, необхідно:

- 1) Довільно спрямувати струми у вітках кола.
- 2) Довільно обрати напрям обходу контура.
- 3) Записати суму напруг на всіх елементах кола.

Напруги на пасивних елементах кола ураховуються з додатним знаком, якщо напрям обходу вітки збігається з напрямом струму, і з від'ємним, якщо напрям обходу спрямований назустріч струму. Напруги на джерелах ЕРС записуються згідно з їх визначенням: напруга проти напрямку стрілки на умовному зображенні джерела напруги дорівнює ЕРС.

Лабораторна робота передбачає, що студенти мають упевнитись в справедливості першого та другого законів Кірхгофа, скориставшись рівняннями (2.4) та (2.5). Слід зауважити, що результатом перевірки дослідних даних може бути ненульове значення алгебраїчної суми внаслідок похибок вимірювань, обумовлених точністю мультиметра.

Для теоретичного аналізу доцільно використовувати інше формулювання другого закону Кірхгофа: *алгебраїчна сума миттєвих значень напруг на пасивних елементах контура дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень ЕРС джерел, що діють у контурі*

$$\pm \sum_k U_k = \pm \sum_s E_s. \quad (2.6)$$

У лівій частині співвідношення (2.6), як й у формулі (2.5), записують суму спадів напруг на пасивних елементах кола, а праворуч – алгебраїчну суму ЕРС джерел енергії. Якщо напрями обходу контура і джерела збігаються, то значення ЕРС враховується у правій частині рівняння з додатним знаком, якщо ні – з від’ємним.

Потенціальна діаграма – це графік розподілу потенціалів вздовж певної ділянки кола або контура. За віссю абсцис відкладають послідовно опори ділянок кола між зазначеними точками, а за віссю ординат – потенціали відповідних точок кола. Потенціальну діаграму можна побудувати, скориставшись результатами вимірювань значень потенціалів точок або результатами розрахунку цих потенціалів.

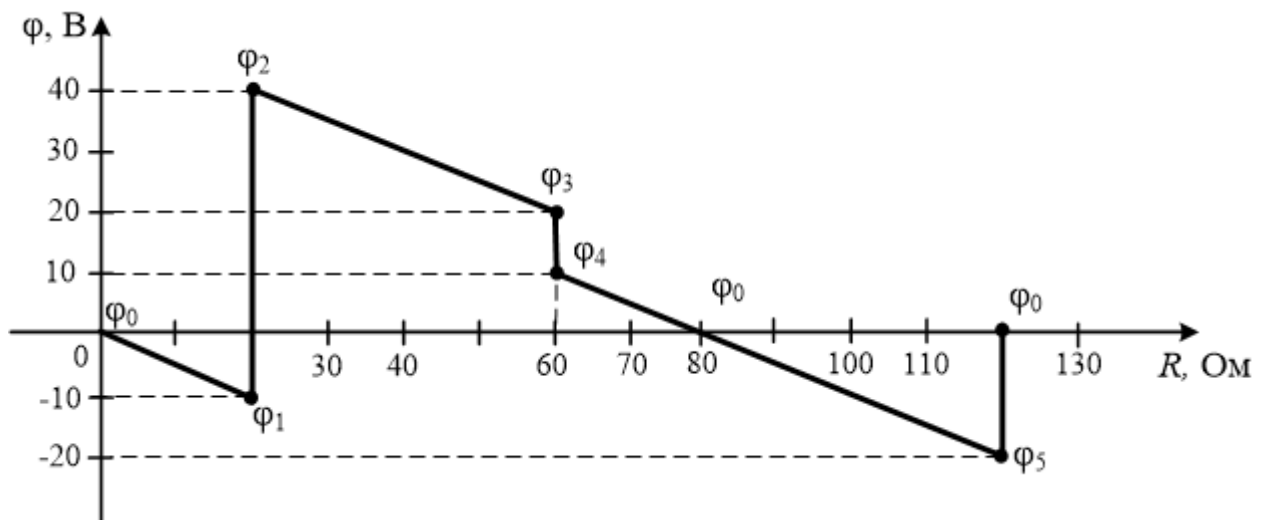


Рис. 2.4. Потенціальна діаграма для нерозгалуженого кола

Послідовність побудови потенціальної діаграми:

1. Обрати напрямок обходу контуру (вітки);
2. Позначити буквами або цифрами точки контуру (вітки);
3. Обрати масштаб для опорів і масштаб для потенціалів;

4. На осі абсцис відмітити відрізки, довжини яких в масштабі відповідають величинам опорів окремих ділянок контуру (вітки), дотримуючись послідовності розташування цих ділянок в електричному колі;
5. Позначити для відмічених кінців відрізків ординати, які в масштабі пропорційні потенціалам відповідних точок електричного кола;
6. З'єднати побудовані точки прямими лініями.

За наданою потенціальною діаграмою, окрім потенціалу будь-якої точки контуру (вітки), можна визначити напругу між будь-якими точками (як різницю потенціалів) та величину і напрямок струму на окремій ділянці кола.

Значення струму визначається тангенсом кута нахилу лінії потенціальної діаграми для певної ділянки кола α

$$I = \operatorname{tg} \alpha \frac{m_{\varphi}}{m_R}, \quad (2.7)$$

де m_{φ} – масштаб за віссю потенціалів;

m_R – масштаб за віссю опорів ділянок кола.

Якщо $\alpha < 0$, то струм за напрямом обходу ділянки приймає додатні значення, якщо $\alpha > 0$ – від'ємні значення.

Питання для самостійної роботи

1. Скільки незалежних рівнянь необхідно і достатньо скласти для розгалуженого електричного кола, у складі схеми заміщення якого є одне ідеальне джерело струму, за першим законом Кірхгофа? За другим законом Кірхгофа? Всього?

2. Як зміниться потенціальна діаграма, якщо за опорну обрати іншу точку електричного кола?

3. Нерозгалужене електричне коло має потенціальну діаграму, зображену на рис. 12.4. Визначити характер елементів, увімкнених на всіх ділянках кола, та їхні параметри. Намалювати схему заміщення відповідного електричного кола. Визначити силу струму, що протікає в електричному колі.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Щерба А.А. Електротехніка / А.А. Щерба, Н.І. Поворознюк. Частина І. Електричні кола: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с., [§ 1.3, § 1.4.5].
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Т1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с., [§ 1.7, § 5.4.1].
3. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання / І.А. Петренко: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с., [§ 1.9].
4. Щерба А.А. Електротехніка. ТЕ-1. Електричні та магнітні кола за постійних струмів [Електронний ресурс]: дистанційний курс / А. А. Щерба, І. А. Петренко, І. А. Курило, Г. І. Сторожилова, В. С. Бойко, А. А. Шуляк, І. Н. Намацалюк – 54,24 авт.арк., 22,3 Мб. – Київ: УІТО НТУУ «КПІ», сертифікат НПМ № 2542, 2012. – Лекція 1, § 1.3. Основні закони електричних кіл; Практичне заняття 1, задача 1.2; Лекція 3, § 3.1. Метод струмів та напруг кола. Режим доступу до курсу: <http://udec.ntu-kpi.kiev.ua/moodle/course/view.php?id=253>.

Лабораторна робота №3
ЕКВІВАЛЕНТНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПАСИВНИХ ДІЛЯНОК
ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Мета роботи

Перевірити справедливість співвідношень, що використовують для розрахунку еквівалентних опорів для послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів.

Здійснити еквівалентні перетворення резисторів, які утворюють сторони несиметричного трикутника на сполучення резисторів «зіркою».

Здійснити еквівалентні перетворення сполучення резисторів симетричною «зіркою» на сполучення резисторів «трикутником».

Порівняти експериментальні данні з результатами теоретичного аналізу лінійного кола, здійснивши розрахунки методами контурних струмів та вузлових потенціалів.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи необхідно:

5. Ознайомитися з порядком виконання роботи і методичними вказівками.
6. Скласти протокол звіту з лабораторної роботи.
3. Дати відповіді на наступні питання:

а) Яку дію називають еквівалентним перетворенням електричного кола? Які види еквівалентних перетворень Ви знаєте?

б) Як замінити два послідовно увімкнених опори одним еквівалентним? Два паралельно увімкнених?

в) Яке сполучення опорів електричного кола називається «зіркою»? «Трикутником»?

г) Як замінити з'єднання опорів «зіркою» на еквівалентний «трикутник»? «Трикутник» на еквівалентну «зірку»?

д) Яким чином можна упевнитись в еквівалентності перетворення частини електричного кола?

Опис лабораторного устаткування

Схеми, що досліджуються, збираються на складальному полі універсального науково-дослідного лабораторного стенда. Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Схеми збирають із застосуванням трьох магазинів опорів, набірних резисторів та з'єднувальних проводів. Живлення схем для дослідження еквівалентних перетворень сполучень опорів «зірка-трикутник» здійснюється від джерела керованої напруги $D_{ж2}$ із блока постійної напруги стенда. Для експериментальних досліджень використовують цифровий мультиметр в режимах омметра, амперметра та вольтметра.

Порядок виконання роботи

1. Значення опорів резисторів R_{12} , R_{23} , R_{31} , які задає викладач, слід записати у рядки табл. 3.1. В якості резисторів з номіналами R_{12} , R_{23} , R_{31} використати магазини опорів (два магазини розміщені у правій тумбі науково-дослідного стенда, третій магазин – переносний).

Таблица 3.1

R_{12}	R_{23}	R_{31}

2. З'єднати три резистори R_{12} , R_{23} , R_{31} послідовно (рис. 3.1, а), потім паралельно (рис. 3.1, б) та мішано (рис. 3.1, в). Виміряти еквівалентний опір кожного сполучення резисторів за допомогою мультиметра у режимі омметра і записати значення у табл. 3.2.

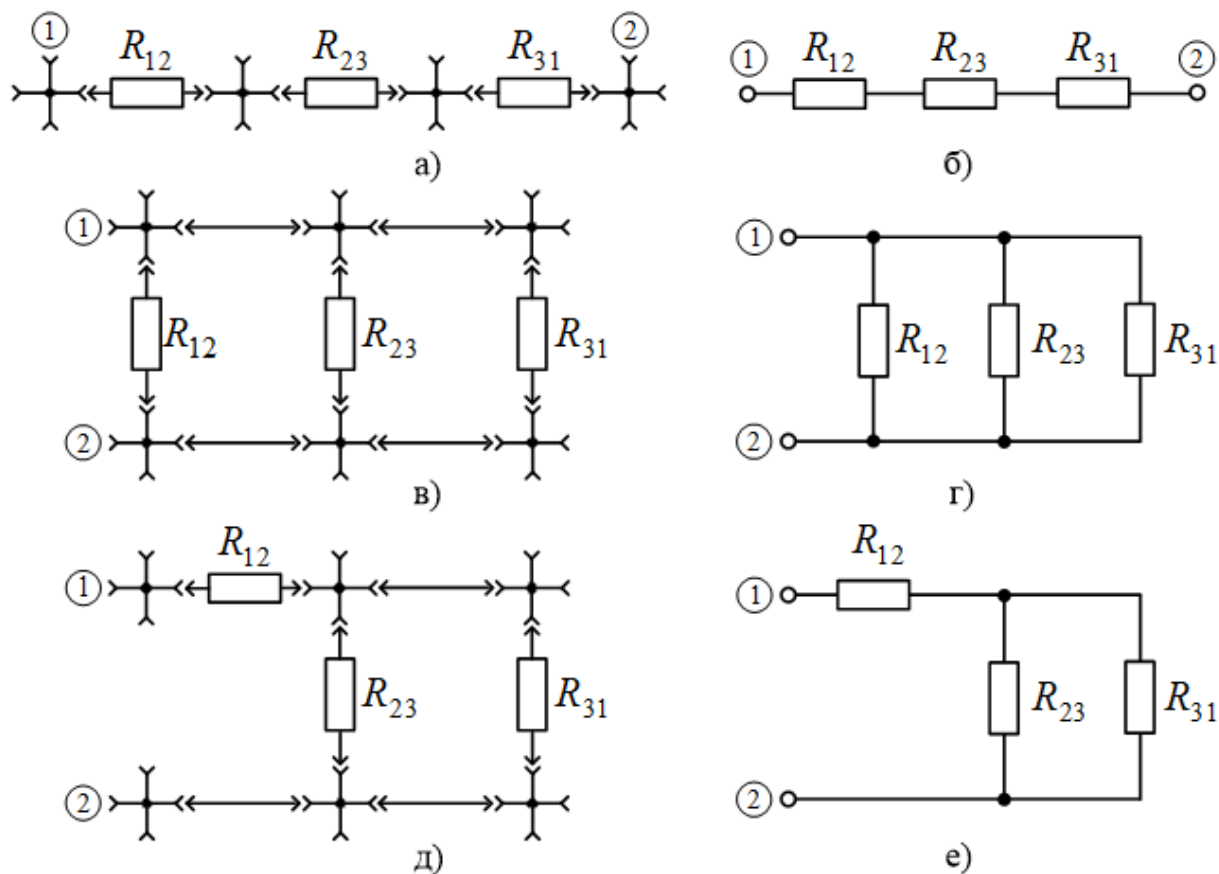


Рис. 3.1. Послідовне (а), (б), паралельне (в), (г) і мішане сполучення резисторів (д), (е)

Таблиця 3.2

Тип сполучення резисторів	Еквівалентний опір сполучення резисторів		
	Показ омметра	Розрахункова формула	Результат обчислення
Послідовно			
Паралельно			
Мішано			

3. Скласти електричне коло, в якому три резистори R_{12} , R_{23} , R_{31} сполучені «трикутником» (рис. 3.2, а). Значення напруги U_{14} між затискачами регульованого джерела напруги $Дж_2$, навантаженого на пасивне коло, задає викладач. Потрібно виміряти омметром значення опорів резисторів R_1 , R_2 і записати разом з величиною U_{14} у таблицю 3.3. Довільно спрямувати струми I_1 , I_2 , I_3 у трьох вітках, які є зовнішньою частиною електричного кола щодо сполучення резисторів R_{12} , R_{23} ,

R_{31} «трикутником», і позначити напрями струмів на схемі заміщення, наприклад як на рис. 3.2, б).

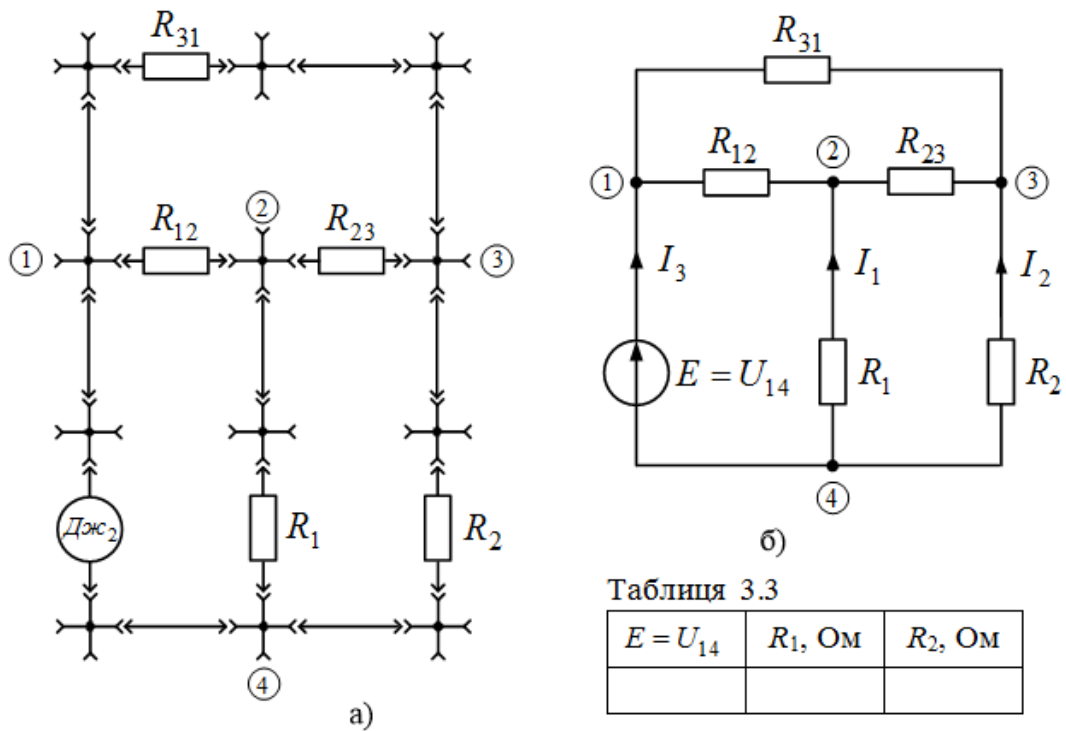


Рис. 3.2. Схема кола, в якому резистори R_{12} , R_{23} , R_{31} з'єднані «трикутником»: монтажна (а), схема заміщення з довільно спрямованими струмами (б)

4. Виміряти напруги U_{12} , U_{23} , U_{31} між вершинами трикутника ①, ②, ③ та вхідні щодо «трикутника» струми I_1 , I_2 , I_3 згідно з обраними напрямками. Результати вимірювань записати у перший рядок табл. 3.4. Обов'язково указати значення опорів резисторів R_{12} , R_{23} , R_{31} .

Таблиця 3.4

Тип сполучення резисторів	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
Трикутник:						
$R_{12} =$, $R_{23} =$, $R_{31} =$						
Зірка:						
$R_{01} =$, $R_{02} =$, $R_{03} =$						

5. Здійснити еквівалентне перетворення сполучення резисторів R_{12} , R_{23} , R_{31} «трикутником» на сполучення «зіркою» резисторів R_{01} , R_{02} , R_{03} , значення опорів яких потрібно розрахувати і записати у перший стовпець табл. 3.4.

6. Скласти електричне коло, в якому три резистори R_{01} , R_{02} , R_{03} сполучені «зіркою» (рис. 3.3). Виміряти напруги U_{12} , U_{23} , U_{31} між вузлами ①, ②, ③ та вхідні щодо «зірки» струми I_1 , I_2 , I_3 . Результати вимірювань записати у другий рядок табл. 3.4. та порівняти з результатами вимірів у схемі на рис. 3.2. Упевнитись в тому, що здійснено еквівалентне перетворення.

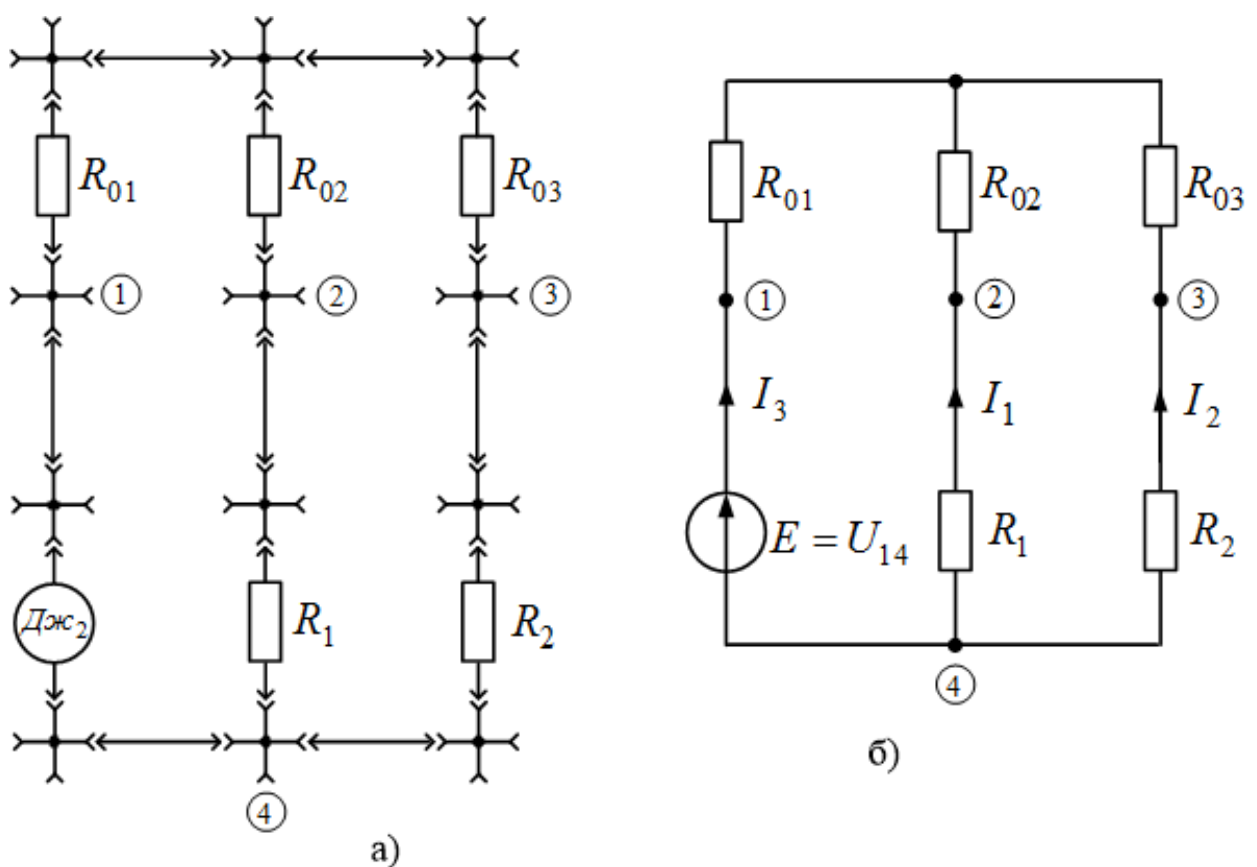


Рис. 3.3. Схема кола, в якому резистори R_{01} , R_{02} , R_{03} сполучені «зіркою»: монтажна (а), схема заміщення (б)

7. Отримати у викладача інформацію щодо значень опорів резисторів R_{01} , R_{02} , R_{03} , сполучених на симетричну «зірку» (рис. 3.3), і записати ці значення у перший стовпчик табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Тип сполучення резисторів	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
Симетрична зірка: $R_{01} =$, $R_{02} =$, $R_{03} =$						
Симетричний трикутник: $R_{12} =$, $R_{23} =$, $R_{31} =$						

8. Виміряти напруги U_{12} , U_{23} , U_{31} між кінцями «променів зірки» ①, ②, ③ та вхідні струми I_1 , I_2 , I_3 . Результати вимірювань записати у перший рядок табл. 3.5.

9. Здійснити еквівалентне перетворення симетричної «зірки» на симетричний «трикутник» (рис. 3.2) із резисторів з опорами R_{12} , R_{23} , R_{31} , значення яких треба обчислити та записати у перший стовпець табл. 3.5.

10. Скласти електричне коло, в якому три резистори R_{12} , R_{23} , R_{31} сполучені симетричним «трикутником» (рис. 3.2). Виміряти напруги U_{12} , U_{23} , U_{31} між вершинами трикутника ①, ②, ③ та вхідні струми I_1 , I_2 , I_3 . Результати вимірювань записати у другий рядок табл. 3.5 та упевнитись, що здійснено еквівалентне перетворення.

Обробка результатів експерименту

1. Розрахувати опори послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів R_{12} , R_{23} , R_{31} (рис. 3.1) з номіналами, заданими викладачем (табл. 3.1). Розрахункові формули та результати обчислень записати у табл. 3.2. Порівняти отримані результати з вимірними у п.1 значеннями.

2. Розрахувати сили струмів I_1 , I_2 , I_3 у схемі, де три резистори з різними номіналами R_{12} , R_{23} , R_{31} сполучені «трикутником» (рис. 3.2, б), методами контурних струмів та вузлових потенціалів. Зважаючи на малий опір регульованого джерела напруги $D_{ж2}$, вважати, що електричне коло живиться від ідеального джерела напруги з $E = U_{14}$.

3. Порівняти результати розрахунків з результатами лабораторних досліджень (табл. 3.4).

4. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Методичні вказівки

Розрахунок електричного кола у багатьох випадках можна значно полегшити, якщо застосувати еквівалентні перетворення. **Еквівалентним перетворенням** називають *заміну будь-якої частини кола на іншу схемну реалізацію з відмінною структурою і параметрами елементів за умови, що така заміна не призводить до зміни струмів та напруг у тій частині кола, яка не перетворюється*.

Еквівалентні перетворення зменшують кількість віток або (і) вузлів схеми, а отже, і кількість рівнянь, що визначають її електричний стан. Особливу значущість набувають еквівалентні перетворення під час аналізу простих кіл, до складу яких входить лише одне джерело енергії й елементи, що з'єднані між собою послідовно, паралельно, зіркою або трикутником. Розрахунок струмів і напруг на ділянках простих кіл найчастіше виконують методом еквівалентних перетворень (згортки).

На першому етапі схему заміщення кола спрощують до одного контура з ідеальним джерелом напруги або до двоконтурної схеми з ідеальним джерелом струму, а на другому етапі розгортають спрощену схему до вихідної структури.

Зауваження. Вочевидь, що просте коло, як і будь-яке складне з кількома джерелами енергії, можна проаналізувати класичними методами контурних струмів та вузлових потенціалів.

Основними видами еквівалентних перетворень пасивних ділянок електричних кіл є заміна одним еквівалентним опором послідовно або паралельно увімкнених резисторів та взаємозаміна сполучення трьох резисторів «трикутником» на з'єднання трьох резисторів «зіркою».

Резистори з'єднані **послідовно**, якщо через всі елементи проходить один і той самий струм. При послідовному з'єднанні елементів їх опори додаються арифметично:

$$R_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^n R_k. \quad (3.1)$$

Резистори з'єднані **паралельно**, якщо до елементів прикладена одна і та сама напруга. При паралельному з'єднанні елементів їх провідності додаються арифметично:

$$G_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^n G_k. \quad (3.2)$$

Якщо до пари вузлів приєднані тільки два опори, формула для розрахунку еквівалентного опору набуває вигляду:

$$R_{\text{екв}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.3)$$

Сполучення трьох резисторів, які утворюють сторони трикутника, називають «трикутником» (рис. 3.4, а). «Зірка» – це з'єднання трьох резисторів, яке має вигляд трипроменевої зірки (рис. 3.4, б). У вузлах ①, ②, ③ «зірка» і «трикутник» зв'язані з рештою схеми.

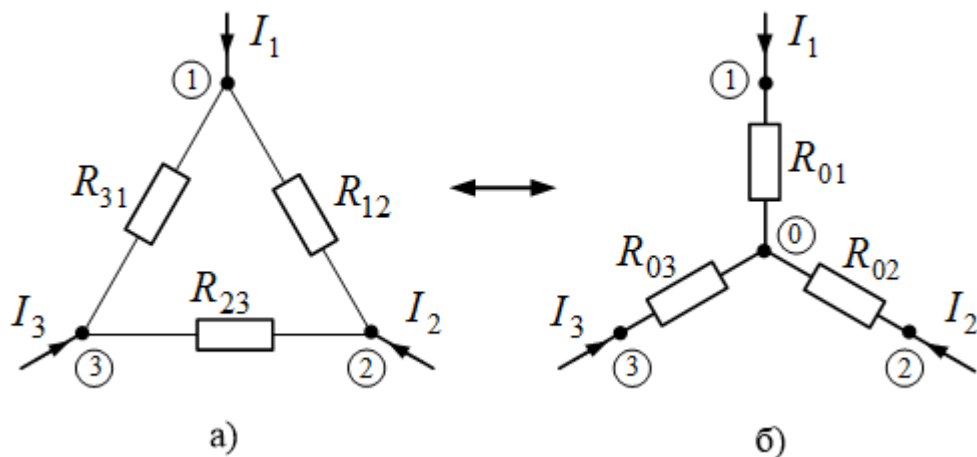


Рис. 3.4. Схема заміщення частини кола: сполучення трьох резисторів «трикутником» (а), «зіркою» (б)

Правило еквівалентного перетворення «трикутника» опорів на «зірку»:

Опір променя зірки, приєданого до вузла a , визначається як добуток двох опорів віток трикутника, прилеглих до вузла a , поділений на суму опорів усіх трьох віток трикутника:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (3.4)$$

Правило еквівалентного перетворення «зірки» опорів на «трикутник»:

Опір сторони трикутника між вузлами a і b дорівнює сумі опорів променів зірки, прилеглих до вузлів a і b , та їхнього добутку, поділеному на опір третього променя зірки:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}, R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}, R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}. \quad (3.5)$$

Резистори з'єднані **мішано**, якщо деякі із сукупності резисторів з'єднані послідовно, деякі паралельно, а деякі, можливо, «трикутником» або «зіркою». Еквівалентний опір кола з мішаним з'єднанням резисторів відносно вхідних затискачів розраховується поетапно – схема нібито згортається до одного еквівалентного елемента. Розпочинати згортання слід з еквівалентних перетворень елементів, увімкнених якнайдалі від вхідних затискачів.

Питання для самостійної роботи

1. Як перетворити активну «зірку» (рис. 3.5, а) на активний «трикутник» (рис. 3.5, б)?
2. Як перетворити активний «трикутник» (рис. 3.5, б) на активну «зірку» (рис. 3.5, а)?

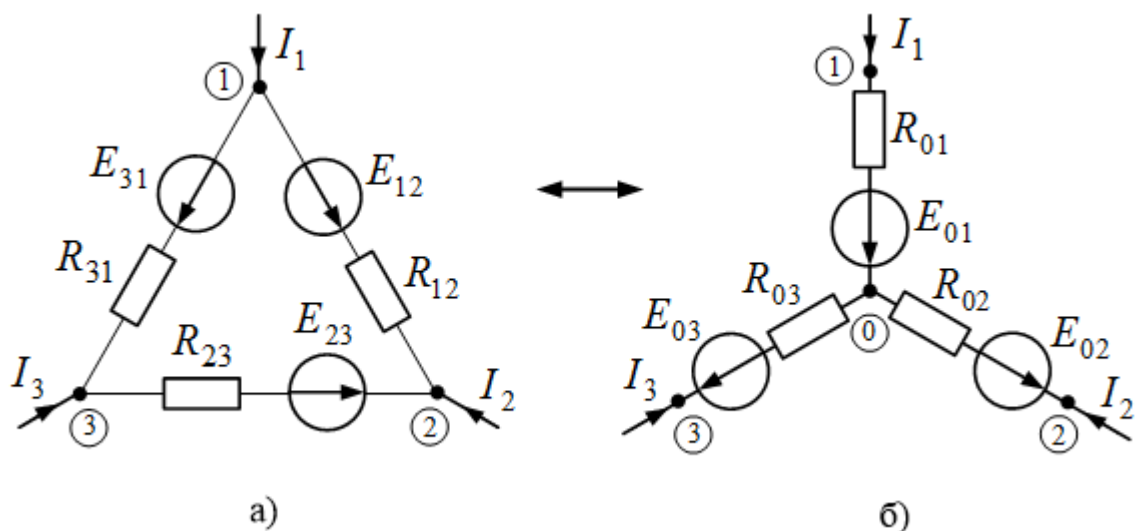


Рис. 3.5. Схема заміщення частини кола: сполучення трьох активних віток «зіркою» (а), сполучення трьох активних віток «трикутником» (б)

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Щерба А.А. Електротехніка / А.А. Щерба, Н.І. Поворознюк. Частина І. Електричні кола: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с., [§§ 1.4.2, 1.4.6, 1.4.7].
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Т1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с., [§§ 4.1, 4.2, 5.4.2, 5.4.3].
3. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання / І.А. Петренко: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с., [§§ 2.1, 2.5, 2.6].
4. Щерба А. А. Електротехніка. ТЕ-1. Електричні та магнітні кола за постійних струмів [Електронний ресурс]: дистанційний курс / А. А. Щерба, І. А. Петренко, І. А. Курило, Г. І. Сторожилова, В. С. Бойко, А. А. Шуляк, І. Н. Намацалюк – 54,24 авт.арк., 22,3 Мб. – Київ: УІТО НТУУ «КПІ», сертифікат НПМ № 2542, 2012. – Лекція 2, § 2.1.1. Еквівалентні перетворення пасивних ділянок електричних кіл; Лекція 3, § 3.2. Метод контурних струмів; § 3.3. Метод вузлових потенціалів; Практичне заняття 2, задача 2.1; Практичне заняття 3, задачі 3.1, 3.4, 3.5. Режим доступу до курсу: <http://udec.ntu-kpi.kiev.ua/moodle/course/view/php?id=253>.

Лабораторна робота №4

МЕТОД НАКЛАДАННЯ

Мета роботи

Перевірити справедливість принципу накладання (суперпозиції) дії джерел напруги у лінійних електричних колах.

Навчитися визначати вхідні та взаємні провідності віток і вхідні та взаємні коефіцієнти передачі напруги за результатами досліджень (розрахунків) лінійних кіл.

Порівняти експериментальні данні з результатами аналізу лінійних кіл методом накладання.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи необхідно:

7. Ознайомитися з порядком виконання роботи і методичними вказівками.
8. Скласти протокол звіту з лабораторної роботи.
9. Дати відповіді на наступні питання:
 - а) Як формулюється принцип накладання для електричних кіл?
 - б) Для розрахунків яких кіл не можна застосовувати метод накладання?
 - в) Яким чином за відомими частковими (обумовленими дією одного джерела енергії) струмами та напругами визначають струми та напруги окремих ділянок електричного кола?
 - г) Як визначаються вхідні та взаємні провідності й вхідні та взаємні коефіцієнти передачі напруги віток електричного кола?
 - д) Чи можна за відомими частковими потужностями визначати підсумкові потужності ділянок електричного кола?
10. Пригадайте, як дослідним шляхом визначити ЕРС та внутрішній опір джерела напруги (див. лабораторну роботу № 1).

Опис лабораторного устаткування

Схеми, що досліджуються, збираються на складальному полі універсального науково-дослідного лабораторного стенда. Живлення схеми здійснюється від двох джерел $Дж_1$ та $Дж_2$ із блока постійної напруги стенда. Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Для експериментальних досліджень потрібно скористатися цифровим мультиметром (клас точності 3).

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 4.1. Умовні позначення джерел енергії $Дж_1$ та $Дж_2$ використані для, відповідно, некерованого та керованого джерел постійної напруги, які розміщені у блоці постійних напруг дослідного стенда. Значення ЕРС E_2 джерела постійної регульованої напруги задає викладач. Під час складання схеми здійснити вимірювання опорів набірних резисторів $R_1 - R_3$ та записати дані у табл. 4.1.

2. Вважаючи частини кола, які відмічені штриховими рамками на рис. 4.1, за джерела постійної напруги G_1 та G_2 , виконати досліди для визначення значень параметрів їхніх схем заміщення: ЕРС та внутрішніх опорів (див. лаб. роботу №1). Експериментальні дані та результати обчислень записати у табл. 4.2.

3. Залишити в схемі одне джерело напруги G_1 , а кероване джерело G_2 замінити резистором з номіналом, що дорівнює внутрішньому опору $R_{вн2}$ (рис. 4.2,а). Довільно спрямувати струми у вітках схеми та позначити стрілками на схемі заміщення. Виміряти сили часткових струмів у всіх вітках схеми відповідно до обраних напрямів та часткові напруги на резисторах R_1, R_2, R_3 (наприклад, I_{21} та U_{21} заданого напрямку на рис. 4.2, б). Дані дослідів записати у табл. 4.3 в рядок «діє джерело G_1 , дослід».

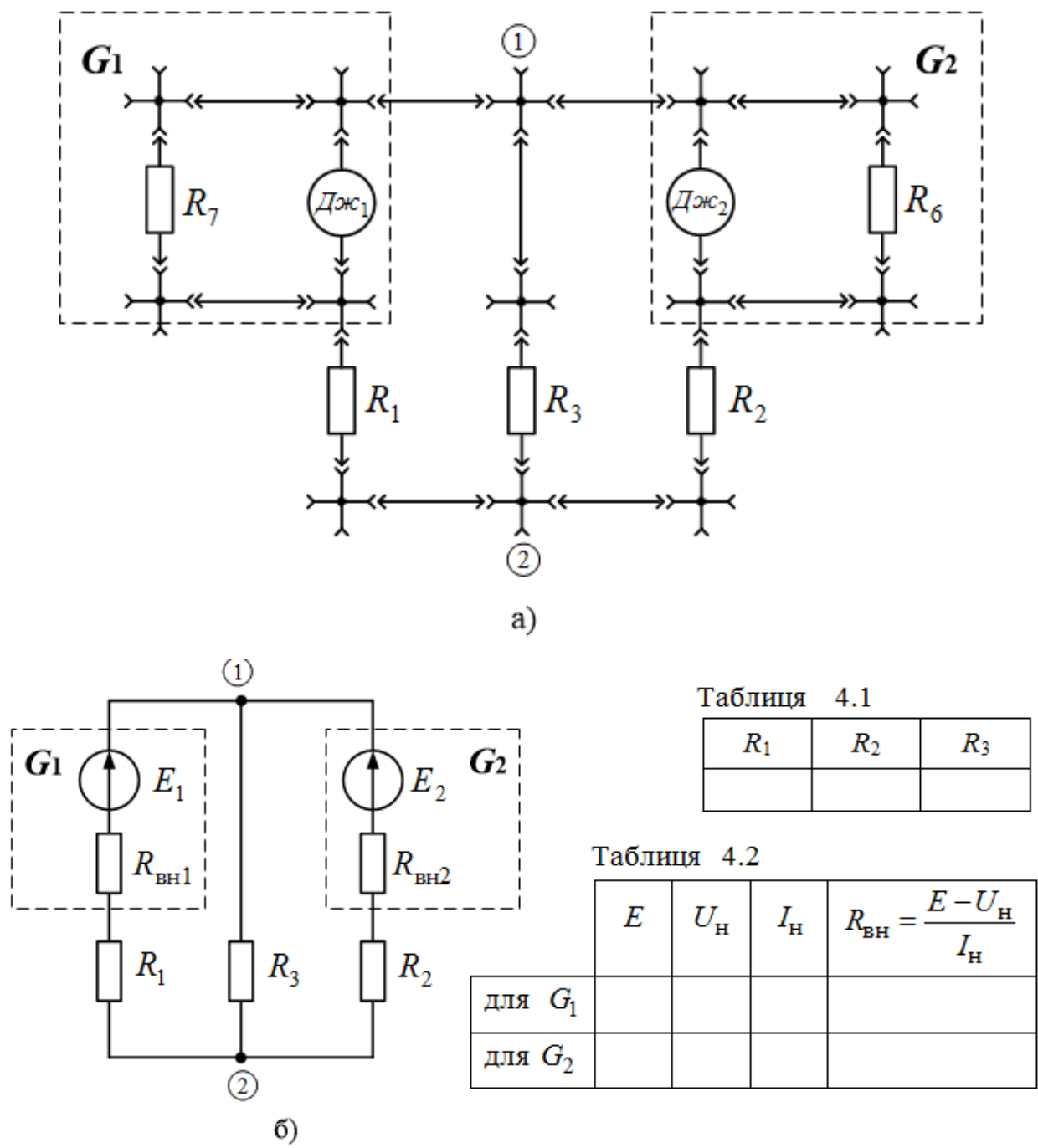


Рис. 4.1. Схема електричного кола: монтажна (а), заміщення (б)

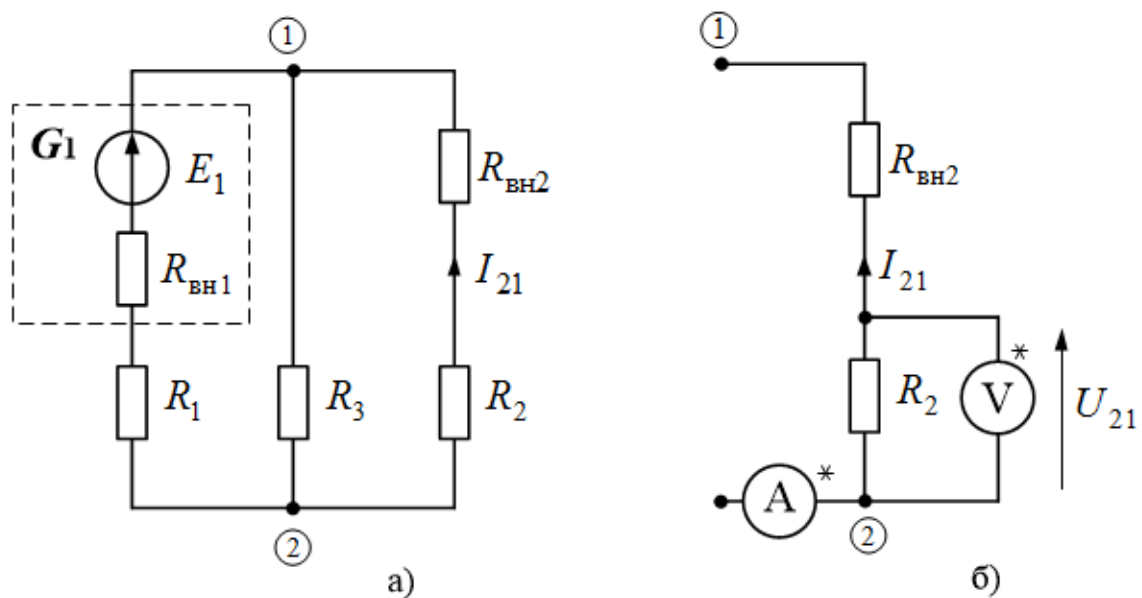


Рис. 4.2. Схема для визначення часткових струмів та напруг при дії джерела G_1 (а), вимірювання часткового струму I_{21} і часткової напруги U_{21} (б)

4. Зібрати схему з одним джерелом напруги G_2 , а некероване джерело G_1 замінити резистором з номіналом, що дорівнює внутрішньому опору R_{BH1} . Довільно спрямувати струми у вітках схеми та позначити стрілками на схемі заміщення. Виміряти сили часткових струмів у всіх вітках схеми відповідно до обраних напрямів та напруги на резисторах R_1 , R_2 , R_3 . Дані дослідів записати у табл. 4.3 в рядок «діє джерело G_2 , дослід».

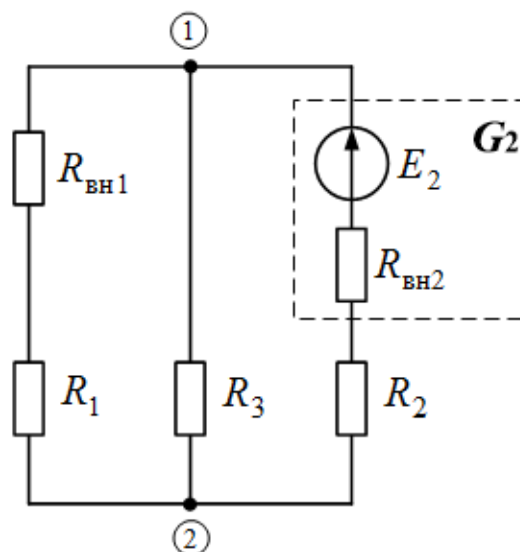


Рис. 4.3. Схема для визначення часткових струмів та напруг при дії джерела G_2 (а)

Таблиця 4.3

Діє джерело	Робота	Струми віток і напруги на резисторах R_1, R_2, R_3					
G_1		I_{11}	I_{21}	I_{31}	U_{11}	U_{21}	U_{31}
	Дослід						
	Розрахунок						
G_2		I_{12}	I_{22}	I_{32}	U_{12}	U_{22}	U_{32}
	Дослід						
	Розрахунок						
G_1 та G_2		I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3
	Дослід						
	Розрахунок						

5. Скласти електричне коло, до складу якого входять два джерела напруги G_1 та G_2 (рис. 4.1). Довільно спрямувати струми у всіх вітках схеми та виміряти сили струмів та напруги на резисторах R_1, R_2, R_3 , які створюються спільною дією двох джерел G_1 та G_2 . Результати вимірів записати у табл. 4.3 в рядок «діє джерело G_1 та G_2 , дослід».

6. Перевірити виконання принципу накладання.

Обробка результатів експерименту

1. Розрахувати силу струмів у всіх вітках та напруги на опорах R_1, R_2, R_3 розгалуженого кола, схема заміщення якого зображена на рис. 4.1, користуючись методом накладання (як алгебраїчну суму часткових струмів і напруг). Результати розрахунків записати у табл. 4.3 в рядки «розрахунок» та порівняти з результатами дослідів.

2. Розрахувати вхідні та взаємні провідності віток та коефіцієнти передачі напруги. Записати отримані значення у табл. 4.4.

Таблиця 4.4.

Діє джерело	Робота	Вхідні та взаємні провідності віток			Коефіцієнти передачі напруги		
G_1		G_{11}	G_{21}	G_{31}	K_{11}	K_{21}	K_{31}
	Дослід						
	Розрахунок						
G_2		G_{12}	G_{22}	G_{32}	K_{12}	K_{22}	K_{32}
	Дослід						
	Розрахунок						

3. Записати аналітичні вирази для струмів у вітках з опорами R_1, R_2, R_3 та напруг на цих опорах за заданими значеннями ЕРС джерел напруги та визначеними значеннями вхідних і взаємних провідностей віток та коефіцієнтів передачі напруги (табл. 3.4). Наприклад, для струму через резистор R_1 та напруги на цьому елементі:

$$I_1 = E_1 \cdot G_{11} + E_2 \cdot G_{12},$$

$$U_1 = E_1 \cdot K_{11} + E_2 \cdot K_{12}.$$

4. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Методичні вказівки

Для будь-якого лінійного кола стверджується **принцип накладання (суперпозиції)**: відгук кола на складне збудження, що створюється кількома джерелами енергії, дорівнює сумі відгуків на дію кожного джерела зокрема. Інакше: сила струму в будь-якій вітці (напруга на пасивному елементі) лінійного електричного кола, в якому діє декілька джерел електричної енергії, дорівнює алгебраїчній сумі струмів (напруг) в цій вітці від дії кожного джерела окремо. Такі висновки справедливі тільки за умови, що

параметри елементів залишаються незмінними як під час дії окремих джерел, так і під час їх сумісної дії, що є властивістю тільки лінійних кіл.

Метод накладання дозволяє замінити розрахунок струмів (напруг) у лінійному складному електричному колі розрахунком декількох простих кіл, які утворюються при почерговому видаленні всіх джерел енергії крім одного; замість виключених джерел залишають їх внутрішні опори. Методом накладання сила струму (напруга) у вітці електричного кола, до складу якого входять m джерел напруги, визначається алгебраїчним додаванням часткових струмів у цій вітці (часткових напруг):

$$I_k = \pm \sum_{s=1}^m I_{ks} = \pm I_{k1} \pm I_{k2} \pm \dots \pm I_{km} = \pm \sum_{s=1}^m E_s \cdot G_{ks}, \quad (4.1)$$

$$U_k = \pm \sum_{s=1}^m U_{ks} = \pm U_{k1} \pm U_{k2} \pm \dots \pm U_{km} = \pm \sum_{s=1}^m E_s \cdot K_{ks}, \quad (4.2)$$

де I_{ks} та U_{ks} – частковий струм і часткова напруга на ділянці кола у вітці k під дією джерела з ЕРС E_s , увімкненого у вітку s .

З додатним знаком у виразах (4.1), (4.2) враховуються сили часткових струмів або часткові напруги, напрямки яких збігається з позитивним напрямком струму (напруги) вітки даного кола.

Принцип накладання виходить із загальних властивостей лінійних рівнянь математичної моделі лінійного кола. Теоретичні міркування доводять можливість запису виразів для струмів і напруг як лінійних виразів відносно значень ЕРС джерел напруги та струмів джерел струму, які входять до складу кола. У виразах (4.1), (4.2), які справедливі для електричного кола з m джерелами напруги, така лінійна залежність враховується коефіцієнтами G_{ks} та K_{ks} .

У виразі (4.1) множники перед значеннями ЕРС мають розмірність провідності. Множник з однаковими індексами G_{kk} називають вхідною

провідністю вітки k , а будь-який множник з різними індексами G_{ks} – взаємною провідністю віток k та s . **Вхідна провідність** вітки електричного кола визначається як частка від ділення часткового струму цієї вітки на величину джерела ЕРС, увімкненого в цю ж вітку:

$$G_{kk} = \frac{I_{kk}}{E_k}. \quad (4.3)$$

Взаємна провідність віток електричного кола визначається як частка від ділення струму у вітці k на величину джерела ЕРС, увімкненого у вітку s , за умови, що інші джерела енергії замінені на внутрішні опори:

$$G_{ks} = \frac{I_{ks}}{E_k}. \quad (4.4)$$

Як виходить із виразів (4.3) і (4.4), вхідна і взаємні провідності вітки k електричного кола чисельно дорівнюють частковим струмам в цій вітці за умови, що в колі діє єдине джерело зі значенням ЕРС 1 (В), яке увімкнене відповідно у вітку k або вітку s . Отже, вхідні та взаємні провідності віток кола можна не тільки розраховувати, але й вимірювати експериментально.

У виразі (4.2) множники перед значеннями ЕРС безрозмірні. Множник з однаковими індексами K_{kk} називають *вхідним коефіцієнтом передачі напруги у вітці k* , а будь-який множник з різними індексами K_{ks} – *взаємним коефіцієнтом передачі напруги віток k та s* . **Вхідний коефіцієнт передачі напруги** у вітці електричного кола визначається як частка від ділення напруги на ділянці вітки k на величину джерела ЕРС, увімкненого в цю ж вітку, за умови, що інші джерела енергії замінені на внутрішні опори:

$$K_{kk} = \frac{U_{kk}}{E_k}. \quad (4.5)$$

Взаємний коефіцієнт передачі напруги між вітками k та s електричного кола визначається як частка від ділення часткової напруги на ділянці вітки k на величину джерела ЕРС, увімкненого у вітку s :

$$K_{ks} = \frac{U_{ks}}{E_k}. \quad (4.6)$$

Вирази (4.1) та (4.2) можна використовувати для синтезу кіл заданої структури, але зі заздалегідь заданими значеннями струмів (напруг) на певних ділянках, шляхом варіацій значень ЕРС джерел живлення.

Принцип накладання може бути застосований тільки для визначення фізичних величин, які описуються лінійними виразами в базисі ЕРС джерел напруги та струмів джерел струму. Для розрахунків потужності споживачів електричної енергії за частковими потужностями метод накладання використовувати не можна, оскільки потужність є квадратичною функцією струму чи напруги.

Питання для самостійної роботи

1. Яким має бути значення ЕРС E_1 некерованого джерела постійної напруги у схемі, зображеній на рис. 4.1, щоб у вітці з резистором R_2 струм був відсутній? Припустити, що параметри всіх інших активних і пасивних елементів схеми залишаються незмінними.

2. Яким має бути значення ЕРС E_2 керованого джерела постійної напруги у схемі, зображеній на рис. 4.1, щоб сила струму через резистор R_1 збільшилась вдвічі?

3. Записати вирази типу (4.1) для визначення струмів у всіх вітках кола, зображеного на рис. 4.1, за умови, що напрямок ЕРС керованого джерела постійної напруги змінено на протилежний.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Щерба А.А. Електротехніка / А.А. Щерба, Н.І. Поворознюк. Частина І. Електричні кола: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: ТОВ "Лазурит-Поліграф", 2011. – 384 с., [§ 1.4.10].
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Т1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с., [§ 5.4.5].
3. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання / І.А. Петренко: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с., [§ 2.7].
4. Щерба А. А. Електротехніка. ТЕ-1. Електричні та магнітні кола за постійних струмів [Електронний ресурс]: дистанційний курс / А.А. Щерба, І.А. Петренко, І.А. Курило, Г.І. Сторожилова, В.С. Бойко, А.А. Шуляк, І.Н. Намацалюк – 54,24 авт.арк., 22,3 Мб. – Київ: УІТО НТУУ «КПІ», сертифікат НПМ № 2542, 2012. – Лекція 3, § 3.4. Принцип суперпозиції. Метод накладання. Режим доступу до курсу: <http://udec.ntu-kpi.kiev.ua/moodle/course/view/php?id=253>.

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОГО ДВОПОЛЮСНИКА

Мета роботи

Перевірити справедливість теореми про активний двополюсник.

Ознайомитись з методами визначення параметрів елементів схем заміщення активного двополюсника.

Дослідити передавання енергії від активного двополюсника до пасивного та з'ясувати умови передавання максимальної кількості енергії.

Засвоїти методику визначення сили струму у окремій вітці електричного кола методом активного двополюсника (еквівалентного генератора)

Порівняти експериментальні данні з результатами теоретичного аналізу лінійних кола методом еквівалентного генератора.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи необхідно:

11. Ознайомитися з порядком виконання роботи і методичними вказівками.

12. Скласти протокол звіту з лабораторної роботи.

3. Дати відповіді на наступні питання:

а) Що називають двополюсником? Пасивним двополюсником? Активним двополюсником?

б) Які ви знаєте схеми заміщення пасивного двополюсника та активного двополюсника? Нарисуйте.

в) Які двополюсники вважаються еквівалентними?

г) Які режими роботи активного двополюсника називають неробочим ходом і коротким замиканням?

д) Сформулюйте теорему про активний двополюсник.

е) Як дослідним шляхом визначити параметри елементів схеми заміщення активного двополюсника?

ж) Як розрахувати вхідний опір, величину і напрямок дії еквівалентної ЕРС активного двополюсника?

з) Як змінюється потужність, що надходить у навантаження активного двополюсника, якщо величина опору навантаження зростає від нуля до нескінченості?

Опис лабораторного устаткування

Схеми, що досліджуються, збирають на складальному полі універсального науково-дослідного лабораторного стенда. Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Живлення схеми активного двополюсника здійснюється від одного з двох джерел із блока постійної напруги стенда (за рекомендацією викладача): нерегульованого $\mathcal{D}\mathcal{J}_1$ або регульованого $\mathcal{D}\mathcal{J}_2$. В якості навантаження застосовують резистори із магазину опорів, який розміщено у блоці опорів стенда. Для експериментальних досліджень використовують цифровий мультиметр та амперметр електромагнітної системи.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, монтажна схема якого зображена на рис. 5.1, а). Це схема активного двополюсника (еквівалентного генератора), що розглядається відносно вузлів ① та ②. Значення напруги U_{14} між затискачами керованого джерела напруги $\mathcal{D}\mathcal{J}_2$, навантаженого на пасивне коло, задає викладач. Резистори R_1, R_2, R_3, R_4 – це набірні елементи з незмінними опорами. Під час складання схеми на робочому полі слід виміряти опори резисторів $R_1 \dots R_4$. Результати вимірів напруги U_{14} та значення опорів резисторів $R_1 \dots R_4$ записати у табл. 5.1.

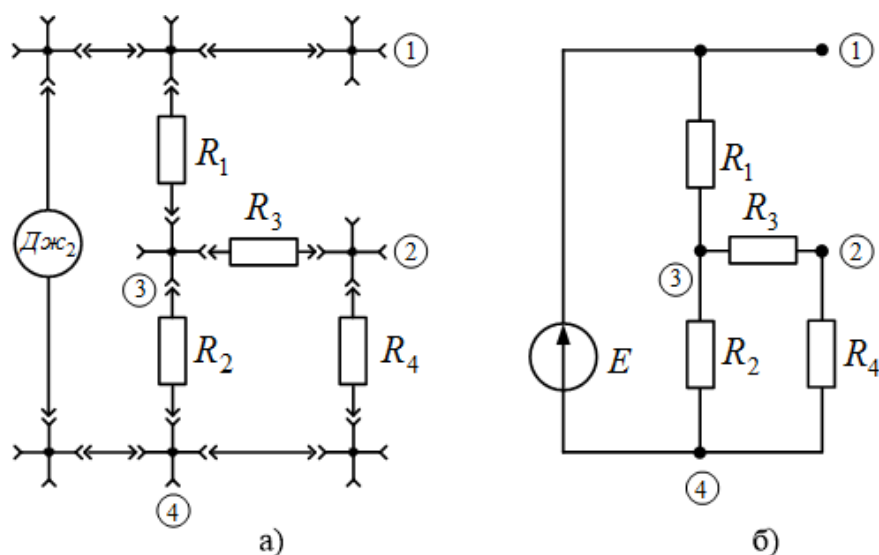


Рис. 5.1. Схема активного двополюсника: монтажна (а) та заміщення (б)

Таблиця 5.1

$E = U_{14}$	R_1	R_2	R_3	R_4

2. Виміряти напругу на розімкнених затискачах активного двополюсника у режимі неробочого ходу (рис. 5.2, а). Записати значення напруги неробочого ходу $U_{\text{нх}} = U_{12}|_{R_{\text{н}}=\infty}$ у перший рядок табл. 5.2.

3. Приєднати до затискачів ① та ② активного двополюсника амперметр (рис. 5.2,б) і виміряти струм короткого замикання $I_{\text{кз}} = I_{\text{н}}|_{R_{\text{н}}=0}$. Записати значення струму короткого замикання у перший рядок табл. 5.2.

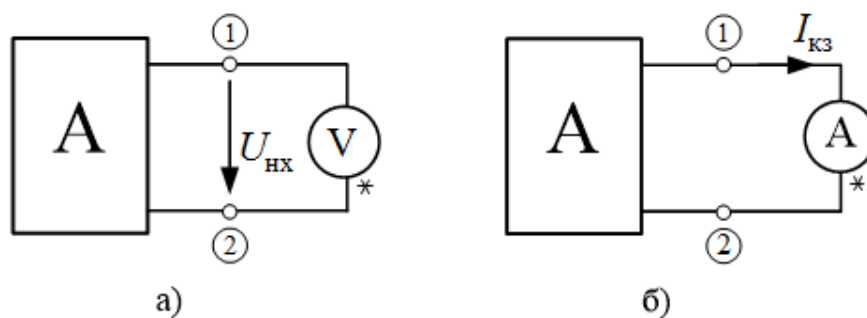


Рис. 5.2. Схеми для дослідження активного двополюсника в режимах: неробочого ходу (а) та короткого замикання (б)

Таблиця 5.2

Вид роботи	$U_{\text{нх}}$	$I_{\text{кз}}$	$R_{\text{ег}} = U_{\text{нх}} / I_{\text{кз}}$
Дослід			
Розрахунок			

4. Розрахувати значення опору активного двополюсника $R_{\text{ег}} = U_{\text{нх}} / I_{\text{кз}}$ за дослідними даними та записати у перший рядок табл. 5.2.

5. Скласти електричне коло для визначення вхідного опору пасивного двополюсника, який утворюється із активного заміною джерела енергії на його внутрішній опір. Зважаючи на малий опір керованого джерела напруги Дж_2 , можна замінити джерело нульовим опором (рис. 5.3). Виміряти опір пасивного двополюсника омметром. Порівняти отримане значення вхідного опору з розрахунковим значенням у табл. 5.2.

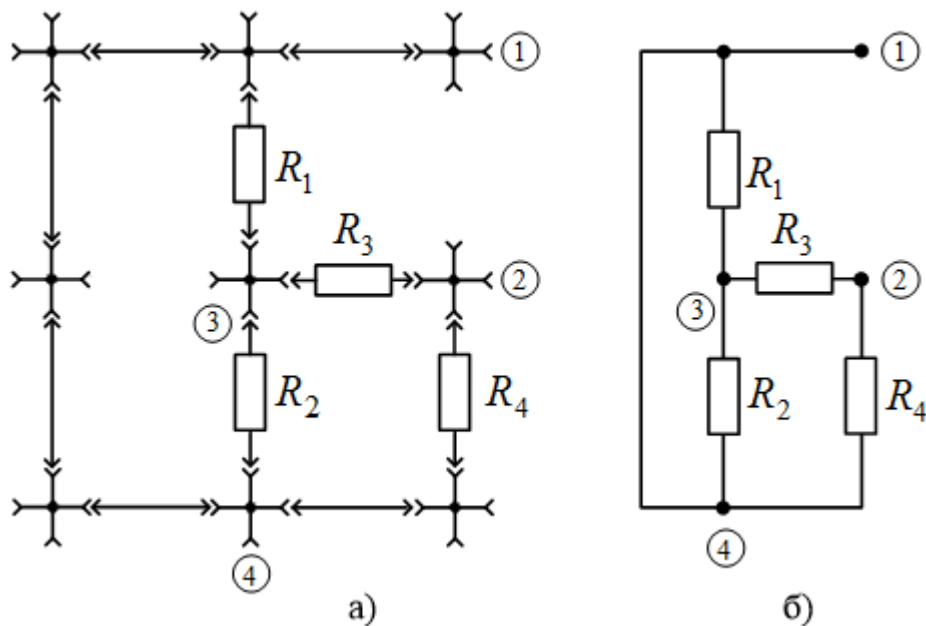


Рис. 5.3. Схема для вимірювання опору еквівалентного генератора:
монтажна (а) та заміщення (б)

Зауваження. За відсутності омметра можна визначити опір пасивного двополюсника, скориставшись амперметром і вольтметром. Для цього

потрібно приєднати до входних затискачів пасивного двополюсника ① та ② джерело напруги, наприклад регульоване $Дж_2$, і виміряти напругу між вузлами U_{12} та вхідний струм двополюсника. Вхідний опір двополюсника обчислити за законом Ома, поділивши напругу U_{12} на значення вхідного струму.

6. Приєднати до затискачів активного двополюсника ① та ② змінний резистор R_H із магазину опорів навантаження R_H (рис. 5.4). Виміряти напругу на виході активного двополюсника $U_{12} = U_H$ та струм через навантаження I_H у робочих режимах, які різняться значеннями опору навантаження R_H . Зафіксувати покази вольтметра і амперметра для 10 значень опору навантаження, обираючи їх довільно у діапазоні від $0.2 \cdot R_{ег}$ до $4 \cdot R_{ег}$. При цьому слід обов'язково виконати дослід для $R_H = R_{ег}$.

Результати вимірювань записати у відповідні рядки табл. 5.3.

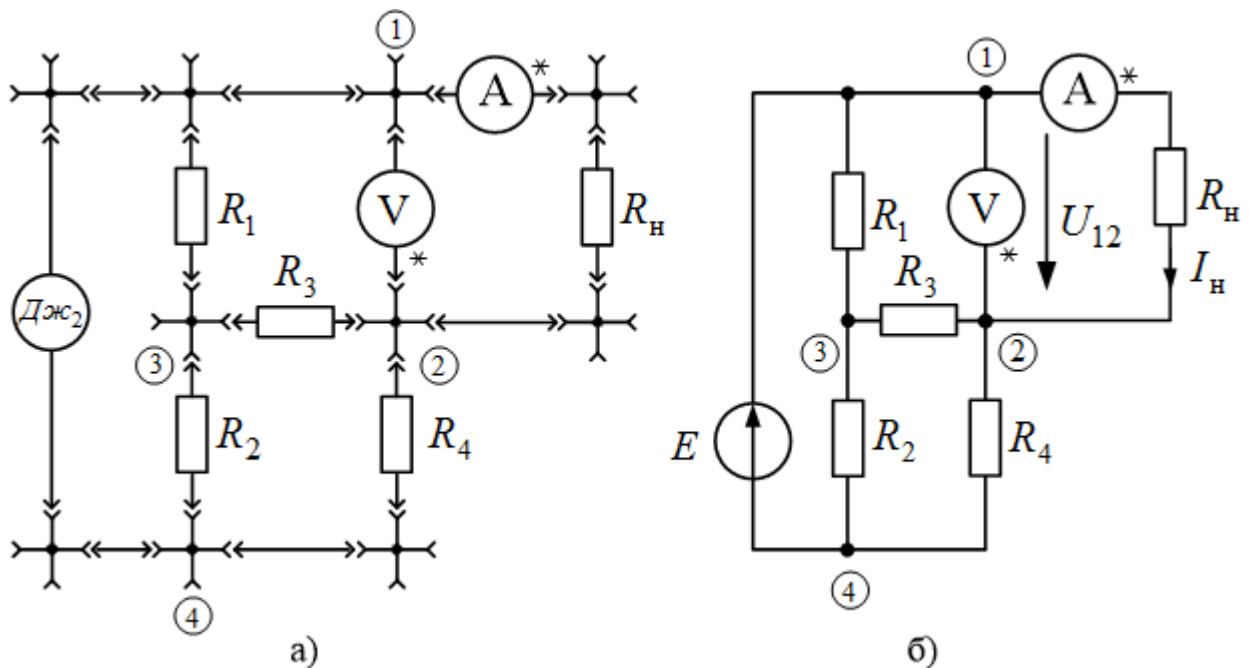


Рис. 5.4. Схема активного двополюсника, навантаженого на резистор R_H :
монтажна (а) та заміщення (б)

Таблиця 5.3

R_H										
U_H										
I_H										
P_H										

Обробка результатів експерименту

1. Обчислити напругу неробочого ходу на затискачах активного двополюсника ① та ② і струм короткого замикання за наданими параметрами елементів (E, R_1, R_2, R_3, R_4) , з яких складений двополюсник (рис. 5.1). Розраховані значення записати у другий рядок табл. 5.2. За цими значеннями визначити опір еквівалентного генератора і записати у другий рядок табл. 5.2. Порівняти з результатами, отриманими під час лабораторних досліджень.

2. Розрахувати вхідний опір пасивного двополюсника, який утворюється із активного заміною джерела енергії на його внутрішній опір (рис. 5.3). Порівняти отриманий результат з результатами обчислень опору еквівалентного генератора за дослідними даними та теоретичними розрахунками, записаними до табл. 5.2.

3. За даними табл. 5.2 та результатами обчислень п. 2 обробки результатів експерименту нарисувати дві схеми заміщення активного двополюсника (з ідеальним джерелом ЕРС та з ідеальним джерелом струму) і вказати параметри компонентів.

4. Упевнитись, що виміряна сила струму через навантаження в робочих режимах активного двополюсника (дані табл. 5.3) збігається з розрахованою за теоремою про активний двополюсник:

$$I_H = \frac{U_{HX}}{R_{eg} + R_H} \quad (5.1)$$

5. Побудувати навантажувальну характеристику активного двополюсника $U_{12} = f(I_H)$, скориставшись результатами дослідів (табл. 5.3).

6. Дослідити передавання енергії від активного двополюсника до пасивного. Для цього, по-перше, за результатами досліду п. 6 робочого завдання розрахувати та записати в останній рядок табл. 5.3 значення потужностей, які споживає навантаження в різних робочих режимах ($P_H = U_H \cdot I_H$). По-друге, побудувати графік залежності значення споживаної потужності від величини опору навантаження $P_H = f(R_H)$.

7. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Методичні вказівки

Двополюсник – частина електричного кола довільної конфігурації, яка розглядається відносно двох затискачів. До затискачів можна приєднати джерело енергії або споживач електричної енергії. Еквівалентними називають двополюсники, які мають однакові вольт-амперні характеристики. Еквівалентна заміна одного двополюсника на інший не призводить до зміни режиму роботи тієї частини електричного кола, яка не входить до складу двополюсника.

Пасивний двополюсник – це двополюсник, до складу якого входять тільки пасивні елементи. Схема заміщення пасивного двополюсника в колах постійного струму являє собою резистор (рис. 5.5). Отже, пасивний двополюсник характеризується одним параметром – вхідним опором, який можна виміряти омметром чи розрахувати за наданими схемою кола та параметрами елементів, «згорнувши» схему відносно вхідних затискачів.

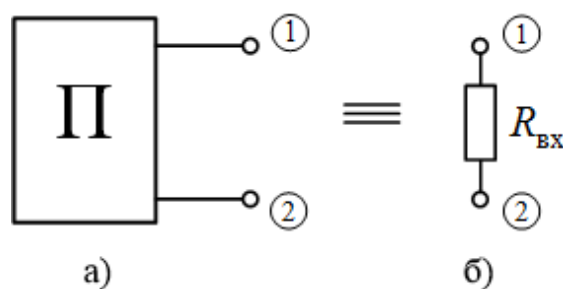


Рис. 5.5. Пасивний двополюсник: умовне позначення (а), схема заміщення (б)

Активний двополюсник – це двополюсник, до складу якого входить хоча б одне джерело електричної енергії. На розімкнених затискачах активного двополюсника наявна напруга, яка називається напругою неробочого ходу (рис. 5.5, а). Схема заміщення активного двополюсника в колах постійного струму складається з двох елементів: послідовно з'єднаних незалежного джерела напруги і резистора (рис. 5.5, б) або паралельно з'єднаних незалежного джерела струму і резистора (рис. 5.5, в).

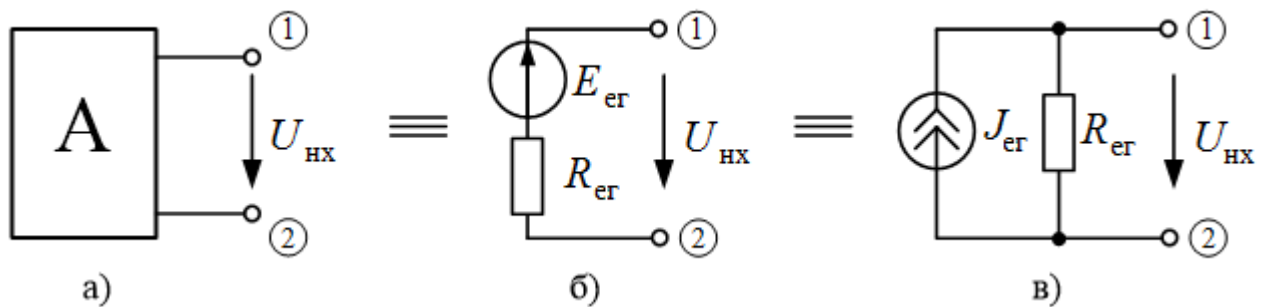


Рис. 5.5. Активний двополюсник: умовне позначення (а), послідовна схема заміщення (б), паралельна схема заміщення (в)

Вольт-амперна характеристика лінійного активного двополюсника наведена на рис. 5.6.

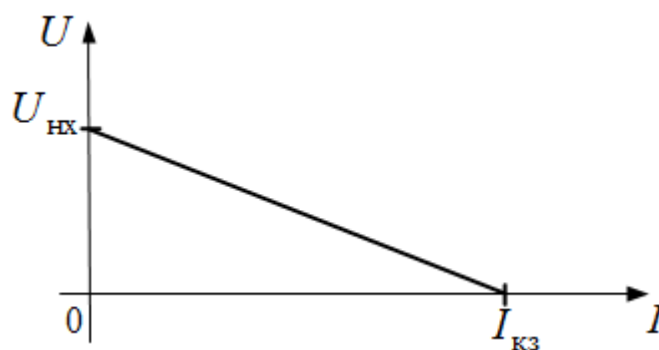


Рис. 5.6. Вольт-амперна характеристика активного двополюсника

Теорема про активний двополюсник (про еквівалентний генератор)

встановлює порядок визначення параметрів елементів схем заміщення і має два формулювання: теорема Тевенена и теорема Нортонa.

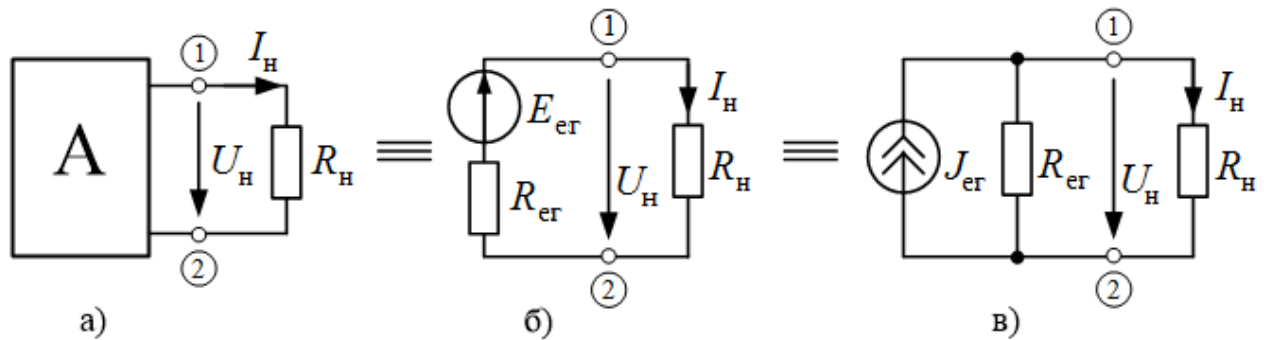


Рис. 5.7. Активний двополюсник: зображення на схемі (а), послідовна (а) і паралельна (б) схеми заміщення

Теорема Тевенена: струм у будь-якій вітці електричного кола не зміниться, якщо активний двополюсник, до якого приєднана розглядувана вітка R_n , замінити еквівалентним генератором напруги, схема заміщення якого складається з послідовно увімкнених ідеалізованого джерела ЕРС і резистора (рис. 5.7, б). Значення ЕРС дорівнює напрузі неробочого ходу на розімкнених затискачах активного двополюсника. Значення опору дорівнює вхідному опору пасивного двополюсника, який утворюють з активного заміною всіх джерел на їхні внутрішні опори.

$$I_n = \frac{E_{ег}}{R_{ег} + R_n}, \quad E_{ег} = U_{нх}, \quad R_{ег} = R_{вх}. \quad (5.2)$$

Із формули (5.2) виходить, що в режимі короткого замикання виконується співвідношення (5.3)

$$R_n = 0 \rightarrow I_{кз} = \frac{E_{ег}}{R_{ег}}, \quad (5.3)$$

яке надає змогу визначити опір еквівалентного генератора за результатами

дослідів в режимах неробочого ходу і короткого замикання:

$$R_{\text{ег}} = \frac{E_{\text{ег}}}{I_{\text{кз}}}. \quad (5.4)$$

Теорема Нортон: *Напруга на будь-якій вітці електричного кола не зміниться, якщо активний двополюсник, до якого приєднана розглядувана вітка $R_{\text{н}}$, замінити еквівалентним генератором напруги, схема заміщення якого складається з паралельно увімкнених ідеалізованого джерела струму і резистора (рис. 5.7, в). Значення струму джерела дорівнює вихідному струму активного двополюсника у режимі короткого замикання. Опір резистора дорівнює вхідному опору пасивного двополюсника, який утворюється з активного заміною всіх джерел на їхні внутрішні опори.*

$$U_{\text{н}} = \frac{J_{\text{ег}}}{G_{\text{ег}} + G_{\text{н}}}, \quad J_{\text{ег}} = I_{\text{кз}}, \quad G_{\text{ег}} = G_{\text{вх}}. \quad (5.5)$$

Струм у будь-якій вітці електричного кола (напругу) можна визначити, якщо замінити всю схему відносно цієї вітки еквівалентним генератором. Метод розрахунку струму (напруги) лише *однієї вітки* складного електричного кола, який ґрунтується на представленні активного двополюсника схемою заміщення називають **методом еквівалентного генератора**. Рекомендована послідовність розрахунку струму у вітці:

- 1) Вилучити із схеми вітку, струм через яку треба визначити, і розрахувати напругу між вузлами активного двополюсника, до яких була приєднана ця вітка $U_{\text{нх}} = E_{\text{ег}}$;
- 2) Замінити джерела у складі активного двополюсника на внутрішні опори і визначити еквівалентний опір пасивного двополюсника, що утворився, відносно затискачів $R_{\text{вх}} = R_{\text{ег}}$;
- 3) Приєднати вилучену вітку до схеми еквівалентного генератора і за законом Ома визначити в ній струм. Якщо вітка, в якій визначається

струм, являє собою послідовне з'єднання опору R_H і джерела напруги з ЕРС E_H , то струм дорівнює:

$$I_H = \frac{E_{ег} \mp E_H}{R_{ег} + R_H}. \quad (5.6)$$

Потужність, яку отримує навантаження R_H від активного двополюсника, визначається за законом Джоуля-Ленца:

$$P_H = I_H^2 \cdot R_H = \left(\frac{E_{ег}}{R_{ег} + R_H} \right)^2 R_H. \quad (5.7)$$

Математичний аналіз функції $P_H = f(R_H)$ за співвідношенням (5.7) доводить, що максимальне значення потужність набуває в режимі узгодження навантаження, тобто за умови $R_H = R_{ег}$. **Коефіцієнт корисної дії** показує, яку частину потужності активних джерел, які наявні в складі активного двополюсника, становить корисна потужність, що споживається навантаженням. Після заміни активного двополюсника схемою заміщення за теоремою Тевенена значення коефіцієнта корисної дії можна обчислити за виразом (5.8):

$$\eta = \frac{P_H}{P_{ген}} = \frac{R_H \cdot I^2}{R_{ег} \cdot I^2 + R_H \cdot I^2} = \frac{R_H}{R_{ег} + R_H}. \quad (5.8)$$

Питання для самостійної роботи

1. Як зміниться показ амперметра у колі, схема якого зображена на рис. 5.4, якщо послідовно з навантаженням увімкнути незалежне джерело напруги з ЕРС $E_H = 20(\text{В})$ за напрямом струму? Назустріч струму?

2. Побудуйте графік залежності коефіцієнта корисної дії для активного двополюсника, зображеного на рис. 5.4, від нормованого значення опору

навантаження $\eta = f(R_n/R_{er})$. За яких обставин коефіцієнт корисної дії наближається до 100%? Дорівнює 50%?

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Щерба А.А. Електротехніка. Частина І. Електричні кола.: Посібник для студентів вищих навчальних закладів / А. А. Щерба, Н.І. Поворознюк. – Київ: ТОВ „Лазурит-Поліграф”, 2011. – 384 с., [§ 1.4.11].

2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: у 3-х т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб Ю.Ф та ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. Т1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2004. – 272 с., [§ 4.5.2].

3. Петренко І.А. Основи електротехніки та електроніки: Навч. посібник для дистанційного навчання: у 2 ч. – Ч.1: Основи електротехніки / І.А. Петренко. – К.: Університет «Україна», 2006. – 411с., [§ 2.10].

4. Щерба А.А. Електротехніка. ТЕ-1. Електричні та магнітні кола за постійних струмів [Електронний ресурс]: дистанційний курс / А. А. Щерба, І. А. Петренко, І. А. Курило, Г. І. Сторожилова, В. С. Бойко, А. А. Шуляк, І. Н. Намацалюк – 54,24 авт. арк., 22,3 Мб. – Київ: УПТО НТУУ «КПІ», сертифікат НПМ № 2542, 2012. – Лекція 3, § 3.5. Теорема про активний двополюсник (теорема Тевенена). Метод еквівалентного генератора; Практичне заняття 3, задачі 3.3, 3.6 Режим доступу до курсу: <http://udec.ntu-kpi.kiev.ua/moodle/course/view/php?id=253>.

Лабораторна робота №6

ПОСЛІДОВНЕ, ПАРАЛЕЛЬНЕ ТА МІШАНЕ СПОЛУЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи

Навчитися виміряти напруги, струми кути зсуву фаз, потужності тощо в електричних колах синусоїдного струму.

Навчитись визначати активні, реактивні та повні опори і провідності, кути зсуву фаз.

Підтвердити уявлення про активну, реактивну і повну потужності, зв'язок між ними, навчитись складати баланс потужностей.

Навчитись будувати суміщені векторні діаграми струмів та напруг електричних кіл синусоїдного струму.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи студенти мають скласти протокол звіту. ознайомитись з методичними вказівками, робочим завданням та відповісти на такі запитання:

1. Які величини використовують для характеристики синусоїдних струмів і напруг?
2. Від чого залежить кут зсуву фаз між струмом і напругою на пасивній ділянці електричного кола?
3. Як залежить від частоти опір реактивних елементів?
4. Які співвідношення мають місце між активними, реактивними і повними опорами, а також між активними, реактивними і повними провідностями?
5. Для яких цілей використовуються і яким чином будуються суміщені векторні діаграми струмів та напруг електричного кола?

6. В чому полягає сутність символічного методу розрахунку електричних кіл синусоїдного струму?

7. Яким фізичним процесам відповідають активна, реактивна і повна потужності електричного кола? Як складається баланс потужностей?

Робоче завдання

1. Скласти електричне коло (рис. 6.1) з послідовним сполученням споживачів.

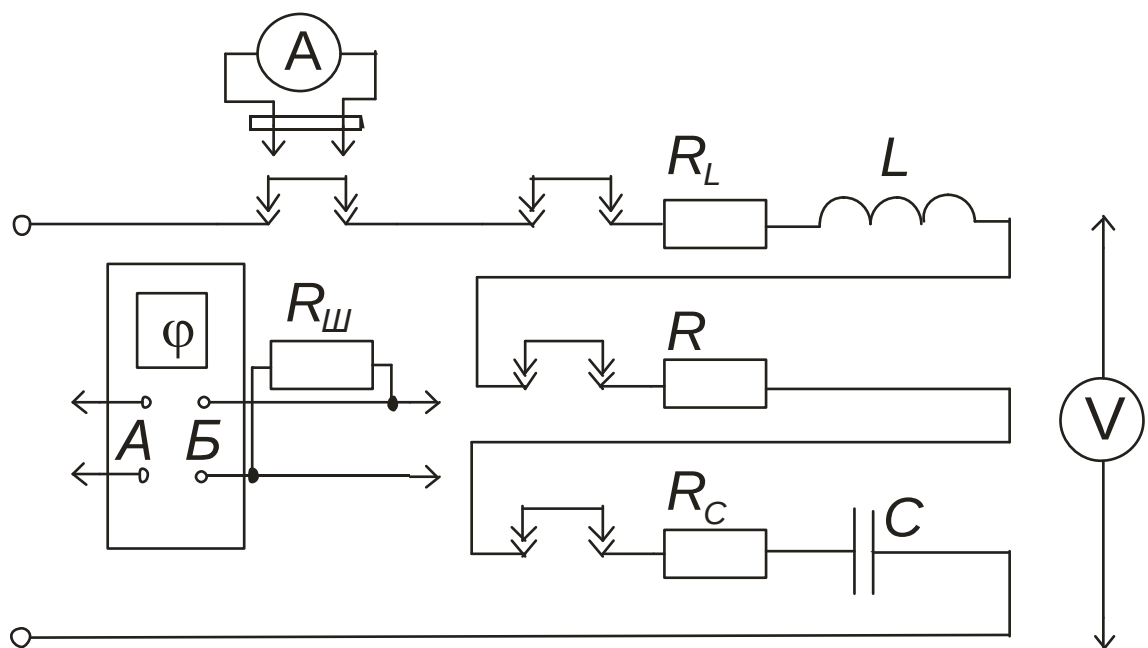


Рис. 6.1

2. Підготувати до роботи прилад для виміру кута зсуву фаз між напругою та струмом (це може бути осцилограф, який слід відповідним чином відкалібрувати, або фазометр).

3. Виконати виміри струму, напруг і кутів зсуву фаз для кожного споживача окремо, а також на входних затискачах електричного кола. Результати вимірів занести в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

$I,$ A	$U,$ B	$U_R,$ B	$U_L,$ B	$U_C,$ B	$\varphi,^\circ$	$\varphi_R,^\circ$	$\varphi_L,^\circ$	$\varphi_C,^\circ$	$P,$ Bm	$P_R,$ Bm	$P_L,$ Bm	$P_C,$ Bm

4. Скласти баланс активних потужностей для досліджуваного нерозгалуженого електричного кола.

5. Скласти електричне коло (рис. 6.2) з паралельним сполученням споживачів.

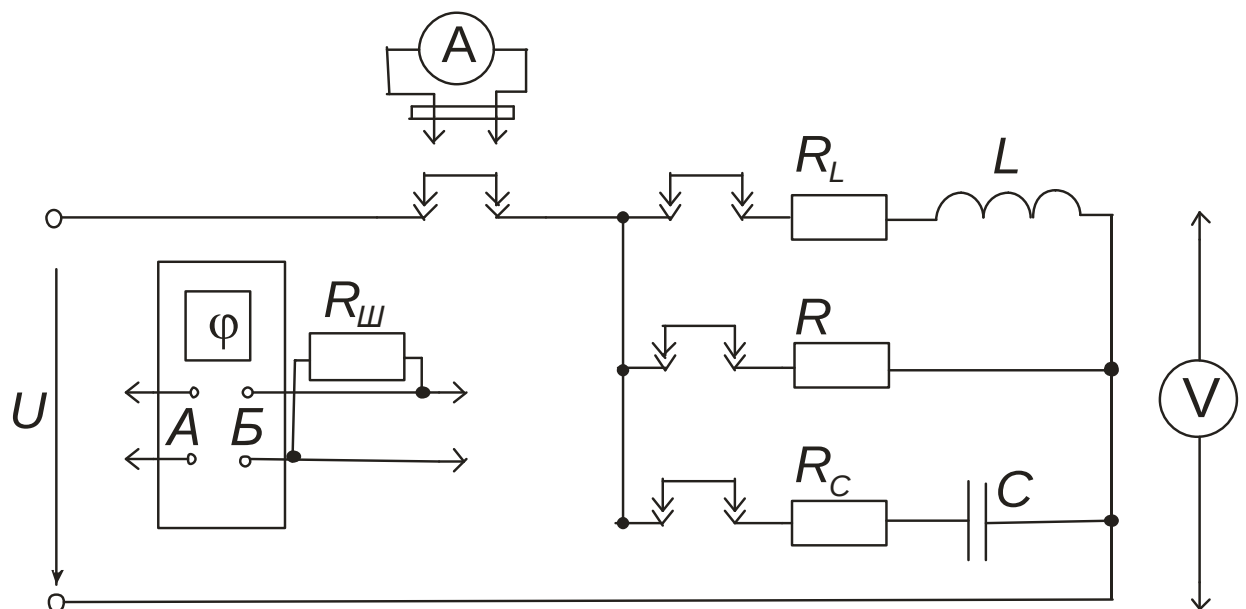


Рис. 6.2

6. Виконати виміри струмів, напруги і кутів зсуву фаз для кожного споживача окремо, а також на вхідних затискачах електричного кола. Результати вимірів занести в табл. 6.2.

7. Скласти баланс активних потужностей для досліджуваного електричного кола.

8. Скласти спочатку електричне коло, за схемою рис. 6.3, а потім – за схемою рис. 6.4.

Таблица 6.2

$U,$ B	$I,$ A	$I_R,$ A	$I_L,$ A	$I_C,$ A	$\varphi,^\circ$	$\varphi_R,^\circ$	$\varphi_L,^\circ$	$\varphi_C,^\circ$	$P,$ Bm	$P_R,$ Bm	$P_L,$ Bm	$P_C,$ Bm

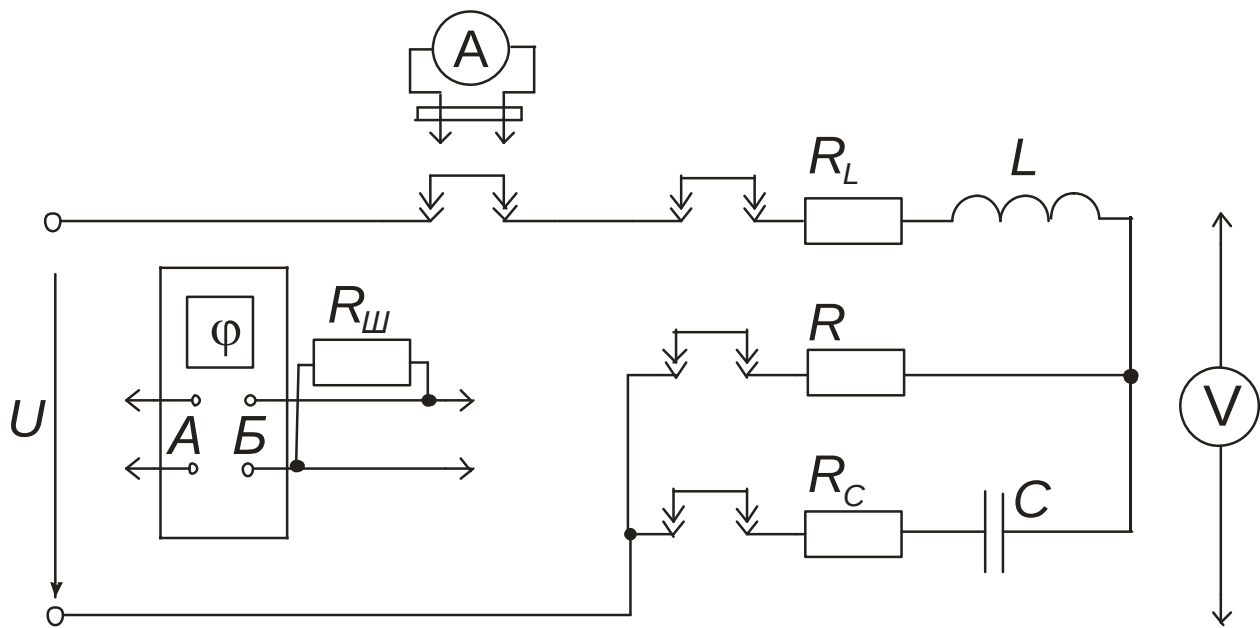


Рис. 6.3

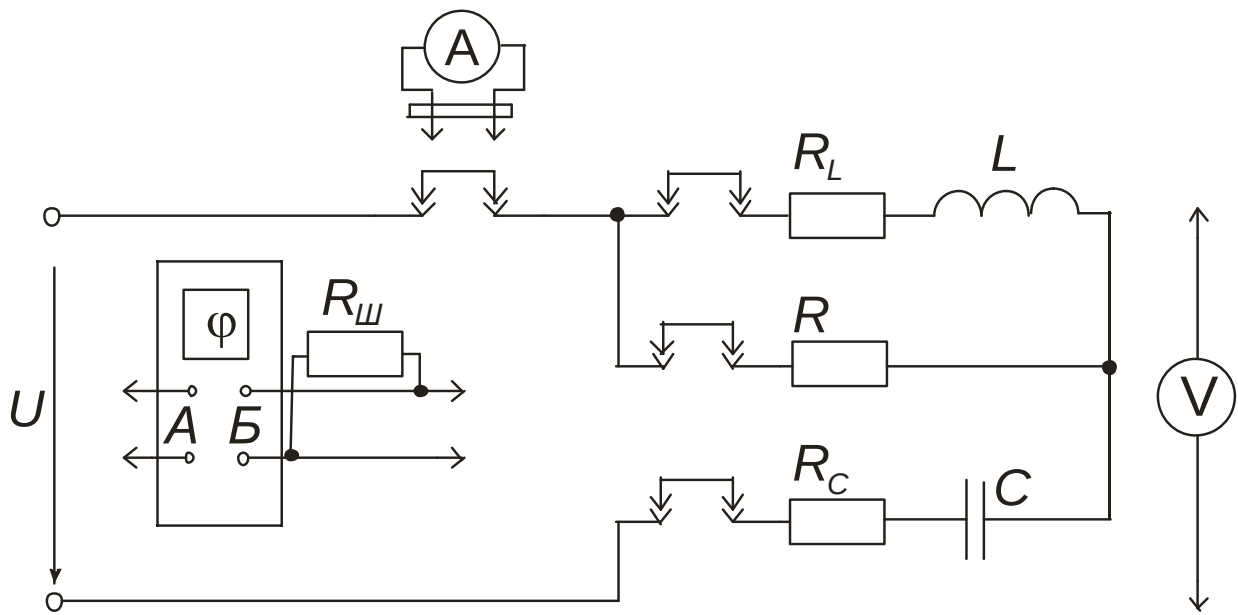


Рис. 6.4

9. Виконати виміри струмів, напруг і кутів зсуву фаз для кожного споживача окремо, а також на вхідних затискачах електричного кола. Результати вимірів занести в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

№	$U,$ B	$U_R,$ B	$U_L,$ B	$U_C,$ B	$I,$ A	$I_R,$ A	$I_L,$ A	$I_C,$ A	$\varphi,$ $^\circ$	$\varphi_R,$ $^\circ$	$\varphi_L,$ $^\circ$	$\varphi_C,$ $^\circ$	$P,$ Bm	$P_R,$ Bm	$P_L,$ Bm	$P_C,$ Bm
6.3																
6.4																

10. Скласти баланс активних потужностей для обох досліджуваних кіл.

11. За даними вимірів п.3 визначити активні, реактивні та повні опори, а також комплексні опори окремих споживачів і всього кола. Результати розрахунків занести в табл. 6.4.

Таблиця 6.4

Споживач	Параметри				
	$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	$\varphi, ^\circ$	$\underline{Z}, Ом$
Резистор					
Індуктивна котушка					
Конденсатор					
Все коло					

12. Для електричного кола рис. 6.1 побудувати суміщену векторну діаграму струму та напруг.

13. За даними вимірів п.6 визначити активні, реактивні та повні провідності, а також комплексні провідності окремих споживачів і всього кола. Результати розрахунків занести в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Споживач	Параметри				
	$G, См$	$B, См$	$Y, См$	$\varphi, ^\circ$	$\underline{Y}, См$
Резистор					
Індуктивна котушка					
Конденсатор					
Все коло					

14. Для електричного кола (рис. 6.2) необхідно побудувати суміщену векторну діаграму струмів та напруг.

15. За даними вимірів п.9 визначити активні, реактивні та повні опори, а також комплексні опори окремих споживачів і всього кола. Результати розрахунків занести в табл. 6.6.

Таблиця 6.6

Схема	Споживач	Параметри				
		$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	$\varphi, ^\circ$	$\underline{Z}, Ом$
Рис. 6.3	Резистор					
Рис. 6.4						
Рис. 6.3	Індуктивна котушка					
Рис. 6.4						
Рис. 6.3	Конденсатор					
Рис. 6.4						
Рис. 6.3	Все коло					
Рис. 6.4						

16. Для електричних кіл (рис. 6.3 та 6.4) побудувати суміщені векторні діаграми напруг та струмів.

17. За результатами дослідів п. п. 3, 6, 9, визначити середні величини опорів резистора, індуктивної котушки та конденсатора і записати в табл. 6.7 комплексні опори цих споживачів.

Таблиця 6.7

Споживач	Параметри		
	$R, \text{Ом}$	$X, \text{Ом}$	$\underline{Z}, \text{Ом}$
Резистор			
Індуктивна котушка			
Конденсатор			

18. Вважаючи відомими параметри споживачів (див. табл. 6.7), розрахувати струми віток електричних кіл (рис. 6.1÷6.4) та їхні активні потужності; порівняти результати розрахунків з результатами експериментальних вимірів.

19. Зробити і записати у протоколі звіту висновки по роботі.

Завдання на навчально-дослідну роботу студентів

1. Визначити, який за характером реактивний елемент необхідно підключити послідовно в електричне коло рис. 6.1 та паралельно в коло рис. 6.2, щоб коефіцієнт потужності цих електричних кіл дорівнював 1.0; 0.95; 0.9. Розрахувати опір цього елемента.

2. Вирахувати величину ємності конденсаторної батареї в електричному колі з послідовним сполученням споживачів (схема рис. 6.1), при якій вихідна активна потужність джерела енергії буде максимальною.

3. Визначити ємність батареї конденсаторів в схемі рис. 6.3 та індуктивність котушки в схемі рис. 6.4, при яких вхідний кут зсуву фази буде дорівнювати $+45^\circ$ (електричний градус).

4. Скласти обґрунтований план побудови суміщеної векторної діаграми струмів та напруг електричного кола, використовуючи для цього лише результати вимірів за допомогою амперметрів та вольтметрів в електричних колах рис. 6.3 та 6.4, вважаючи, що резистор має суто активним опором.

Методичні вказівки

Миттєве значення синусоїдного струму записують так

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad (6.1)$$

де I_m - амплітудне значення струму;

$\omega t + \psi_i$ - фаза коливання струму;

ψ_i - початкова фаза (значення фази в момент часу $t=0$);

$\omega=2\pi f$ - кутова частота;

$f = \frac{1}{T}$ - циклічна частота;

T – період коливання струму.

Від струму $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, що тече в електричному колі з послідовним сполученням R , L та C на окремих елементах та вхідних затискачах, створюються напруги

$$\begin{aligned} u_R &= R \cdot i = R \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i); \\ u_L &= L \frac{di}{dt} = \omega L \cdot I_m \cos(\omega t + \psi_i) = X_L \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}); \\ u_C &= \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cos(\omega t + \psi_i) = X_C \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}); \\ u &= u_R + u_L + u_C = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = Z \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_u). \end{aligned} \quad (6.2)$$

Напруга на активному опорі u_R має таку ж початкову фазу, що і струм.

Напруга на індуктивності u_L випереджає струм за фазою на кут $\frac{\pi}{2}$, а напруга

на ємності u_C відстає за фазою від струму на кут $\frac{\pi}{2}$.

Кут зсуву фаз визначають як різницю початкових фаз напруги та струму, тобто

$$\varphi = \psi_u - \psi_i. \quad (6.3)$$

Кут зсуву фаз між напругою та струмом на входних затискачах електричного кола залежить від параметрів всіх елементів кола і його визначають за формулою

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}. \quad (6.4)$$

Якщо $\varphi > 0$, напруга випереджає струм, що свідчить про активно-індуктивний характер електричного кола. В разі $\varphi < 0$ струм випереджає напругу і таке електричне коло має активно-ємнісний характер.

Величину $X_L = \omega L$ називають *індуктивним реактивним опором* (індуктивним реактансом), а $X_C = \frac{1}{\omega C}$ - *ємнісним реактивним опором* (ємнісним реактансом). Перша із цих величин умовно вважається додатною, а друга - від'ємною. Алгебраїчну суму індуктивного та ємнісного реактансів $X = X_L + (-X_C)$ називають *реактивним опором* (реактансом) електричного кола.

Повний опір (імпеданс) електричного кола Z складається з його активного (резистансу) та реактивного (реактансу) опорів і визначається за формулою

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (6.5)$$

При розрахунках електричних кіл досить часто користуються і такими співвідношеннями

$$R = Z \cos(\varphi) \text{ та } X = Z \sin(\varphi). \quad (6.6)$$

Введення поняття про повний опір, яким зручно користуватись у разі послідовного сполучення елементів всього електричного кола, чи окремих його ділянок, дозволяє записати закон Ома для діючих значень

$$U = Z \cdot I. \quad (6.7)$$

Якщо електричне коло складається з елементів R , L і C , сполучених паралельно, то для його розрахунку користуються поняттям провідності, що є величиною, оберненою відповідному опору. В такому разі розрізняють:

$$G = \frac{1}{R} \text{ - активну провідність (кондуктанс);}$$

$$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} \text{ - індуктивну реактивну провідність (індуктивний сушцептанс);}$$

$$B_C = \frac{1}{X_C} = \omega C \text{ - ємнісну реактивну провідність (ємнісний сушцептанс);}$$

$B = B_L - B_C$ - реактивну провідність електричного кола (сушцептанс кола), що є алгебраїчно сумою індуктивного та ємнісного сушцептансів;

$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ - повну провідність (адмітанс) електричного кола, що є геометричною сумою активної та реактивної провідностей.

Кут зсуву фази між напругою та струмом на вхідних затискачах електричного кола також залежить від параметрів всіх елементів кола і його визначають за формулою

$$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{G}. \quad (6.8)$$

Зв'язок між активною, реактивною та повною провідностями записують ще й так

$$G = Y \cos(\varphi) \text{ та } B = Y \sin(\varphi). \quad (6.9)$$

Для електричного кола з паралельним сполученням елементів R , L і C закон Ома для діючих значень має вигляд

$$I = U \cdot Y. \quad (6.10)$$

Будь-який пасивний двополюсник (рис. 6.5, а) можна замінити двома еквівалентними схемами заміщення відповідно із послідовним сполученням опорів (рис. 6.5, б) та паралельним сполученням провідностей (рис. 6.5, в).

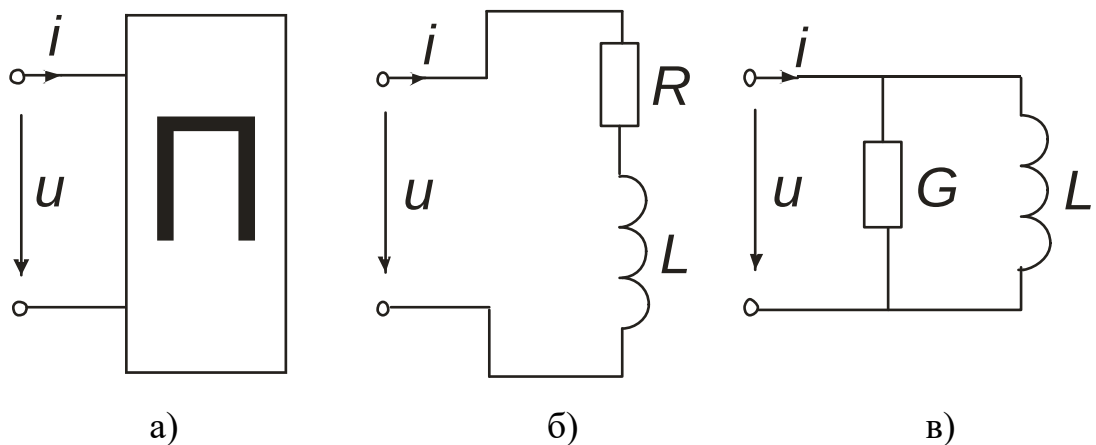


Рис. 6.5

Параметри еквівалентних схем пасивного двополюсника можна визначити дослідним шляхом. Для цього потрібно за допомогою приладів виміряти напругу, струм та активну потужність двополюсника, що дозволить розрахувати:

а) для схеми з послідовним з'єднанням елементів

$$Z = \frac{U}{I}, R = \frac{P}{I^2}, X = \sqrt{Z^2 - R^2}, \cos(\varphi) = \frac{P}{UI}; \quad (6.11)$$

б) для схеми з паралельним з'єднанням елементів

$$Y = \frac{I}{U}, G = \frac{P}{U^2}, B = \sqrt{Y^2 - G^2}, \cos(\varphi) = \frac{P}{UI}; \quad (6.12)$$

Обидві схеми еквівалентні між собою за умови, що між опорами та провідностями мають місце такі співвідношення

$$\begin{aligned} G &= \frac{R}{R^2 + X^2}; B = \frac{X}{R^2 + X^2}; \\ R &= \frac{G}{G^2 + B^2}; X = \frac{B}{G^2 + B^2}. \end{aligned} \quad (6.13)$$

Аналіз електричного кола синусоїдного струму (дослід або розрахунок), як правило, супроводжується побудовою суміщеної векторної діаграми струмів та напруг кола.

Для струмів будується променева діаграма: вектори всіх струмів відкладаються з будь-якої довільної вибраної точки (наприклад, із початку координат). Це дає можливість перевіряти виконання першого закону Кірхгофа для будь-якого вузла електричного кола.

Для напруг звичайно будується топологічна діаграма: початок наступного вектора напруги будується з кінця попереднього вектора у тій же послідовності, в якій відповідні елементи електричного кола розташовані в схемі; це дає змогу перевіряти виконання другого закону Кірхгофа для будь-якого контуру електричного кола.

Згідно з правилами векторної алгебри кінець вектора напруги завжди напрямлений у точку з більшим потенціалом, тому доцільно побудову діаграми напруг проводити таким чином, щоб завжди рухатись проти позитивного напрямку відповідного струму в схемі електричного кола. Вектор напруги, проведений з початку координат до будь-якої точки діаграми, визначає потенціал цієї точки в електричному колі.

На рис. 6.6, *а* зображена схема нерозгалуженого електричного кола і для неї побудована суміщена векторна діаграма струму та напруг (рис. 6.6, *б*). Напрямок векторів напруг на цій діаграмі відповідає довільно обраному напрямку вектора струму I . Якщо вважати, що струм спрямовується від точки з більшим потенціалом до точки з меншим

потенціалом, то вектор напруги своєю стрілкою вказує на точку більшого потенціалу ділянки кола (не слід плутати з напрямком дії напруги, що вказаний на рис. 6.6, а).

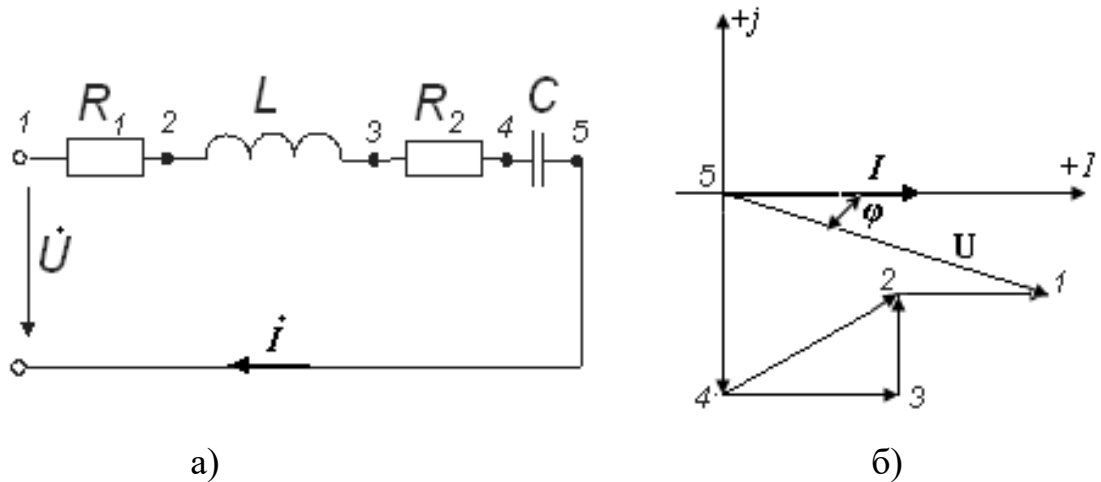


Рис. 6.6

Напрямок руху при побудові діаграми був протилежним додатному напрямку струму. Відповідно цьому послідовність розташування елементів в електричному колі така: $C \rightarrow R_2 \rightarrow L \rightarrow R_1$. Напруги на окремих елементах електричного кола визначались за формулами:

$$\underline{U}_{45} = -\frac{j}{\omega C} \underline{I}; \underline{U}_{34} = R_2 \underline{I}; \underline{U}_{23} = j\omega L \underline{I}; \underline{U}_{12} = R_1 \underline{I}. \quad (6.14)$$

При побудові якісної векторної діаграми електричного кола з послідовно-паралельним з'єднанням елементів (тобто без попереднього розрахунку струмів та напруг електричного кола) починати необхідно з будь-якого струму або напруги на *паралельній* ділянці електричного кола.

Топографічна діаграма напруг дозволяє досить просто визначити напругу між будь-якими точками електричного кола: діюче значення й фаза напруги визначаються прямою, що з'єднує відповідні точки на цій діаграмі (наприклад напруга U_{24} на рис. 6.6, б).

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В. С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг.ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – С. 83-116.
2. Бойко В. С. Теоретичні основи електротехніки - Т1/ В.С.Бойко, В.В.Бойко, Ю.Ф.Видолоб, І.А.Курило, В.І.Шеховцов, Н.А.Шидловська: Київ „Політехніка”, 2004. - С. 163-189; 191-202.
3. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян. Т.1 - Л.: Энергоатомиздат, 1981.- 536 с. – С. 106-142; 148-159.

Лабораторна робота №7 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ІЗ ВЗАЄМНОЮ ІНДУКТИВНІСТЮ

Мета роботи

Ознайомитись з явищем взаємної індукції в електричних колах з послідовним та паралельним сполученням магнітнозв'язаних котушок.

Розрахувати власні та еквівалентні активні і реактивні опори індуктивнозв'язаних котушок.

Визначити взаємну індуктивність M при різних схемах з'єднання магнітнозв'язаних котушок.

Ознайомитись з явищами "хибної ємності" та передачі енергії через магнітне поле між котушками.

Побудувати векторні діаграми для різних схем з'єднання магнітно зв'язаних котушок.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи студенти мають скласти протокол звіту, ознайомитись з методичними вказівками, робочим завданням та відповісти на такі запитання:

1. В чому сутність явища взаємоіндукції?
2. Що являє собою взаємна індуктивність M та від чого залежить її величина?
3. Що таке коефіцієнт індуктивного зв'язку $K_{зв}$ та в яких межах може змінюватись його величина?
4. Як дослідним шляхом визначити взаємну індуктивність M ?
5. Які затискачі називають однойменними і як їх визначити?
6. За яких умов при послідовному з'єднанні індуктивнозв'язаних котушок має місце ефект "хибної ємності" ?
7. За яких умов має місце передача енергії між індуктивно- зв'язаними котушками?

Робоче завдання

1. Скласти електричне коло (рис. 7.1) для визначення власних параметрів котушок та взаємної індуктивності M .

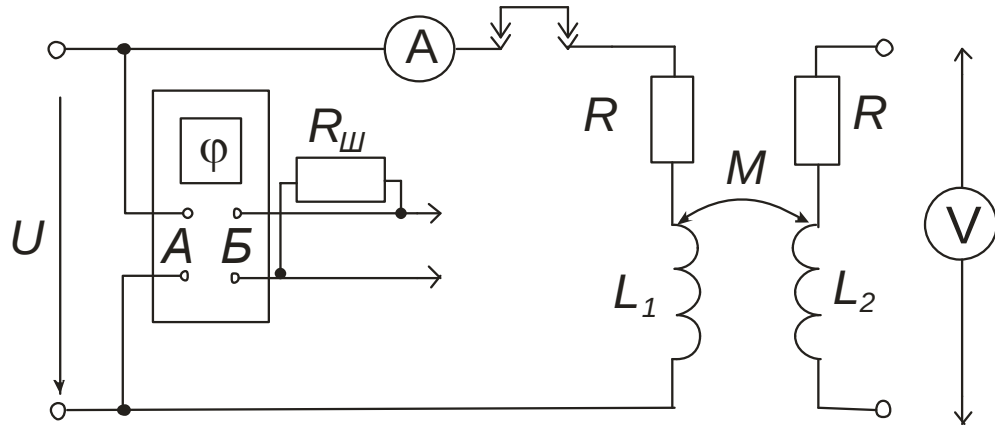


Рис. 7.1

Виміряти величини, зазначені в табл. 7.1. Розрахувати опір Виконати взаємної індуктивності $X_M = \frac{U_M}{I}$. Впевнитись, що він однаковий в обох дослідах.

Таблиця 7.1

Досліджувана котушка	Виміри				Розрахунки				
	$U, В$	$I, А$	$\varphi, ^\circ$	$U_M, В$	$P, Вт$	$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	$X_M, Ом$
Перша									
Друга									

2. Скласти електричне коло з двох послідовно з'єднаних індуктивнозв'язаних котушок (рис. 7.2).

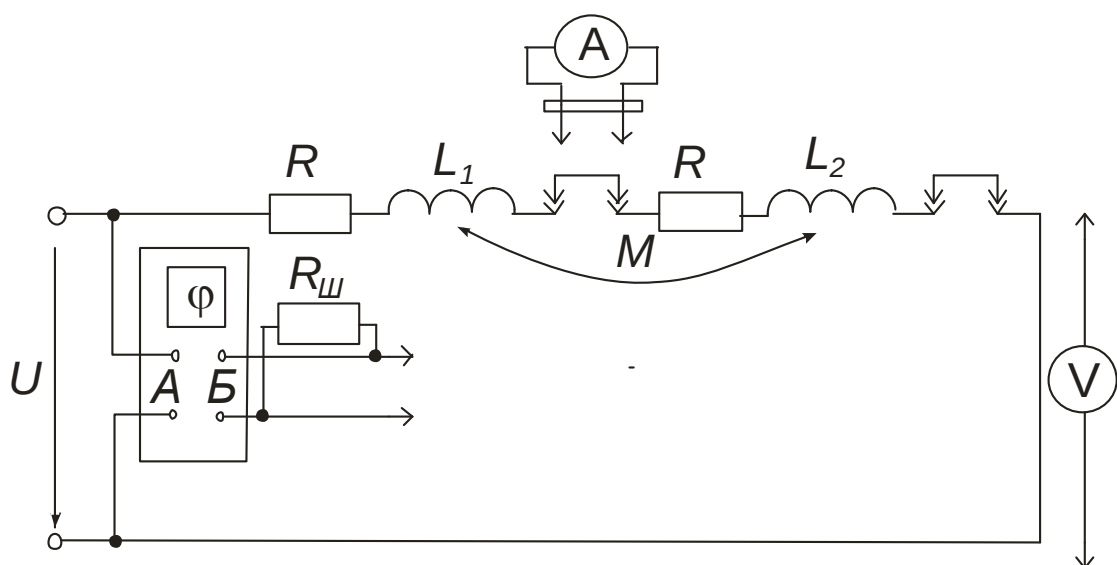


Рис. 7.2

3. Виміряти величини, зазначені в табл. 7.2, для узгодженого та зустрічного ввімкнення котушок.

Таблиця 7.2

Спосіб з'єднання котушок	Досліджувана котушка	Виміри			Розрахунки				
		U, B	I, A	$\varphi, ^\circ$	$P, Вт$	$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	$L, Гн$
Послідовно узгоджено	Перша								
	Друга								
	Обидві								
Послідовно зустрічно	Перша								
	Друга								
	Обидві								

4. Скласти електричне коло з двох паралельно з'єднаних індуктивнозв'язаних котушок (рис. 7.3).

5. Виміряти величини, зазначені в табл. 7.3, для узгодженого та зустрічного ввімкнення котушок.

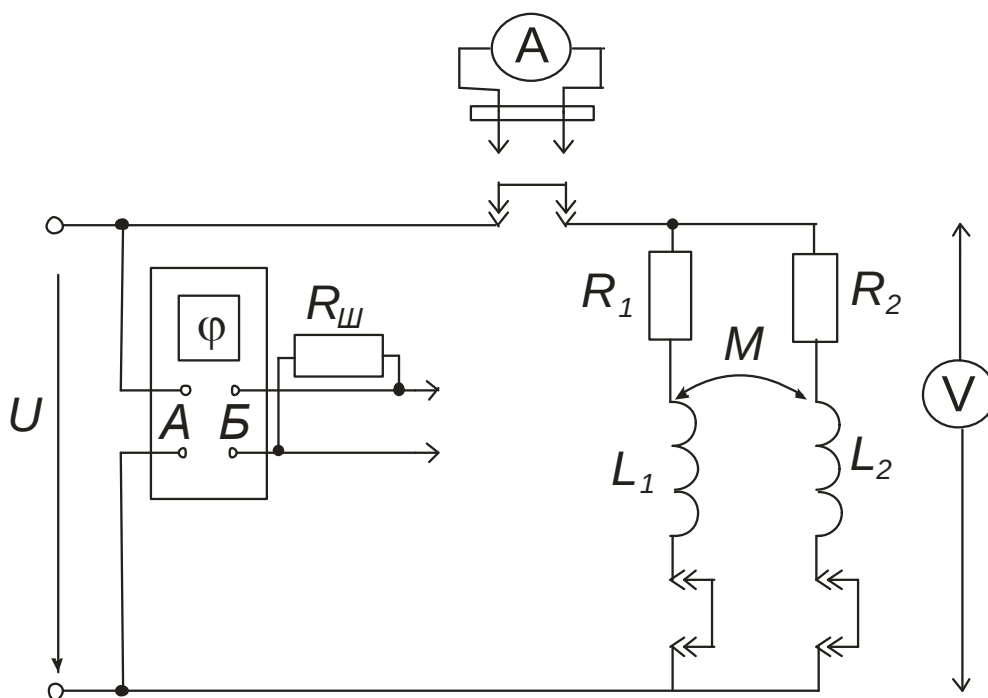


Рис. 7.3

Таблиця 7.3

Спосіб з'єднання котушок	Досліджувана котушка	Виміри			Розрахунки				
		U, B	I, A	$\varphi, ^\circ$	$P, Вт$	$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	$L, Гн$
Паралельно узгоджено	Перша								
	Друга								
	Обидві								
Паралельно зустрічно	Перша								
	Друга								
	Обидві								

6. Користуючись дослідними даними п. 1 та 2, розрахувати активний, реактивний, повний опори та індуктивність кожної з котушок, а також їх взаємну індуктивність M ; результати занести в табл. 7.1.

7. Користуючись дослідними даними п. 4 та 6, розрахувати активний, реактивний, повний опори і власну індуктивність кожної з котушок та всього кола для всіх дослідів; результати розрахунків занести у відповідні табл. (7.2 та 7.3).

8. Побудувати суміщені векторні діаграми для всіх досліджених схем з'єднання індуктивнозв'язаних котушок.

9. Для обох дослідів п.6 додатково розрахувати:

- а) активні потужності теплових втрат кожної котушки;
- б) активну потужність енергії, що передається від однієї котушки до іншої.

11. Порівняти власний і еквівалентний реактивний опори кожної з котушок для всіх досліджених випадків; пояснити одержані результати.

Завдання на навчально-дослідну роботу студентів

1. Проаналізувати явище “хибної ємності”:

а) за яких умов реактивний опір однієї з двох послідовно з'єднаних, індуктивнозв'язаних котушок має ємнісний характер?

б) якщо котушки з'єднані паралельно і зустрічно ($R_1=R_2=0$), то при якому співвідношенні між L_1 , L_2 та M струм однієї з них випереджає за фазою прикладену напругу?

2. Проаналізувати явище передачі енергії між індуктивнозв'язаними котушками та від котушки до джерела:

а) за яких умов передача енергії між котушками можлива?

б) якщо котушки з'єднані паралельно (узгоджено чи зустрічно), яка з них віддає енергію іншій?

в) за яких умов активна потужність однієї з двох паралельно з'єднаних котушок від'ємна?

Методичні вказівки

Явище наведення ЕРС в будь-якому контурі при зміні струму в іншому контурі називається *взаємоіндукцією*, а наведена ЕРС – *ЕРС взаємоіндукції*. Електричні кола, в яких наводяться ЕРС взаємоіндукції, називають ***індуктивно зв'язаними колами***.

Зв'язок поточкозчеплення взаємної індукції одного електричного кола зі струмом в іншому електричному колі характеризується *взаємною індуктивністю* M

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{w_1 \Phi_{M2}}{i_2} = \frac{w_2 \Phi_{M1}}{i_1}, \quad (7.1)$$

де 1 та 2 – номери котушок.

Взаємна індуктивність двох котушок залежить від кількості витків, форми і розмірів кожної з них, магнітних властивостей довкілля та взаємного розташування цих котушок.

Взаємну індуктивність M двох котушок можна визначити за схемою рис. 7.1. Напруга на затискачах розімкнутої котушки чисельно дорівнює ЕРС взаємоіндукції, отже

$$M = \frac{U_{M1}}{\omega \cdot I_2} = \frac{U_{M2}}{\omega \cdot I_1}, \quad (7.2)$$

де $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$ - кутова частота.

Позитивні напрямки струмів i_1 та i_2 індуктивно зв'язаних котушок вважаються *узгодженими*, якщо позитивні напрямки створюваних цими струмами магнітних потоків самоіндукції і взаємоіндукції співпадають

(потоки самоіндукції і взаємоіндукції додаються). Ввімкнення котушок в цьому випадку називають *узгодженим*. Якщо магнітні потоки самоіндукції та взаємоіндукції напрямлені назустріч один одному, ввімкнення котушок називається *зустрічним*.

Затискачі котушок, відносно яких струми на схемі напрямлені однаково і котушки при цьому ввімкнені узгоджено, називаються *однойменними* або *однополярними*. На схемі однойменні затискачі маркуються символом у вигляді точки (зірки, трикутника тощо).

Ступінь індуктивного зв'язку двох котушок характеризується коефіцієнтом магнітного зв'язку

$$K_{зв} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (7.3)$$

який показує, яка частина потоку, створеного струмом однієї котушки, зчіплюється з іншою котушкою. Оскільки потік взаємоіндукції у котушці менший за потік самоіндукції (за рахунок потоку розсіювання), коефіцієнт магнітного зв'язку завжди менший за одиницю.

Для двох індуктивно зв'язаних котушок, з'єднаних послідовно і ввімкнених узгоджено (рис. 7.4), рівняння в диференціальній формі має вигляд

$$u = u_{ab} + u_{bc} = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}, \quad (7.3)$$

а для кола синусоїдного струму в комплексній формі

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_{ab} + \underline{U}_{bc} = (R_1 + j \cdot X_1 + j \cdot X_M) \cdot \underline{I} + (R_2 + j \cdot X_2 + j \cdot X_M) \cdot \underline{I} = \\ &= (R_1 + j \cdot X_{1y}) \cdot \underline{I} + (R_2 + j \cdot X_{2y}) \cdot \underline{I} = \underline{Z}_{1y} \cdot \underline{I} + \underline{Z}_{2y} \cdot \underline{I} = \underline{I} \cdot \underline{Z}_y. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Повний опір кола в комплексній формі розраховується за формулою

$$\begin{aligned} \underline{Z}_y &= Z_y e^{j\varphi_y} = (R_1 + R_2) + j \cdot (X_1 + X_2 + 2 \cdot X_M) = \\ &= (R_1 + R_2) + j \cdot \omega \cdot (L_1 + L_2 + 2 \cdot M). \end{aligned} \quad (7.4)$$

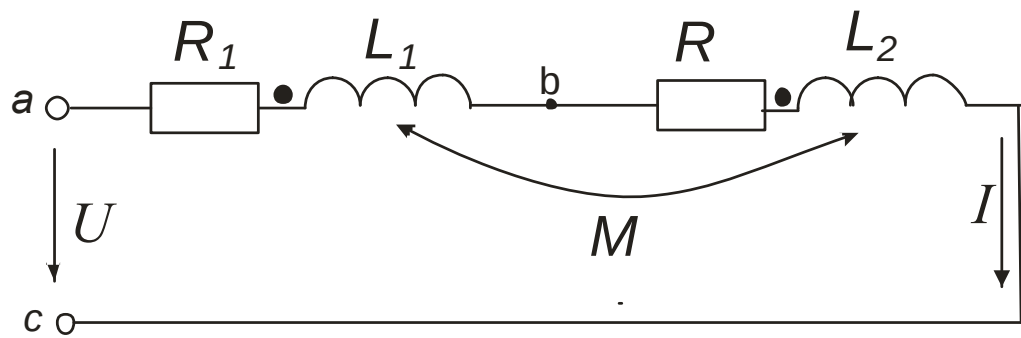


Рис. 7.4

При послідовному з'єднанні індуктивнозв'язаних котушок вся енергія, що надходить в коло кожної котушки, перетворюється на тепло в тій же котушці. Активна потужність теплових втрат котушки прямо пропорційна активному опору її обмотки, отже наявність взаємоіндукції ніяким чином не впливає на величину активного опору кожної котушки окремо та активного опору кола в цілому.

В той же час взаємоіндукція впливає на величину реактивного опору та еквівалентної індуктивності кожної котушки, які збільшуються, відповідно, на X_M та M :

$$\begin{aligned} X_{1y} &= X_1 + X_M; L_{1y} = \frac{X_{1y}}{\omega} = L_1 + M; \\ X_{2y} &= X_2 + X_M; L_{2y} = \frac{X_{2y}}{\omega} = L_2 + M. \end{aligned} \quad (7.5)$$

Еквівалентна індуктивність всього кола в такому випадку

$$L_y = L_{1y} + L_{2y} = (L_1 + M) + (L_2 + M) = L_1 + L_2 + 2M. \quad (7.6)$$

Якщо в схемі (рис. 7.4) затискачі однієї з котушок поміняти місцями, отримаємо послідовне зустрічне з'єднання. Рівняння такого електричного кола буде відрізнятися від попереднього від'ємним знаком перед складовими, що вміщують взаємну індукцію M .

Якщо $L_1 > M > L_2$, еквівалентний реактивний опір другої котушки буде від'ємним, струм цієї котушки буде випереджати напругу на її затискачах; таке явище називають ефектом «хибної ємності».

Еквівалентна індуктивність всього кола, в разі послідовного зустрічного з'єднання котушок розраховується за формулою

$$L_3 = L_{13} + L_{23} = L_1 + L_2 - 2M \quad (7.7)$$

і при цьому завжди $L_3 > 0$.

Виконавши досліди з узгодженим та зустрічним послідовним з'єднанням двох котушок, взаємну індукцію визначають так

$$M = \frac{X_y - X_3}{4\omega} = \frac{L_y - L_3}{4\omega}. \quad (7.8)$$

Паралельне з'єднання індуктивно зв'язаних котушок називають узгодженим, якщо однойменні затискачі котушок з'єднані між собою (рис. 7.5).

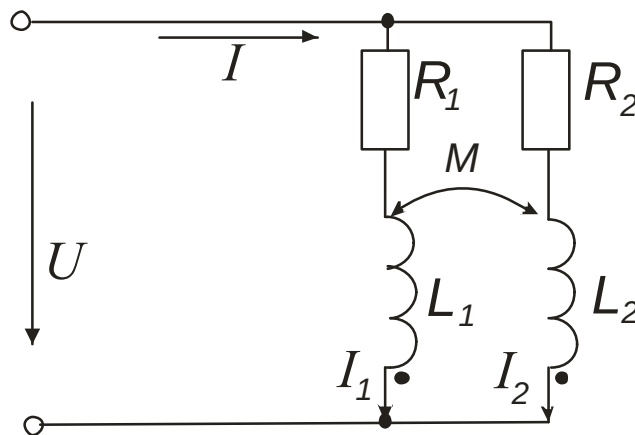


Рис. 7.5

Позначивши: $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$, $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$, $\underline{Z}_M = j\omega M$, запишемо систему рівнянь такого електричного кола

$$\begin{aligned}\underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{U} &= \underline{I}_1 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2 \underline{Z}_M; \\ \underline{U} &= \underline{I}_2 \underline{Z}_2 + \underline{I}_1 \underline{Z}_M.\end{aligned}\tag{7.9}$$

Розв'язавши ці рівняння, отримаємо:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}(\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{1y}}; \\ \underline{I}_2 &= \frac{\underline{U}(\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{2y}}; \\ \underline{I} &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_y}.\end{aligned}\tag{7.10}$$

Комплексні значення опорів першої і другої котушок, а також всього електричного кола відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{1y} &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M} = R_{1y} + jX_{1y}; \\ \underline{Z}_{2y} &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M} = R_{2y} + jX_{2y}; \\ \underline{Z}_y &= \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M} = R_y + jX_y.\end{aligned}\tag{7.11}$$

З цього випливає, що при паралельному з'єднанні індуктивнозв'язаних котушок їхній активний та реактивний опори не дорівнюють, відповідно, власному активному та реактивному опорам. Це легко зрозуміти, якщо побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг електричного кола (рис. 7.6).

Діаграма побудована для котушок, параметри яких відрізняються між собою, тому й струми, що через них проходять, мають різну величину й фазу.

Активна потужність P_1 , яку джерело енергії віддає котушці 1, дорівнює сумі активної потужності теплових втрат в цій котушці P_{1T} та активної потужності P_{1M} , що надходить в загальне магнітне поле через котушку 1:

$$P_1 = P_{1T} + P_{1M}, \quad \text{звідки} \quad P_{1T} = P_1 - P_{1M}.$$

Аналогічно для котушки 2:

$$P_2 = P_{2T} + P_{2M}, \quad \text{звідки} \quad P_{2T} = P_2 - P_{2M}.$$

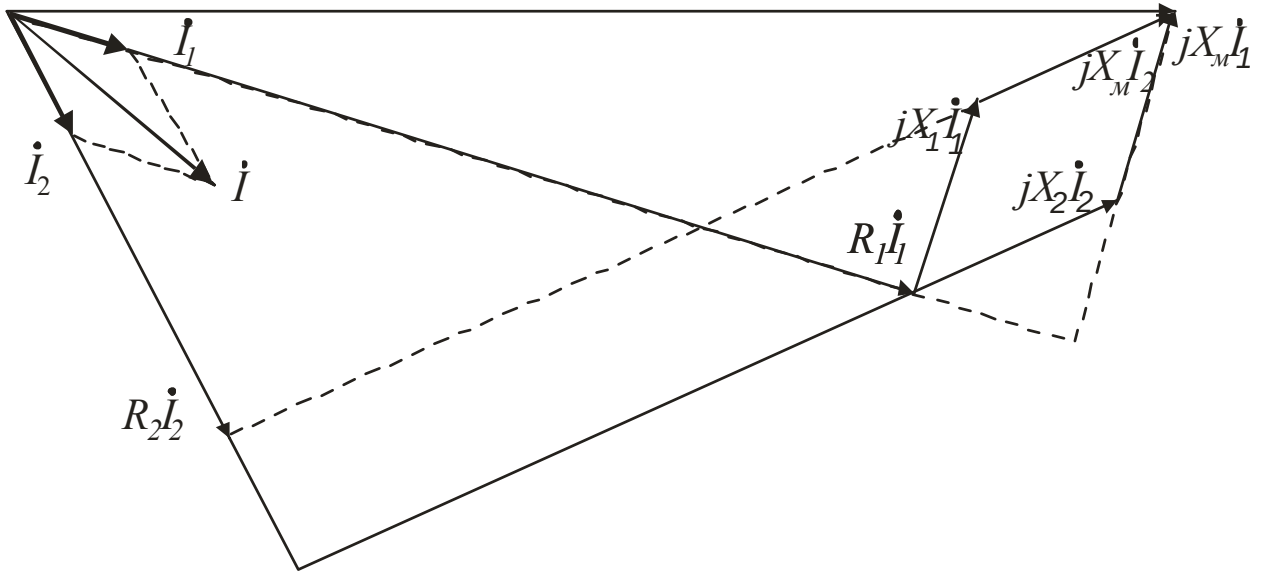


Рис. 7.6

Баланс активних потужностей для всього кола записують так:

$$P = P_1 + P_2 \quad \text{або} \quad P = P_{1T} + P_{2T}$$

де P - активна потужність, яка поступає від джерела енергії в обидві котушки. Врахувавши попереднє, отримаємо:

$$P = P_1 - P_{1M} + P_2 - P_{2M}, \quad \text{звідки} \quad -P_{1M} - P_{2M} = 0, \quad \text{або} \quad P_{1M} = -P_{2M}.$$

Як бачимо, вся активна потужність, що надходить в загальне магнітне поле через першу котушку 1 має повернутися до котушки 2 (чи навпаки), якщо знак $P_{1M} = X_M I_1 I_2 \sin(\psi_{i_2} - \psi_{i_1})$ від'ємний, тобто в залежності від кута, між струмами $\underline{I}_1$ та $\underline{I}_2$.

Отже, якщо $0 < \psi_{i_1} - \psi_{i_2} < \pi$, $P_{1M} > 0$, $P_{2M} < 0$, і енергія передається від джерела енергії у магнітне поле через котушку 1, а повертається до джерела через котушку 2. В цьому випадку еквівалентний активний опір котушки 1 більший за її власний активний опір, а еквівалентний активний опір котушки 2 менший за її власний активний опір.

Якщо $0 < \psi_{i_2} - \psi_{i_1} < \pi$, $P_{1M} < 0$, $P_{2M} > 0$, і енергія надходить у магнітне поле через котушку 2, а повертається у джерело через котушку 1. Відповідно еквівалентний активний опір котушки 1 менший за її власний активний опір, а еквівалентний активний опір котушки 2 більший за її власний активний опір.

При відповідній комбінації параметрів котушок одна із них може працювати у генераторному режимі, а кут зсуву фаз у цій котушці буде більшим за 90 електричних градусів; баланс потужностей виконується у будь-якому випадку.

Якщо в схемі рис. 7.5 затискачі однієї з котушок поміняти місцями, отримаємо паралельне зустрічне з'єднання. Рівняння такого електричного кола будуть відрізнятися від рівнянь у випадку узгодженого ввімкнення від'ємним знаком перед складовими, що вміщують взаємоіндукцію M .

В разі паралельного зустрічного з'єднання індуктивнозв'язаних котушок в одній з них також можливе явище “хибної ємності”.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг.ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – С. 159-176.
2. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян Т.1 - Л.: Энергоатомиздат, 1981. - 536 с. – С.184-199.
3. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - М.: Энергия. 1975.- 752 с. – С. 95-105.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л.А. Бессонов. - М.: Высш. шк., 1978.- 528 с. – С.198-207.

Лабораторна робота №8

РЕЗОНАНС НАПРУГ

Мета роботи

Ознайомлення з явищем резонансу в електричному колі з послідовним сполученням індуктивної котушки та конденсатора.

Дослідження умов виникнення резонансу.

Побудова резонансних кривих та частотних характеристик.

Використання, для аналітичних розрахунків, співвідношень, що характеризують резонансний режим.

Підготовка до роботи

При підготовці до роботи студенти мають скласти протокол звіту, ознайомитись з методичними вказівками, робочим завданням та відповісти на такі запитання:

1. Яке фізичне явище називають резонансом?
2. Чому явище резонансу в послідовному коливному контурі називають резонансом напруг?
3. Зміною яких параметрів досягається резонанс в послідовному коливальному контурі?
4. Які енергетичні процеси мають місце в коливальному контурі при резонансі?
5. Чому дорівнює повний опір послідовного коливального контура при резонансі напруг?
6. Що називають хвильовим опором, добротністю та згасанням послідовного резонансного контура?
7. Як визначити наявність резонансного стану в електричному колі за показом приладів?

Робоче завдання

1. Скласти електричне коло з послідовним сполученням конденсатора і

індуктивної котушки, відповідно до схеми рис. 8.1.

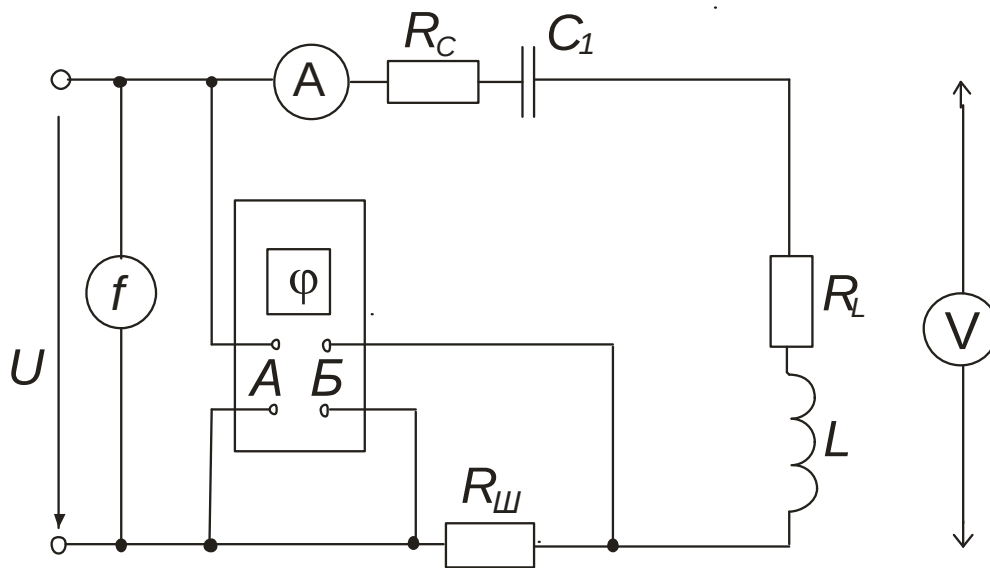


Рис. 8.1

2. Для живлення електричного кола використати джерело синусоїдної напруги регульованої частоти. Величина робочої напруги в межах 3...5 (В); діапазон робочої частоти задає викладач.

3. Установити середнє значення діапазону робочої частоти, замкнути конденсатор і за показами приладів визначити параметри індуктивної котушки разом з міліамперметром, що використовуються в досліді.

4. Досягти резонансного стану електричного кола, змінюючи ємність конденсатора. Занотувати значення резонансної ємності C_0 , індуктивності L_0 , та частоти f_0 .

5. Виміряти величини, зазначені в табл. 8.1, для трьох дослідів:

а) змінюючи в можливих межах індуктивність котушки при незмінних резонансних ємності C_0 та частоті f_0 ;

б) змінюючи в можливих межах ємність конденсатора при незмінних резонансних індуктивності L_0 та частоті f_0 ;

в) змінюючи в межах, визначених викладачем, частоту джерела живлення при незмінних резонансних ємності C_0 та індуктивності L_0 .

Таблиця 8.1

Дослід	$L,$ $Гн$	$C,$ $мкФ$	$f,$ $Гц$	$U,$ $В$	$U_L,$ $В$	$U_C,$ $В$	$I,$ $А$	$\varphi,$ $град.$	$P,$ $Вт$
Змінюється L									
Змінюється									
Змінюється f									

6. За результатами вимірів п.5 побудувати резонансні криві струму кола I , напруги на котушці індуктивності U_L та конденсаторі U_C , кута зсуву фаз кола φ для кожного із трьох дослідів (а, б, с).

7. За результатами вимірів п.5б побудувати векторні діаграми кола для випадків, коли $C < C_0$; $C = C_0$; $C > C_0$.

8. Розрахувати хвильовий опір ρ , добротність Q та згасання контуру d .

9. Зробити і записати у протоколі звіту висновки по роботі.

Завдання на навчально-дослідну роботу студентів

1. Побудувати частотні характеристики послідовного коливального контуру.
2. Довести, що найбільші значення напруг індуктивної котушки та конденсатора при зміні частоти в широких межах перевершують відповідні значення в резонансному стані.
3. Побудувати резонансні характеристики послідовного коливального контуру, що живиться від джерела струму, частота якого змінюється.
4. Як залежить вигляд резонансної кривої струму від добротності контуру?
5. Визначити смугу пропускання послідовного резонансного контуру.

Методичні вказівки

*Явище, коли струм і напруга в колі (чи на його ділянці), незважаючи на наявність у ньому реактивних елементів (катушок індуктивності та конденсаторів), збігаються за фазою, називають **резонансом**.*

В резонансному режимі має місце повна компенсація реактивних опорів кола (чи його ділянки). При цьому вхідний опір є суто активним, реактивна потужність, відповідно, дорівнює нулю, а вся електрична енергія, що надходить від джерела, перетворюється у теплову.

За певних умов, резонанс реактивних елементів може виникнути в електричному колі з послідовним сполученням індуктивності і ємності. Таке нерозгалужене електричне коло, що вміщує послідовно сполучені елементи R , L і C (рис. 8.2), є найпростішим резонансним колом або ідеальним послідовним коливальним контуром.

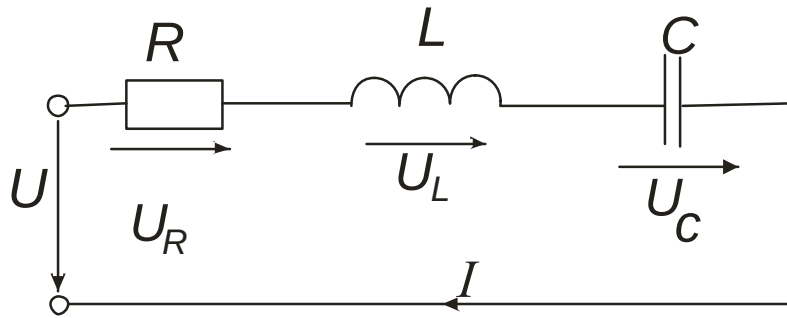


Рис. 8.2

Умова резонансу в такому електричному колі:

$$X_{\text{BX}} = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \text{ або } \omega^2 LC = 1 \quad (8.1)$$

З останнього виразу випливає, що резонансного стану в ідеальному коливальному контурі можна досягти, змінюючи одну з трьох величин: ω , L чи C . Відповідно, їх значення для резонансного режиму розраховуються так:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; L_0 = \frac{1}{\omega^2 C}; C_0 = \frac{1}{\omega^2 L} \quad (8.2)$$

Повний опір такого електричного кола в стані резонансу напруг $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} = R$ є суто активним за характером та найменш можливим за величиною. Відповідно, струм та потужність, що споживається, досягають найбільших значень.

Реактивний опір котушки індуктивності або конденсатора в режимі резонансу

$$\rho = \omega_0 L; L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (8.3)$$

називається *хвильовим опором резонансного контуру*.

Якщо реактивні опори X_L та X_C при резонансі більші, ніж активний опір R , напруги на затискачах індуктивної котушки та конденсатора будуть більші

за напругу на вході електричного кола. Тому резонанс у послідовному коливальному контурі називають резонансом напруг.

Величина

$$Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{\omega_0 L_0}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R} = \frac{\rho}{R} \quad (8.3)$$

називається *добротністю контура* і визначає перевищення реактивної складової напруги на реактивних елементах, при резонансі над прикладеною до кола напругою. Користуються також оберненою величиною – згасанням контура: $d = 1/Q$.

Залежності фізичних величин кола від частоти називають частотними характеристиками кола. Залежності: $I(\omega)$, $U_R(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$ при резонансі називаються резонансними характеристиками кола.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: Підручник: У 3 т. / В.С. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін.; За заг.ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К.: ІВЦ “Видавництво «Політехніка»”, 2004. – Т.1: Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами. – С. 147-158.
2. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки / В.С.Бойко, В.В.Бойко, Ю.Ф.Видолоб, І.А.Курило, В.І.Шеховцов, Н.А.Шидловська – Т1: Київ „Політехніка”, 2004. -272с. – С. 175-180, 261-267.
3. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчян Т.1 - Л.: Энергоатомиздат, 1981. - 536 с. – С.175-180.
4. Каплянский А. Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники / А.Е. Каплянский, А.П. Лысенко, Л.С. Полотовски. - М.: Высш. шк., 1972. – 447 с. – С.147-149.

ДОДАТОК А

Приклад оформлення титульного аркуша лабораторної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра теоретичної електротехніки

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки - 1"

на тему: "МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ"

Виконав студент групи ЕВ - 01 Іваненко І.І.

(підпис)

Перевірив

(підпис)

Київ – 202__р.