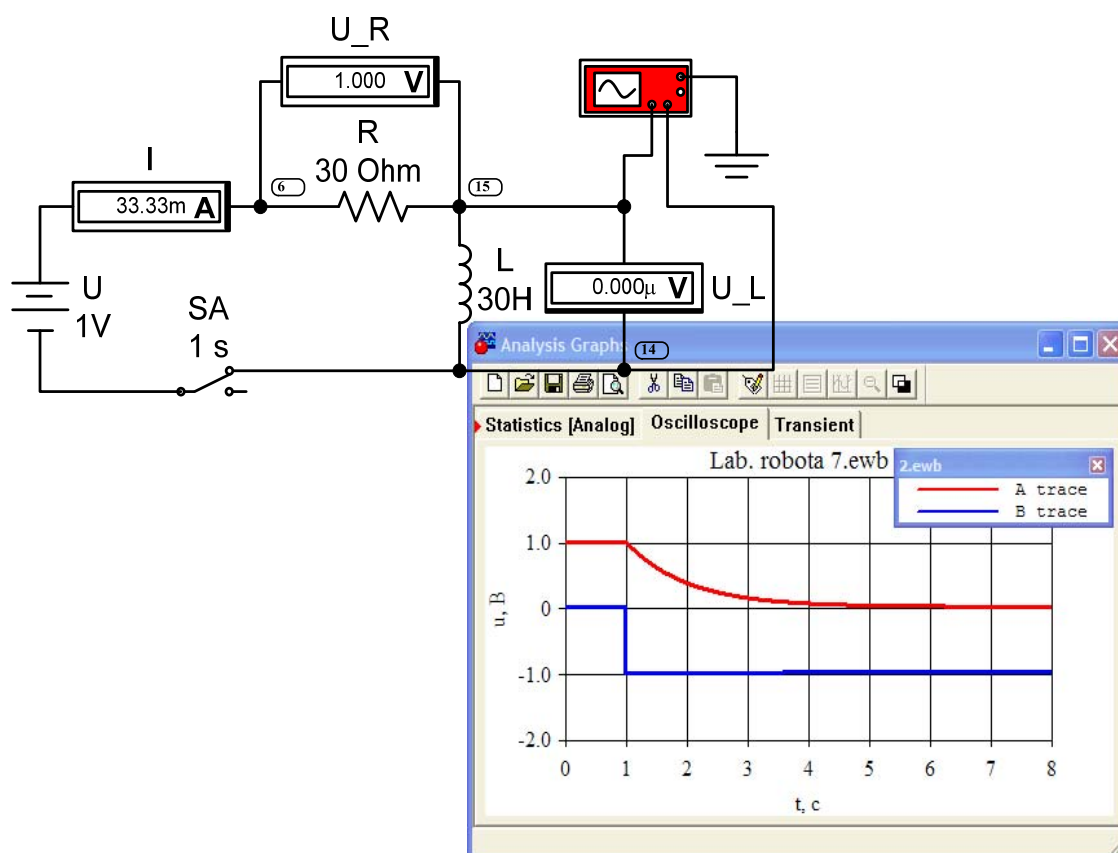


М.П. Розводюк, Є.Я. Блінкін, В.С. Ткач

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

### Частина I. Дослідження електричних кіл

*Навчальний посібник*



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**М.П. Розводюк. Є.Я. Блінкін, В.С. Ткач**

## **ЕЛЕКТРОТЕХНІКА**

### **Частина I. Дослідження електричних кіл**

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів спеціальностей Технологія машинобудування, Металорізальні верстати та системи, Автомобілі та автомобільне господарство, Технологія і устаткування відновлення та підвищення зносостійкості машин і конструкцій, Теплоенергетика, Промислове і цивільне будівництво, Міське будівництво та господарство, Теплогазопостачання і вентиляція. Протокол №3 від 26 жовтня 2006 р.

Вінниця ВНТУ 2006

УДК 621.311(07)

Р64

*Рецензенти:*

**Ю.О. Карпов**, доктор технічних наук, професор

**Б.С. Рогальський**, доктор технічних наук, професор

**В.І. Нагул**, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Розводюк М.П., Блінкін Є.Я., В.С. Ткач**

**Р64 Електротехніка. Частина І. Дослідження електричних кіл.**  
Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2006. – 206 с.

В навчальному посібнику викладені підходи до експериментальних досліджень електричних кіл. Для кожного лабораторного заняття наведені основні теоретичні відомості, задачі для самостійного розв'язування, програма лабораторної роботи і методичні вказівки для її виконання, питання для самоконтролю та вправи для закріплення матеріалу. Запропоновані лабораторні роботи дозволяють охопити основні питання для закріплення теоретичних знань з дисциплін „Електротехніка”, „Електротехніка в будівництві”, „Теоретичні основи електротехніки” для неелектротехнічних спеціальностей. Навчальний посібник рекомендується для студентів, які навчаються за напрямками 0902 – Інженерна механіка, 0923 – Зварювання, 0905 – Енергетика, 0921 – Будівництво.

УДК 621.311(07)



**ЗМІСТ**

<b>Передмова</b> .....	7
<b>Вступ</b> .....	8
Організація і порядок виконання лабораторних робіт.....	8
Техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт .....	11
Правила виконання лабораторних робіт .....	12
Електровимірювальні прилади .....	14
Особливості моделювання в Electronics Workbench .....	17
<b>Лабораторна робота №1 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО     ЛІНІЙНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ</b> .....	20
1.1 Основні теоретичні положення .....	20
1.2 Програма роботи.....	29
1.3 Питання для самоконтролю .....	36
1.4 Задачі для самостійного розв’язування .....	36
1.5 Вправи для закріплення матеріалу.....	39
<b>Лабораторна робота №2 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО КОЛА     ПОСТІЙНОГО СТРУМУ</b> .....	45
2.1 Основні теоретичні положення .....	45
2.1.1 Загальні відомості про нелінійні елементи та нелінійні кола .....	45
2.1.2 Графічний метод розрахунку нелінійних кіл .....	48
2.1.3 Графоаналітичний метод розрахунку нелінійних кіл .....	51
2.2 Програма роботи.....	51
2.3 Питання для самоконтролю .....	53
2.4 Задачі для самостійного розв’язування .....	55
2.5 Вправи для закріплення матеріалу.....	56

<b>Лабораторна робота №3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНОГО ОПОРУ, ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ .....</b>	<b>59</b>
3.1 Основні теоретичні положення .....	59
3.1.1 Коло змінного струму з резистивним елементом .....	59
3.1.2 Коло змінного струму з індуктивністю .....	61
3.1.3 Коло змінного струму з конденсатором .....	63
3.1.4 Послідове з'єднання резистора, конденсатора й індуктивності .....	65
3.2 Програма роботи .....	70
3.3 Питання для самоконтролю .....	72
3.4 Задачі для самостійного розв'язування .....	73
3.5 Вправи для закріплення матеріалу .....	74
3.5.1 Послідовне з'єднання резистора та індуктивності .....	75
3.5.2 Послідовне з'єднання резистора та ємності .....	77
3.5.3 Послідовне з'єднання індуктивності, ємності та резистора .....	77
<b>Лабораторна робота №4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНОГО ОПОРУ, РЕАЛЬНОЇ ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ ТА ЄМНОСТІ .....</b>	<b>81</b>
4.1 Основні теоретичні положення .....	81
4.2 Програма роботи .....	91
4.3 Питання для самоконтролю .....	93
4.4 Задачі для самостійного розв'язування .....	93
4.5 Вправи для закріплення матеріалу .....	98

---

<b>Лабораторна робота №5 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ ДЖЕРЕЛА ТА СПОЖИВАЧІВ ЗА СХЕМОЮ „ЗІРКА”</b> .....	101
5.1 Основні теоретичні положення .....	101
5.2 Програма роботи .....	114
5.3 Питання для самоконтролю .....	116
5.4 Задачі для самостійного розв'язування .....	116
5.5 Вправи для закріплення матеріалу .....	118
<b>Лабораторна робота №6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ЗА СХЕМОЮ „ТРИКУТНИК”</b> .....	122
6.1 Основні теоретичні положення .....	122
6.1.1 Загальні відомості .....	122
6.1.2 Симетричне навантаження .....	124
6.1.3 Несиметричне навантаження .....	128
6.1.4 Обрив фази навантаження .....	130
6.1.5 Обрив лінійного проводу .....	132
6.2 Програма роботи .....	139
6.3 Питання для самоконтролю .....	141
6.4 Задачі для самостійного розв'язування .....	142
6.5 Вправи для закріплення матеріалу .....	146
<b>Лабораторна робота №7 ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ</b> .....	149
7.1 Основні теоретичні положення .....	149
7.1.1 Закони комутації .....	150
7.1.2 Перехідні процеси в колі з резистивним та індуктивним елементами .....	152
7.1.2.1 Підключення електричного кола з $R, L$ елементами до джерела живлення .....	152

7.1.2.2 Відключення електричного кола з $R, L$ елементами .....	155
7.1.3 Перехідні процеси в колі з резистивним та ємнісним елементами .....	157
7.1.3.1 Підключення електричного кола з $R, C$ елементами до джерела живлення .....	157
7.1.3.2 Розряд конденсатора на резистор.....	159
7.2 Програма роботи.....	163
7.3 Питання для самоконтролю .....	164
7.4 Задачі для самостійного розв'язування .....	165
7.5 Вправи для закріплення матеріалу.....	170
<b>Література</b> .....	175
Додаток А Зразок оформлення титульного аркуша звіту з лабораторної роботи.....	176
Додаток Б Одиниці міжнародної системи (SI).....	177
Додаток В Позначення елементів електричних схем.....	179
Додаток Д Графічні позначення елементів .....	184
Додаток Е Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів .....	204



## Передмова

Запропонований навчальний посібник складений згідно програмами дисциплін „Електротехніка” та „Електротехніка в будівництві” при опануванні яких у лабораторіях навчальних закладів виконуються навчальні дослідження електричних кіл. Це допомагає студентам опанувати теоретичні розділи курсу. В процесі лабораторних досліджень студенти набувають навичок у складанні електричних схем, методиці проведення експериментів і обробки їхніх результатів.

Практичні задачі з теми кожної роботи наводяться у вказівках перед описом робіт. Розв’язання задач та моделювання електричних процесів в програмі Electronics Workbench канадської фірми Interactive Image Technologies дозволяє студенту краще засвоїти матеріал та володіти сучасними технологіями. До кожної лабораторної роботи наведено і питання для самоконтролю, що дозволяє студенту перевірити себе на готовність до виконання роботи та її захисту.

З метою полегшення та прискорення підготовки студентів до проведення експериментів в посібнику наведено загальні теоретичні відомості з вище вказаних курсів. В кожній роботі, разом із самостійними випробуваннями, передбачається аналізування отриманих результатів та порівняння їх з теоретичними положеннями.

## Вступ

### Організація і порядок виконання лабораторних робіт

Першим заняттям є ввідне, яке передбачає проведення всіх необхідних організаційних заходів щодо проведення лабораторного практикуму в електротехнічній лабораторії. Студенти неелектротехнічних спеціальностей знайомляться зі специфічними умовами роботи в даній лабораторії, правилами внутрішнього розпорядку, організацією робочого часу й питаннями техніки безпеки під час роботи. Проводиться ознайомлення з лабораторним обладнанням: електричними стендами для дослідження електричних кіл, електричних машин, основ електроніки; електровимірвальними приладами, електричними машинами, напівпровідниковими приладами.

Організаційні питання і порядок проведення лабораторних робіт включають такі пункти:

1. Студентів, які працюють в лабораторії, розподіляють на окремі бригади в складі двох-чотирьох чоловік в кожній.
2. Студент, який входить до складу бригади, зобов'язаний завчасно підготуватися до лабораторного заняття за лекційними записами, рекомендованою навчальною літературою та відповідною методичною інструкцією, поданою у даному навчальному посібнику; заготовити бланк встановленої форми з ретельно накресленою на ньому електричною схемою установки та з необхідними таблицями для записування експериментальних даних.
3. Прийшовши в лабораторію, студенти мають надати керівникові занять заготовлені бланки для перегляду, після чого бригада одержує право почати виконання роботи за відповідним лабораторним столом.
4. Після складання схеми всі невикористані провідники потрібно відразу ж прибрати зі столу.

5. Не дозволяється вмикати рубильники, автоматичні вимикачі до перевірки керівником правильності з'єднань приладів, апаратів та машин.
6. У разі будь-яких Perez'єднань у зібраній установці потрібно, щоб її перед вмиканням ще раз перевірів керівник.
7. Кожна робота виконується з приладами, які для неї спеціально призначені. Брати будь-які інші прилади без дозволу керівника або лаборанта заборонено!
8. У разі пошкодження будь-якого приладу студент зобов'язаний негайно повідомити про це керівника.
9. Закінчивши випробування, кожний студент зобов'язаний до розбирання схеми надати керівникові для підпису бланк з результатами спостережень. Якщо результати дослідів незадовільні або зовсім не будуть надані керівникові, то робота вважається невиконаною і призначається для повторного виконання.
10. Після зарахування керівником результатів дослідів студенти мають розібрати всі з'єднання, провідники ретельно скласти, зібрати прилади, накрити їх кришками та загвинтити.
11. Студентів допускають до виконання наступної роботи тільки після того, як вони подадуть керівникові окремий звіт про попередню роботу. Зразок оформлення титульного аркуша звіту наведено в додатку А.

У звіті подаються: короткий опис змісту роботи, схема електрична принципова установки, перелік усіх використаних приладів і апаратури з їх технічними даними, результати спостережень, розрахунків з відповідними графіками, а також короткий висновок з виконаної роботи. Розрахунки потрібно виконувати з врахуванням одиниць міжнародної системи SI (додаток Б).

Звіт оформляється за допомогою комп'ютера на одній стороні аркуша білого паперу формату А4 (210x297 мм) з рамкою зі штампом

15 мм через 1,5 міжрядкового інтервалу. Шрифт – Times New Roman, 14 кегль. Текст необхідно друкувати, залишаючи поля таких розмірів: ліве – 30 мм, праве – 15 мм, верхнє – 20 мм, нижнє – 30 мм.

Графіки будують за допомогою комп'ютера або вручну (бажано на міліметровому папері). При цьому повинна бути координатна сітка, а на кожній з координатних осей – нанесені позначення, їхні одиниці і масштаб. Для правильного уявлення про вигляд характеристик, масштаби вибирають таким чином, щоб початок координат відповідав нульовим значенням як функцій, так і їхніх аргументів.

При побудові характеристик вручну спочатку наносять експериментальні точки, а потім проводять плавну криву, розташовану якомога ближче до основної кількості цих точок. При комп'ютерній побудові характеристик ця процедура реалізується за допомогою згладжування експериментальних даних. Отриману усереднену криву і вважають дослідною характеристикою.

12. При складанні схеми та користуванні буквеними або графічними символами потрібно використовувати умовні позначення, які прийняті в лабораторії загальної електротехніки відповідно до діючих ДЕСТів (приклади буквених позначень найуживаніших елементів наведені в додатку В, а їхні зображення – в додатку Д).
13. Студентам, які працюють у лабораторії, заборонено: торкатися деталей, що знаходяться під напругою, або тих частин машин і апаратів, які рухаються; виконувати будь-які перемикання на головних розподільних щитах, випрямлячах або перетворювальних пристроях; робити зміни у складених електричних колах під напругою; розрізати провідники на частини; писати крейдою на приладах, машинах, апаратах, щитах та столах, а також переміщувати лабораторне майно, розставлене за певним планом.

## Техніка безпеки при виконанні лабораторних робіт

Лабораторні роботи в електричних лабораторіях повинні виконуватися з дотриманням правил з техніки безпеки (ПТБ).

Потрібно пам'ятати, що електричний струм більший 0,05 – 0,1 А, протікаючи через внутрішні органи людини, призводить до смертельного результату. Значення небезпечної для людини напруги  $U_{неб}$  визначається за формулою:

$$U_{неб} \geq 0,05 R_l I_l, \quad (1)$$

де  $R_l$  – опір ділянки тіла, між точками якої прикладена напруга, по якому протікає струм  $I_l$ .

Значення  $R_l$  (залежить від багатьох причин) в небагатьох випадках знижується до кількох сотень Ом (800 – 600). Небезпечне враження струмом може відбутися при напругах 30 – 40 В.

Основні правила з техніки безпеки, яких повинні дотримуватися студенти:

1. До роботи в лабораторії допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки в даному навчальному році. Про проходження інструктажу з ПТБ повинні бути зроблені відповідні записи в журналі реєстрації інструктажу, після чого відповідальність за виконання правил техніки безпеки лягає на студентів, які працюють в лабораторії.

При порушенні ПТБ студент усувається від виконання лабораторних робіт до проходження повторного інструктажу.

2. Для запобігання порушень з ПТБ студенти повинні добре знати методику проведення лабораторних робіт, особливості роботи приладів і установок та засоби безпеки.
3. Встановлені запобіжники повинні відповідати нормам. Заміну запобіжників дозволяється проводити тільки обслуговуючому персоналу.

4. Корпуси електричних машин і установок повинні бути заземлені або занулені для зменшення потенціалу корпусу при пробі ізоляції машини чи установки.
5. Складання, розбирання схеми, виправлення в ній виконувати тільки при вимкненому вимикачі (автоматі).
6. Подавати напругу живлення на схему після її збирання чи виправлення дозволяється тільки після того, як схему перевірів викладач або лаборант.
7. Забороняється дотикатися до неізольованих струмоведучих частин схеми, що знаходяться під напругою.
8. Забороняється працювати з неробочими агрегатами, приладами або установками. При виявленні несправностей потрібно негайно повідомити викладачеві або лаборанту.
9. Розташовувати вимірювальні пристрої необхідно з урахуванням зручностей спостереження.
10. В електричних полях ємностей і магнітних полях індуктивностей накопичується енергія, тому не потрібно розмикати вторинні обмотки трансформатора струму, коли по первинній протікає струм, дотикатися до виводів конденсаторів, передчасно не розрядивши їх, і т.ін.

### **Правила виконання лабораторних робіт**

Для виконання лабораторних робіт необхідна самостійна підготовка, під час якої студент повинен уважно проаналізувати рекомендації до лабораторної роботи, а також опрацювати в конспекті лекцій або в рекомендованому підручнику теоретичні положення, необхідні для чіткого розуміння мети і методів виконання лабораторної роботи.

Наступним кроком потрібно підготувати бланк звіту, на якому повинні бути схеми електричні принципів, виписані усі розрахункові формули і заготовлені таблиці для записування величин, що вимірюються та розраховуються при виконанні досліду.

Студенти виконують лабораторні роботи бригадами (по 2-4 чоловіки в кожній). Склад бригади закріплюється на весь навчальний триместр. Щоб кожний студент засвоїв всі без виключення елементи лабораторних робіт (збирання схем, регулювання струму чи напруги, відлік показів приладів і т.п.), рекомендується перерозподіляти обов'язки в бригаді.

Для попередження помилок і забезпечення більшої ефективності виконання спочатку збирають струмове коло, що відповідає послідовно з'єднаним елементам (джерела живлення, опори, амперметри, струмові обмотки ватметрів). Після збирання головного кола збирають усі паралельні кола. При цьому необхідно перевіряти відповідність підібраних для роботи елементів схеми та вимірювальних приладів електричним величинам, що діють в схемі після подачі на неї живлення.

Виконання кожної лабораторної роботи (після збирання схеми) починають із проведення попереднього досліду: проводять весь дослід без записування показів приладів, з'ясовуючи задачі досліду, точку його відліку й закінчення, межі інтервалів вимірюваних величин; перевіряють роботоздатність кола та відповідність усіх приладів і апаратів. Далі починають повторне проведення досліду, заносючи покази приладів до таблиць.

Числові ідентифікації приладів повинні бути якомога точнішими. Інакше похибки вимірювань супроводжуються помилками як при визначенні шуканих величин, так і в подальших розрахунках. Записувати покази приладів потрібно в тих одиницях, які позначені на шкалі приладів, наприклад, вольт (В) і т.п. У випадку використання приладів із різними межами зручніше записувати покази приладів в поділках шкали, а потім домножувати їх на ціну поділки.

Результати проведеного досліду потрібно обов'язково показати викладачеві, виконати за його порадами необхідні поправки й розрахунки. Тільки після дозволу викладача можна розбирати схему, після чого потрібно прибрати робоче місце.

## Електровимірювальні прилади

Електровимірювальні прилади використовують для вимірювання різних електричних, магнітних і неелектричних величин, тобто для експериментального визначення значень тих чи інших фізичних величин.

*Вимірювання* – процес знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Електровимірювальні прилади поділяються на *прилади безпосередньої оцінки* та *прилади порівняльні*. Перші дозволяють визначити числове значення вимірюваної величини за допомогою відлікової системи, а другі – порівнюють її з відповідною відомою величиною, яка береться як довідникова. Прилади безпосереднього оцінювання (прямого відліку) дозволяють виконати процес вимірювання простіше і швидше, ніж прилади порівняння, які мають більшу точність та чутливість.

За способом видачі інформації електровимірювальні прилади поділяють на аналогові (прилади з неперервним відліком) і цифрові (прилади з дискретним відліком), у яких покази видаються у цифровій формі.

Особливість будови вимірювальних механізмів – непостійність параметрів вимірювальних кіл, а також вплив зовнішніх факторів, які призводять до похибки при вимірюваннях різних величин.

*Похибка вимірювання* – відхилення результатів вимірювання від істинного значення величини, що вимірюється.

Похибки поділяють на абсолютну, відносну, приведену, основну і додаткову. Розглянемо перші три з них.

*Абсолютною похибкою* вимірювання  $\Delta X$  називають різницю між показом приладу  $X$  і істинним значенням  $X_{icm}$  величини, що вимірюється:

$$\Delta X = X - X_{icm}. \quad (2)$$



*Відносною похибкою* вимірювання  $\gamma\%$  називають відношення абсолютної похибки до істинного значення величини, що вимірюється:

$$\gamma\% = \frac{\Delta X}{X_{ист}} \cdot 100 = \frac{X - X_{ист}}{X_{ист}} \cdot 100. \quad (3)$$

В зв'язку з тим, що істинне значення величини, що вимірюється, мало відрізняється від показу приладу  $X$ , то відносна похибка

$$\gamma\% \approx \frac{\Delta X}{X} \cdot 100. \quad (4)$$

Точність вимірювання в основному оцінюється саме відносною похибкою.

Точність вимірювальних приладів оцінюється за допомогою *приведеної похибки*: відношення абсолютної похибки вимірювання до номінального значення  $X_{ном}$  вимірювального приладу, здебільшого вираженого у відсотках:

$$\gamma_{пр}\% = \frac{\Delta X}{X_{ном}} \cdot 100. \quad (5)$$

Для визначення найбільших похибок вимірювання користуються класом точності приладу.

Згідно з ГОСТ 8711-78 електровимірювальні прилади (наприклад, амперметри і вольтметри) за ступенем точності діляться на дев'ять класів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4 і 5. Цифра, яка визначає клас точності, визначає значення найбільшої допустимої основної приведеної похибки приладу  $\gamma_{пр}\%$ .

Чим менша вимірювана величина порівняно з номінальною величиною шкали, тим більша відносна похибка вимірювання цієї величини. З цієї причини рекомендується електровимірювальні прилади вибирати таким чином, щоб вимірювана величина була не менша однієї третини номінальної величини шкали приладу, тобто потрібно старатись за

можливості при вимірюваннях не користуватися початковою частиною шкали приладу. Під *робочою частиною шкали приладу* розуміють всю шкалу, якщо вона рівномірна, чи її частину (в проміжках 20 – 100% кінцевого значення), відмічену на шкалі точками у тому випадку, коли вона нерівномірна.

Прилади класів 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 називаються лабораторними, а прилади вищих класів – технічними.

За виконанням прилади залежно від умов експлуатації поділяють на групи:

- А – для роботи в закритих приміщеннях;
- Б – для закритих неопалювальних приміщень;
- В – для роботи в польових чи морських умовах;
- Т – для роботи в умовах сухого і вологого тропічного клімату.

За тривалістю механічних дій при експлуатації прилади поділяють на звичайні, звичайні з додатковою міцністю (ЗМ), тривалі до механічних дій – трясоміцні (ТМ), нестійкі до трясіння (ТН), віброміцні (ВМ), нестійкі до вібрації (ВН), удароміцні (УМ).

За ступенем захисту від зовнішніх магнітних і електричних полів прилади поділяють на категорії I та II, які обмежують значення похибок приладів.

Крім того, прилади поділяються за способом перетворення електричної енергії в механічну та конструкцією вимірювального механізму, за принципом дії і конструктивними особливостями перетворювачів вимірювальних кіл, за способом утворення протидіючого моменту, а також за конструкцією опор рухомої частини приладу, конструкцією відлікової частини, положенням нульового відліку на шкалі, характером самої шкали, розмірами і формою корпусу. Кожен вимірювальний прилад повинен відповідати роду струму, мати необхідні межі вимірювання, знаходитись у певному положенні відносно горизонтальної поверхні та встановлюватись в місті, де відсутні зовнішні чинники, які спотворюють результат вимірювання.

Прилади для вимірювання струму вмикають в електричне коло послідовно, а для вимірювання напруги – паралельно. Прилади, які вимірюють потужність, енергію, коефіцієнт потужності та інші електричні величини, вмикають за складнішими схемами, які додаються до приладів.

На шкалі кожного приладу наводиться: позначення одиниці вимірювальної величини і класу точності, номер стандарту, умовне позначення роду струму і числа фаз, системи приладу, групи його виконання за умовами експлуатації а також категорія його захисту від впливу зовнішніх магнітних і електричних полів. Крім цього вказують: робоче положення приладу, умовне позначення величини напруги, що досліджується, номінальну частоту чи область частот, товарний знак заводу-виробника, заводське позначення приладу, рік випуску, заводський номер приладу, а в окремих випадках – і ряд інших величин: номінальну напругу, номінальний струм, номінальну температуру тощо.

Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів відповідно до ГОСТ 23217-78 наведено в додатку Е.

### **Особливості моделювання в Electronics Workbench**

Основні відомості, необхідні для моделювання в Electronics Workbench, можна знайти в роботі [1], додаткові – в роботі [2]. Тому, щоб не повторюватися, наведемо лише деякі нюанси, необхідні для роботи в даному програмному середовищі.

Потрібно враховувати, що контрольно-вимірювальний прилад, має свій внутрішній опір. Наприклад, для вольтметра (рис. 1) за замовчуванням це 1 МОм, а для амперметра – 1 мОм. Для зменшення похибок вимірювань необхідно виставити для вольтметра внутрішній опір більшим, ніж пропонується програмою за замовчуванням, а для амперметра – відповідно меншим.

Крім того, для вимірювання даних на змінному струмі потрібно функцію mode приладів перемкнути з DC на AC (рис. 1).

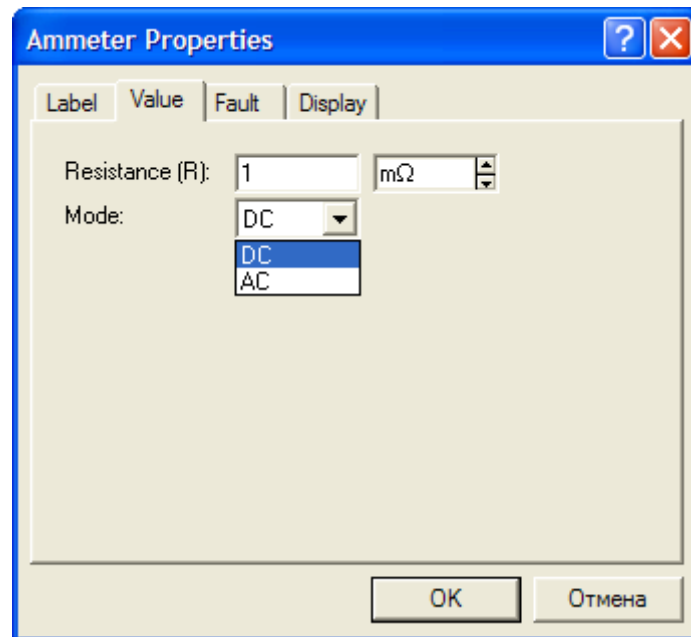


Рисунок 1 – Діалогове вікно встановлення параметрів вольтметра

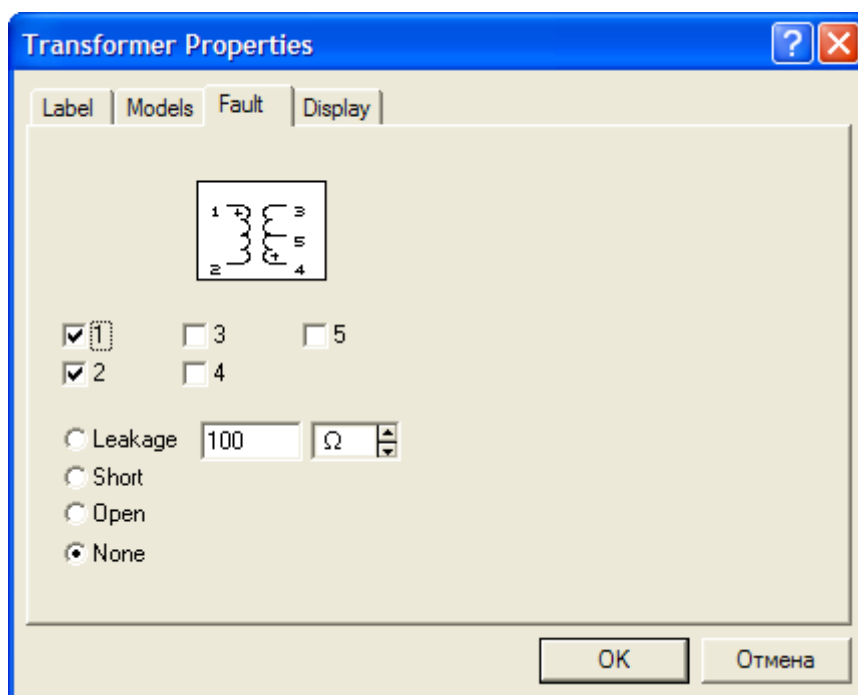


Рисунок 2 – Діалогове вікно встановлення параметрів точок з'єднань трансформатора

Для можливості імітації несправності практично кожен елемент має функцію Fault (рис. 2), за допомогою якої можна вибрати:

- опір витoku (Leakage);

- коротке замикання (Short);
- обрив (Open);
- відсутність несправності (None);
- необхідні точки з'єднання (1 – 5).

Опція None для таких елементів встановлюється за замовчуванням.

При моделюванні трифазних кіл для побудови мережі живлення потрібно поєднати одночасно три джерела напруг (рис. 3), в яких виставити відповідні початкові фази (Phase): для фази  $A$  –  $0^{\circ}$ , для фази  $B$  –  $240^{\circ}$ , для фази  $C$  –  $120^{\circ}$ . При цьому потрібно враховувати, що від'ємні значення початкових фаз вводити не дозволяється, а необхідне значення фазної чи лінійної напруги, яку потрібно задати, рекомендується перевіряти після встановлення у властивостях джерела напруги за допомогою вольтметрів.

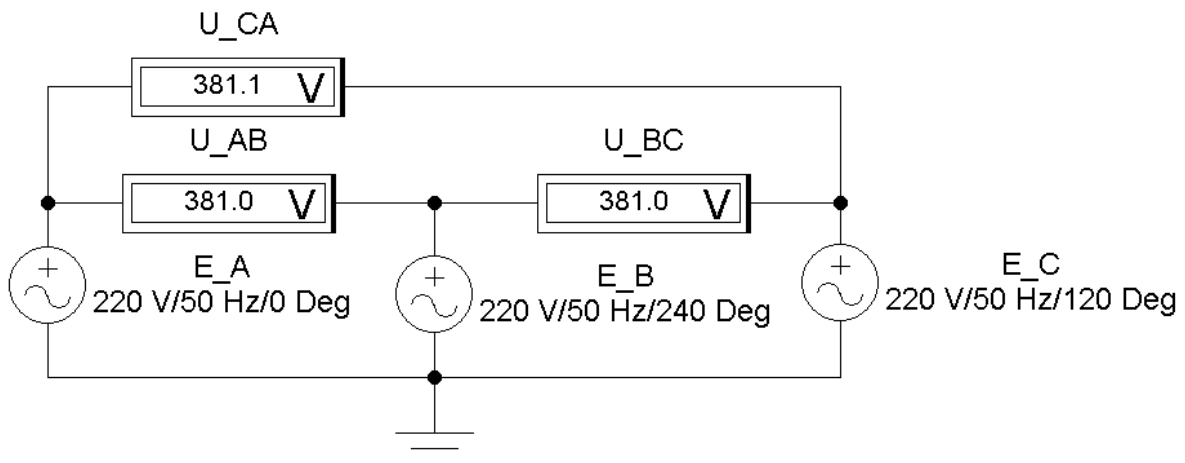


Рисунок 3 – До побудови трифазної мережі живлення

## Лабораторна робота №1 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО ЛІНІЙНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

📁 **Мета роботи** | Експериментально дослідити розподілення струмів, потенціалів в розгалуженому колі постійного струму та встановити основні закономірності протікання струмів і напруг у цьому колі.

### 1.1 Основні теоретичні положення

*Електричним колом* називають сукупність пристроїв, що утворюють шлях для протікання електричного струму, електромагнітні процеси в яких можна описати за допомогою таких понять, як електрорушійна сила (ЕРС), струм і напруга. Електричне коло складається з джерел електричного струму (напруги), споживачів (навантаження) та з'єднувальних пристроїв, що зв'язують джерело з навантаженням [3].

Основою для аналізу і розрахунків складних розгалужених кіл є закон Ома та два закони Кірхгофа.

*Закон Ома* в загальному випадку встановлює зв'язок між ЕРС  $E$  [В], електричним струмом  $I$  [А] й напругою  $U$  [В] на ділянці кола. Для пасивної ділянки кола (без ЕРС) закон Ома записується як [3-14]

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.1)$$

де  $R$  [Ом] – опір, а для всього кола –

$$I = \frac{E}{r_0 + R}, \quad (1.2)$$

де  $r_0$  – внутрішній опір джерела.

При аналізуванні складних кіл оперують такими поняттями: вітка, вузол, замкнений контур.

**Вітка** – це послідовне з’єднання елементів (ЕРС, резисторів чи інших споживачів), які підключені до двох вузлових точок. В електричних схемах кількість віток визначає кількість струмів, що в них протікають. Кількість віток позначається літерою „ $p$ ”.

**Вузол** – це точка в електричному колі, в якій сходиться три або більше віток. Кількість вузлів в електричному колі позначається літерою „ $q$ ”.

**Замкнений контур** в електричному колі – це замкнений шлях, який проходить по декількох вітках. Кількість замкнених контурів в електричних колах позначається літерою „ $n$ ”.

Між цими трьома величинами є справедливе співвідношення:

$$n = p - (q - 1). \quad (1.3)$$

**Перший закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума струмів, що сходяться в одному вузлі, рівна нулю, тобто

$$\sum I_k = 0. \quad (1.4)$$

При цьому у вітках струми, що направлені до вузла, беруться додатними, а струми, направлені від вузла, – від’ємними.

**Другий закон Кірхгофа:** в будь-якому замкненому контурі розгалуженого електричного кола постійного струму алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруг на окремих його ділянках:

$$\sum E_k = \sum R_k I_k. \quad (1.5)$$

Задача аналізу складного кола полягає у визначенні струмів віток при відомих опорах і ЕРС джерел. Закони Кірхгофа дають можливість скласти систему рівнянь, яка дозволяє визначити струми в вітках схеми. Так як кількість невідомих струмів дорівнює кількості віток, кількість рівнянь у системі повинна дорівнювати кількості віток схеми. Для того, щоб

рівняння системи були незалежними, кількість рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа, повинна дорівнювати числу вузлів мінус один.

Інші рівняння системи складають за другим законом Кірхгофа для незалежних контурів. При цьому *незалежними контурами* називають такі контури, які відрізняються один від одного хоча б однією новою віткою [3].

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа користуються взятими напрямками струмів і задаються напрямком обходу вибраних незалежних контурів. При цьому зі знаком „+” беруть ті ЕРС, напрямком яких збігається з напрямком обходу контуру, і ті спади напруг на опорах, напрямком струму в яких також збігається з напрямком обходу. В іншому випадку ЕРС і спади напруг на опорах беруть зі знаком „-”.

① *Приклад 1.1.* На рис. 1.1 показана схема, яка має п'ять віток і три вузли. Виберемо напрямки обходу кожного з них та складемо рівняння за першим і другим законами Кірхгофа:

- для вузла 1:  $I_1 + I_5 - I_4 = 0$ ;
- для вузла 2:  $I_2 - I_3 - I_5 = 0$ ;
- для контуру 1:  $r_{01}I_1 + R_4I_4 = E_1$ ;
- для контуру 2:  $R_3I_3 - R_4I_4 - R_5I_5 = 0$ ;
- для контуру 3:  $-r_{02}I_2 - R_3I_3 = -E_2$ .

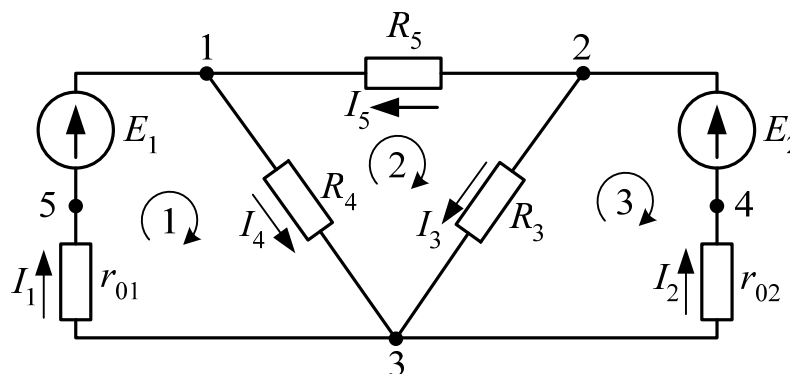


Рисунок 1.1 – Схема до прикладу 1.1



Якщо в результаті розв'язання цієї системи рівнянь якісь струми будуть зі знаком „-“, то це означає, що дійсний напрямок цього струму протилежний прийнятому на початку розв'язання задачі.

**Принцип накладання (суперпозиції)** полягає в тому, що струм будь-якої вітки складної лінійної електричної схеми можна подати у вигляді алгебраїчної суми часткових струмів, які створюються в ній кожним джерелом живлення окремо. На цьому принципі базується метод розрахунку лінійних схем, що називається **принципом накладання**. При розрахунку схем за цим методом знаходять часткові струми у вітках, які створюються кожним джерелом окремо, вважаючи інші ЕРС рівними нулю, а потім додають алгебраїчні суми часткових струмів віток. Для вибору знаків у часткових струмах проводять порівняння їх напрямків із прийнятими довільними напрямками струмів віток у вихідній схемі.

❶ **Приклад 1.2.** Проілюструємо це на схемі рис. 1.2. При розрахунках даної схеми спочатку вважають, що діє тільки ЕРС  $E_1$ , а  $E_2 = 0$  (при цьому внутрішній опір  $r_{02}$  залишається ввімкненим) і визначають часткові струми віток  $I'_1, I'_2, I'_3$  і т.д., дійсні напрямки яких можна визначити за напрямком ЕРС  $E_1$  (рис. 1.2, а).

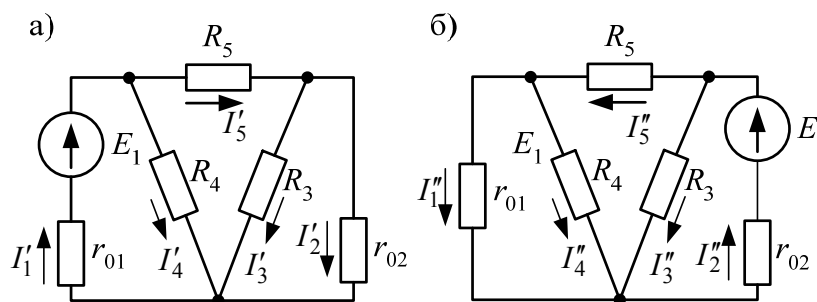


Рисунок 1.2 – До прикладу 1.2

Далі проводять аналогічний розрахунок, припускаючи, що  $E_1 = 0$ , а діє ЕРС  $E_2$ , і знаходять часткові струми  $I''_1, I''_2, I''_3$  і т.д. (рис. 1.2, б).

Алгебраїчне додавання часткових струмів дасть дійсні струми віток:

$$\begin{cases} I_1 = I_1' - I_1''; \\ I_2 = I_2' - I_2''; \\ I_3 = I_3' + I_3''. \end{cases}$$

Число складових у виразі для струмів вихідної схеми дорівнює числу джерел живлення.

*Потенціальні діаграми* призначені для наочного зображення зміни потенціалу вздовж замкнутих контурів електричних схем. По потенціальній діаграмі можна визначити напругу між будь-якими точками даного замкнутого контуру. Для побудови потенціальних діаграм використовується прямокутна система координат.

По осі абсцис відкладають в масштабі опір, послідовно, рухаючись за обраним напрямком обходу контуру, а по осі ординат – потенціали відповідних точок контуру. Будують потенціальні діаграми після визначення струмів в даній схемі. При цьому необхідно враховувати, що ЕРС направлені в сторону більшого потенціалу, а напруга і струми – в сторону меншого потенціалу. Потенціал однієї з точок контуру (вихідної) береться довільним, як правило рівним нулю.

❶ *Приклад 1.3.* Побудуємо потенціальну діаграму для контуру 1–2–4–3–5–1 схеми, яка зображена на рис. 1.1, враховуючи, що струми відомі й направлені так, як показано на схемі.

*Розв'язування.* За вихідну точку при побудові діаграми беремо точку „3” ( $\varphi_3 = 0$ ), а напрямок обходу контуру – напрямок, що збігається з напрямком руху годинникової стрілки.

Спочатку підраховуємо потенціал точок. Оскільки струм рухається від точки з більшим потенціалом до точки з меншим потенціалом, а ЕРС направлена від точки з меншим потенціалом до точки з більшим потенціалом, то потенціали для

- точки „5”:

$$\varphi_5 = \varphi_3 - r_{01}I_1;$$

- точки „1”:

$$\varphi_1 = \varphi_5 + E_1;$$

- точки „2”:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + R_5 I_5;$$

- точки „4”

$$\varphi_4 = \varphi_2 - E_2.$$

Якщо знайти  $\varphi_3 = \varphi_4 + r_{02}I_2$ , то при безпомилкових розрахунках маємо отримати нуль.

Після визначення потенціалів вибирають масштаби для опорів і потенціалів та будують потенціальну діаграму (рис. 1.3).

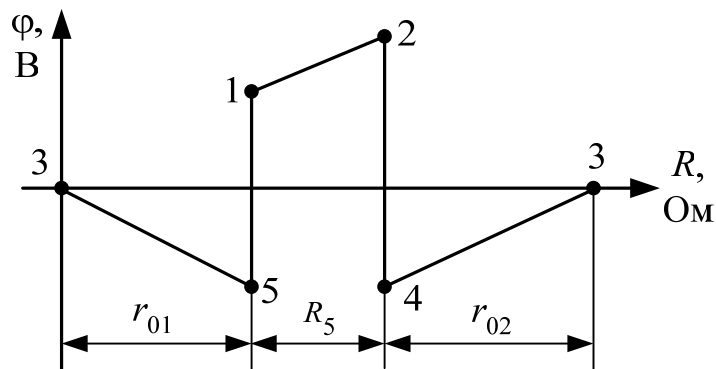


Рисунок 1.3 – Потенціальна діаграма

**Метод контурних струмів.** Зміст даного методу полягає в тому, що вводяться фіктивні контурні струми, які протікають в незалежних контурах.

Дійсні струми в вітках виражаються через невідомі контурні струми. Далі складаються рівняння за другим рівнянням Кірхгофа, в яких як невідомі виступають саме контурні струми.



записати систему рівнянь відповідно до (1.6):

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_2 + R_3) - I_{22}R_2 - I_{33}R_3 = E_1, \\ I_{22}(R_2 + R_4 + R_5) - I_{11}R_2 - I_{33}R_3 = E_2, \\ I_{33}(R_3 + R_5 + R_6) - I_{11}R_3 - I_{22}R_5 = -E_6. \end{cases}$$

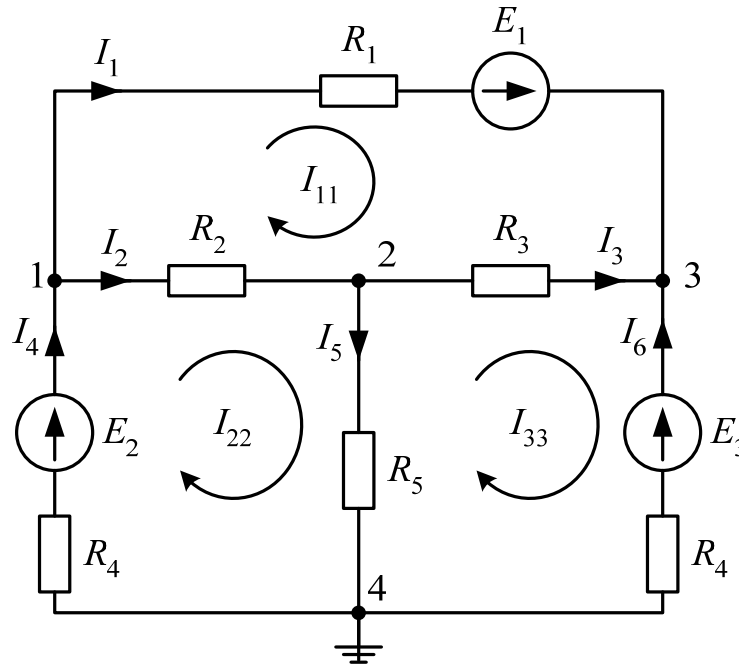


Рисунок 1.4 – Схема до прикладу 1.4

Розв'язавши дану систему відносно  $I_{11}$ ,  $I_{22}$ ,  $I_{33}$ , потрібно виразити реальні струми  $I_1 - I_6$  через контурні:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{11}; & I_2 &= I_{22} - I_{11}; & I_3 &= I_{33} - I_{11}; \\ I_4 &= I_{22}; & I_5 &= I_{22} - I_{33}; & I_6 &= -I_{33}. \end{aligned}$$

**Метод вузлових потенціалів.** Зміст даного методу полягає в тому, що як невідомі беруться потенціали вузлів. Дійсні струми виражаються через потенціали за законом Ома для ділянки кола і підставляються у рівняння, складені за першим законом Кірхгофа. В результаті отримується система  $(m-1)$  рівнянь з  $m-1$  невідомими, де  $m$  – кількість вузлів схеми.

В загальному вигляді даний метод можна описати такою системою:

$$\begin{cases} \varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} - \dots - \varphi_n G_{1n} = I_{11}, \\ -\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} - \dots - \varphi_n G_{2n} = I_{22}, \\ -\varphi_1 G_{31} - \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} - \dots - \varphi_n G_{3n} = I_{33}, \\ \dots \\ -\varphi_1 G_{n1} - \varphi_2 G_{n2} - \varphi_3 G_{n3} - \dots + \varphi_n G_{nn} = I_{nn}, \end{cases} \quad (1.7)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_n$  – невідомі потенціали вузлів;

$G_{11}, G_{22}, G_{33}, G_{nn}$  – власні провідності вузлів, що дорівнюють сумі провідностей всіх віток, які приєднуються до даного вузла;

$G_{12} = G_{21}, G_{13} = G_{31}, G_{nm} = G_{mn}$  – взаємні провідності між відповідними вузлами (сума всіх провідностей, що поєднують ці вузли);

$I_{11}, I_{22}, I_{33}, I_{nn}$  – вузлові струми, що дорівнюють алгебраїчній сумі добутку ЕРС, які підходять до відповідного вузла, на провідності відповідних віток плюс сума всіх джерел струму, що приєднуються до даного вузла.

**Провідність** – величина, обернена електричному опору:

$$G = \frac{1}{R} \text{ [См]}. \quad (1.8)$$

Джерела враховуються зі знаком „+” за умови, що вони направлені до вузла, а зі знаком „-” – в іншому випадку.

**і** **Приклад 1.5.** Розрахуємо попередню схему (рис. 1.3) методом вузлових потенціалів.

**Розв’язування.** Спочатку пронумеруємо кожен з вузлів (рис. 1.4), один з яких (наприклад, 4-й) занулимо, тобто  $\varphi_4 = 0$ . Далі складаємо

систему рівнянь відповідно до (1.7):

$$\begin{cases} \varphi_1 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \right) - \varphi_2 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_3} = \frac{E_4}{R_4} - \frac{E_1}{R_1}, \\ \varphi_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_5} \right) - \varphi_1 \frac{1}{R_2} - \varphi_3 \frac{1}{R_3} = 0, \\ \varphi_3 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_1 \frac{1}{R_2} - \varphi_2 \frac{1}{R_3} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_6}{R_6}. \end{cases}$$

Розв'язавши останню систему відносно  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ , потрібно виразити реальні струми  $I_1 - I_6$  через потенціали:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\varphi_1 - \varphi_3 + E_1}{R_1}; & I_2 &= \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2}; & I_3 &= \frac{\varphi_2 - \varphi_3}{R_3}; \\ I_4 &= \frac{-\varphi_1 + E_4}{R_4}; & I_5 &= \frac{\varphi_2}{R_5}; & I_6 &= \frac{-\varphi_3 + E_6}{R_6}. \end{aligned}$$

## 1.2 Програма роботи

1.2.1 Розрахувати еквівалентний опір електричної схеми, запропонованої викладачем для кожної бригади (розрахункові схеми №1 – №16 рис. 1.5. Індекс  $i$  опору  $R_i$  відповідає величині опору, вираженій в Ом(ах)).

1.2.2 Експериментальне дослідження законів Кірхгофа.

Зібрати схему, наведену на рис. 1.6. Схеми, наведені на рис. 1.7, збирає кожна бригада відповідно до завдання, виданого викладачем.

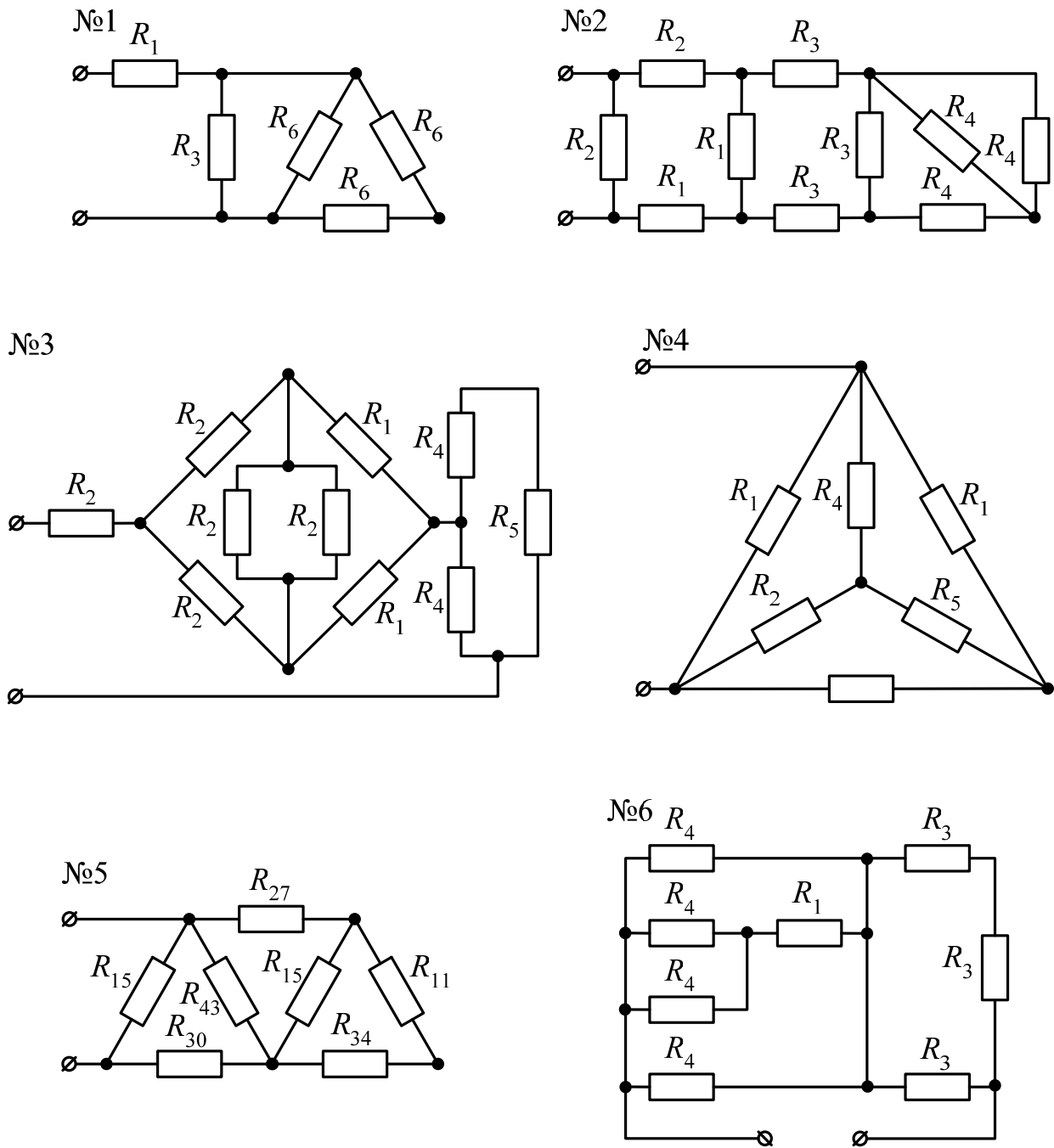
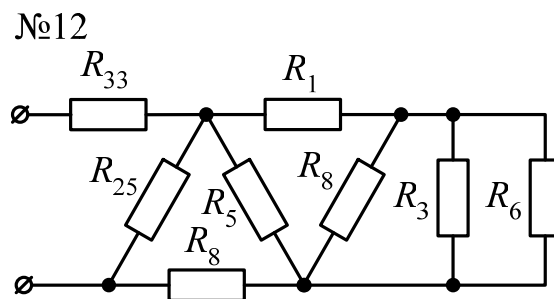
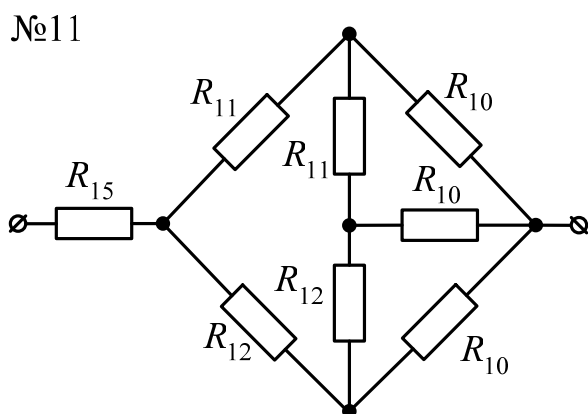
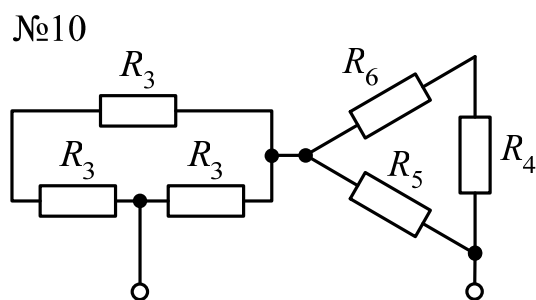
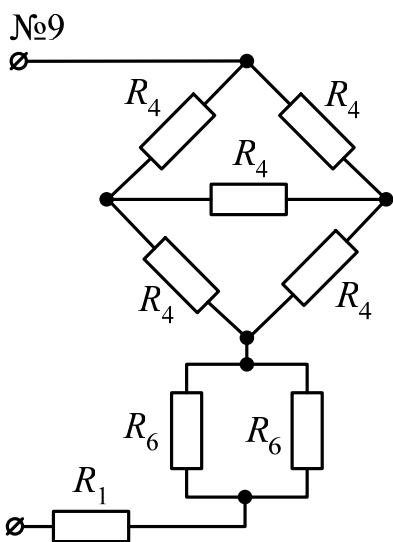
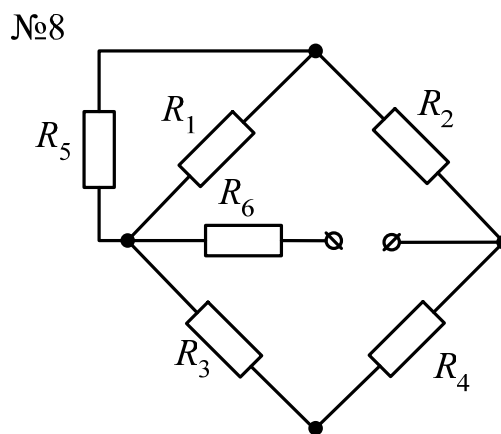
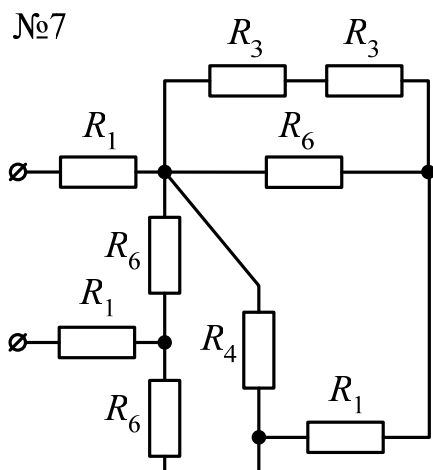


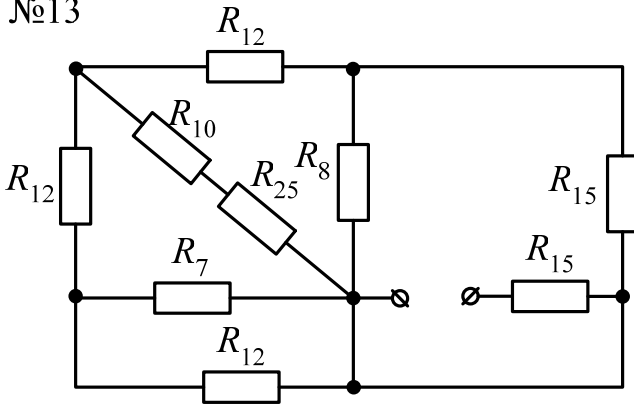
Рисунок 1.5 – Схеми для розрахунку еквівалентного опору



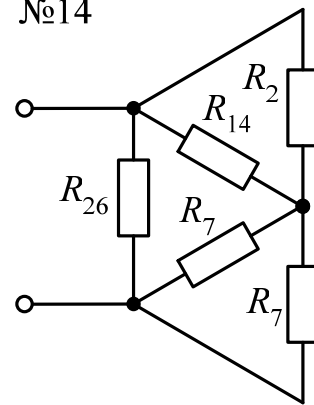


Продовження рис. 1.5

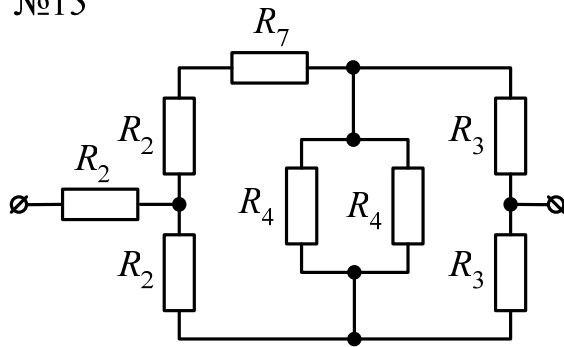
№13



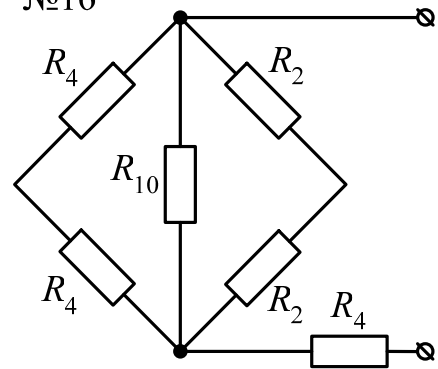
№14



№15



№16



Продовження рис. 1.5

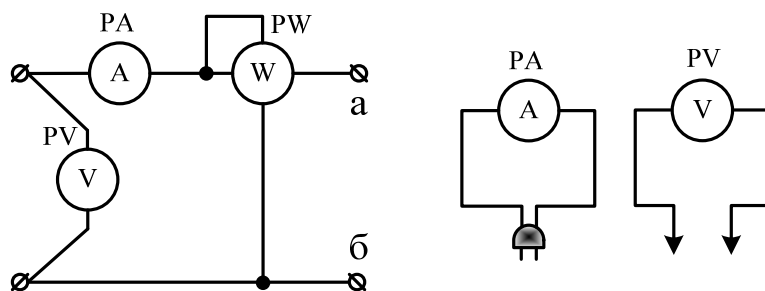


Рисунок 1.6 – Спільні схеми для дослідження

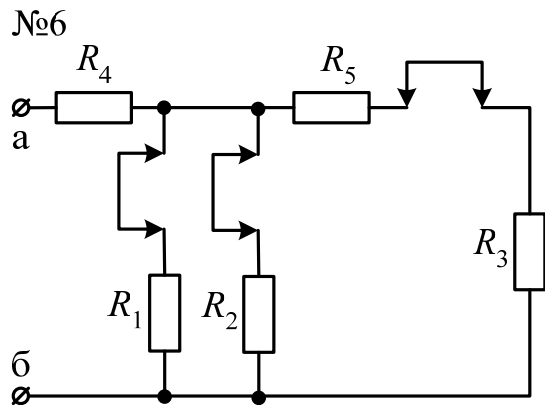
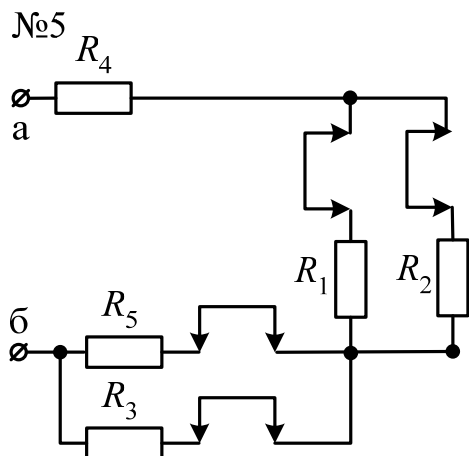
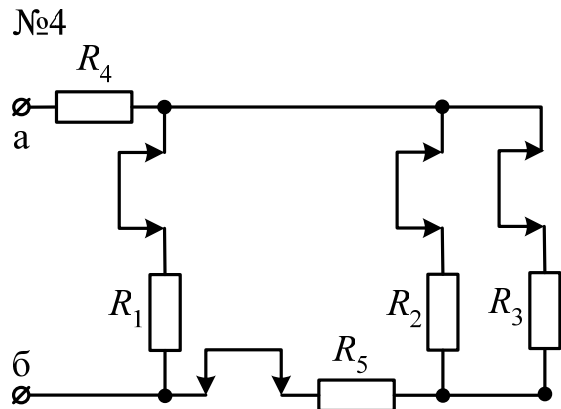
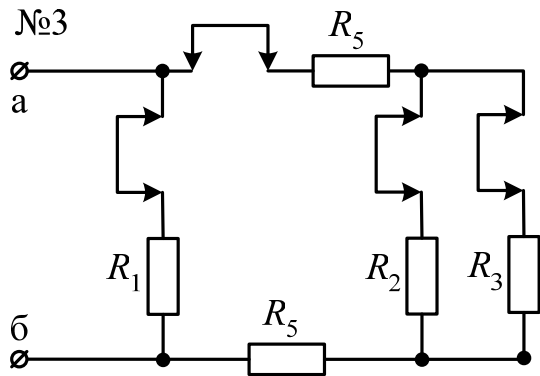
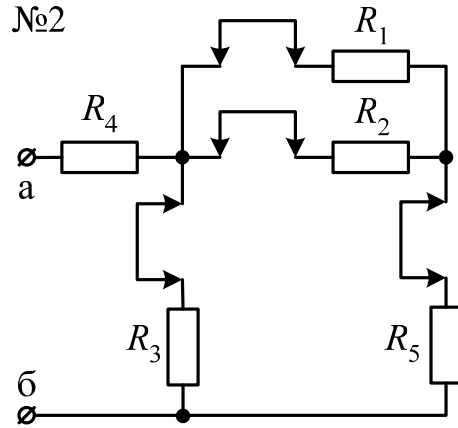
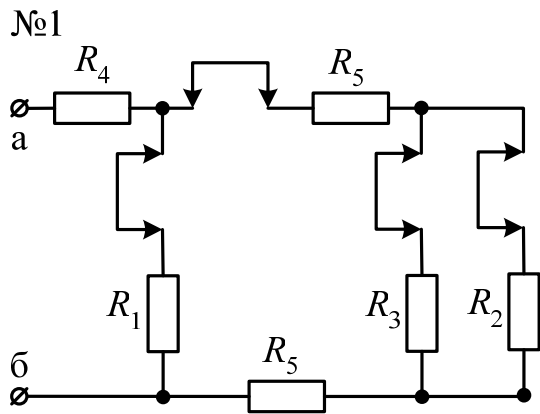
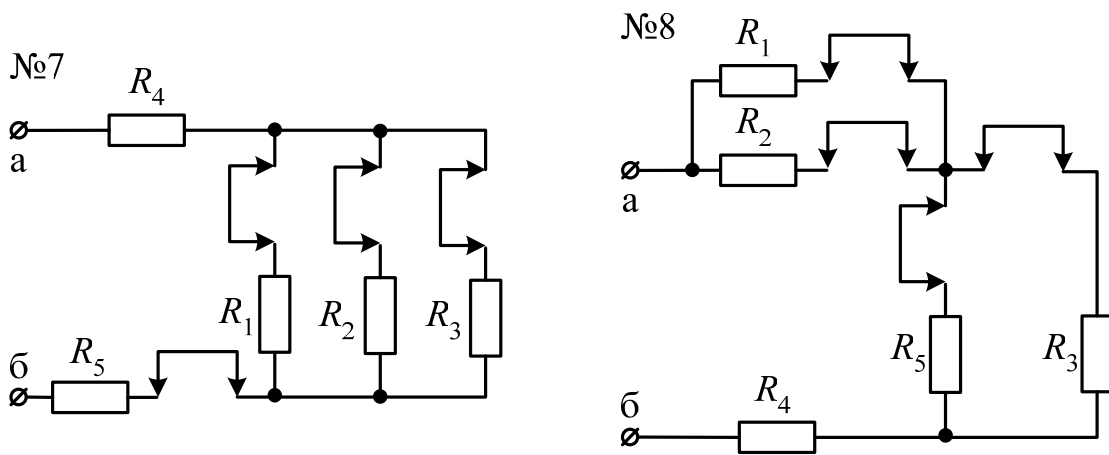


Рисунок 1.7 – Схеми, що задаються викладачем



Продовження рис. 1.7

1.2.3 Переносним вольтметром виміряти спад напруги на кожному опорі та на вході схеми; переносним амперметром заміряти струми у вітках; ватметром виміряти потужність всього електричного кола. Результати вимірювань занести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати вимірювань до п. 1.2.3

Вимірювані параметри													Похибка, %
$U,$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$U_3,$ В	$U_4,$ В	$U_5,$ В	$I,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$I_4,$ А	$I_5,$ А	$P,$ Вт	

Ціна поділки амперметра, вольтметра та ватметра, відповідно, визначається як

$$C_I = \frac{I_H}{n_I}; \quad C_U = \frac{U_H}{n_U}; \quad C_W = \frac{I_H \cdot U_H}{n_W} = \frac{P_H}{n_W}, \quad (1.9)$$

де  $I_H, U_H, P_H$  – межа вимірювання відповідно струму, напруги та потужності;

$n_I, n_U, n_W$  – кількість поділок відповідно амперметра, вольтметра, ватметра.

Результати визначення ціни поділок приладів звести до табл. 1.2

Таблиця 1.2 – Визначення ціни поділок приладів

Параметри								
$I_H,$	$n_I,$	$C_I,$	$U_H,$	$n_U,$	$C_U,$	$P_H,$	$n_W,$	$C_W,$
А	под.	А/под.	В	под.	В/под.	В	под.	Вт/под.

1.2.4 Правильність вимірювань струмів перевірити за першим законом Кірхгофа, а напруг – за другим законом Кірхгофа.

1.2.5 Розрахувати опори кола та заповнити табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати розрахунку опорів

Значення опорів					Примітки
$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$	$R_5, \text{ Ом}$	

1.2.6 Розрахувати еквівалентний опір електричного кола.

1.2.7 Підставивши в досліджувану схему визначені опори  $R_1 - R_5$  і виміряну напругу на затискачах кола, розрахувати струми, спад напруг та визначити похибку між експериментальними і розрахунковими даними.

1.2.8 Визначити потенціали точок для зовнішнього контуру. Заповнити табл. 1.4, побудувати потенціальну діаграму та визначити за її допомогою спад напруг.

Таблиця 1.4 – Результати вимірювань потенціалів

Значення потенціалів				Примітки
$\varphi_a,$	$\varphi_1,$	$\varphi_2,$	$\varphi_3,$	
В	В	В	В	

1.2.10 Скласти баланс потужностей:

$$P = \sum R_1 \cdot I_1^2 = U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}}^2. \quad (1.10)$$

1.2.11 За результатами дослідів зробити висновки.

### 1.3 Питання для самоконтролю



1. Дати визначення електричному колу й характеристиці основних пристроїв.
2. Дати означення основних величин електричного кола (ЕРС, напруга, струм).
3. Основні параметри електричного кола (опір, провідність, індуктивність, ємність, взаємна індуктивність).
4. Елементи електричного кола.
5. Основні закони електричних кіл.
6. Які електричні кола називаються лінійними?
7. Які є методи розрахунку лінійних електричних кіл?
8. Назвіть основні етапи розрахунку електричного кола постійного струму за рівняннями Кірхгофа.
9. Охарактеризуйте основні етапи й методи розрахунку контурних струмів.
10. В чому полягає суть розрахунку електричного кола за методом вузлових напруг.

### 1.4 Задачі для самостійного розв'язування

- 1.4.1 Визначити еквівалентний опір кола відносно затискачів „а–б” (рис. 1.8, а), якщо  $R = 4$  Ом.
- 1.4.2 Визначити еквівалентний опір кола відносно затискачів „а–б” (рис. 1.8, б) з параметрами:  $R_1 = R_2 = R_3 = 6$  Ом;  $R_4 = R_5 = 4$  Ом;  $R_0 = 0,5$  Ом.

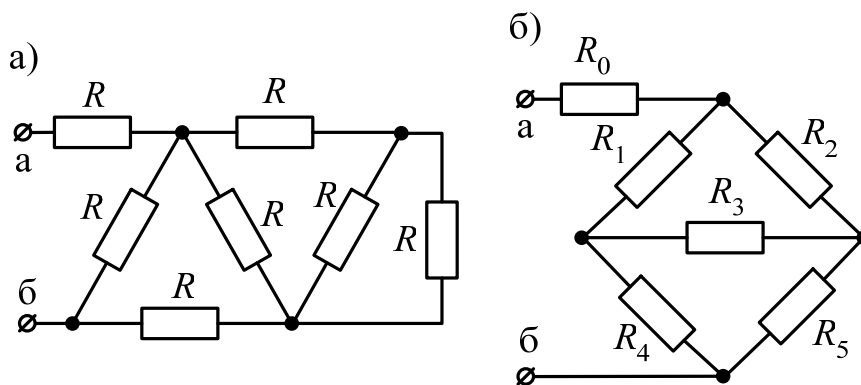


Рисунок 1.8 – Схеми для розрахунків до задач: а) – 1.4.1; б) – 1.4.2

- 1.4.3 Побудувати потенціальну діаграму для одноконтурного кола (рис. 1.9), якщо  $E_1 = 10$  В;  $E_2 = 50$  В;  $R_1 = 4$  Ом;  $R_2 = 3$  Ом;  $R_3 = 7$  Ом. Внутрішній опір джерел  $r_{01} = r_{02} = 1$  Ом.

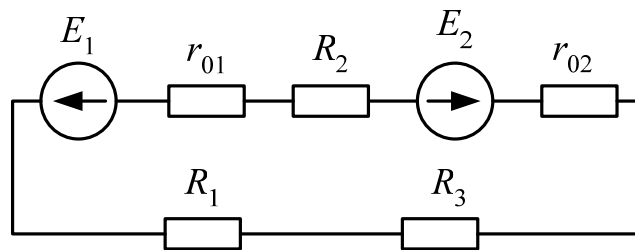


Рисунок 1.9 – Схема для розрахунку до задачі 1.4.3

- 1.4.4 Визначити еквівалентний опір кола відносно затискачів „а-б” (рис. 1.10, а) з такими параметрами опорів:  $R_1 = R_2 = R_3 = 2$  Ом;  $R_4 = R_5 = R_6 = 0$  Ом.
- 1.4.5 Для електричного кола, зображеного на рис. 1.10, б), визначити струм у вітках з використанням методу накладання (суперпозиції). Скласти і перевірити баланс потужностей.
- 1.4.6 Користуючись методом накладання визначити струми у вітках кола (рис. 1.11, а), якщо величини елементів кола мають такі значення:  $E_1 = 40$  В;  $E_2 = 60$  В;  $R_1 = R_4 = 2$  Ом;  $R_2 = R_5 = 4$  Ом;  $R_3 = 6$  Ом.
- 1.4.7 Визначити розподіл струмів в колі схеми (рис. 1.11, б), якщо відомо:  $R_1 = R_2 = 2$  Ом;  $R_3 = R_4 = 6$  Ом;  $R_5 = R_6 = 4$  Ом;  $R_7 = 5$  Ом; напруга мережі  $U_m = 120$  В.

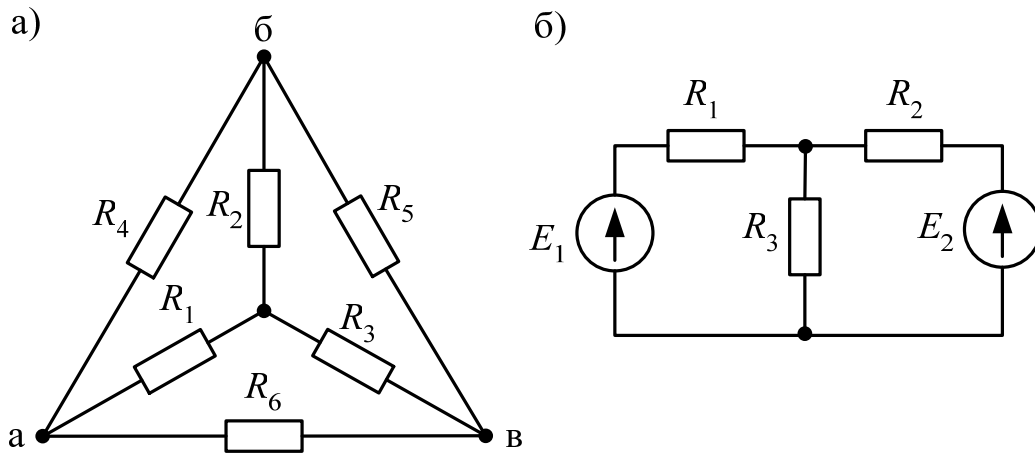


Рисунок 1.10 – Схеми для розрахунку до задач: а) – 1.4.4; б) – 1.4.5

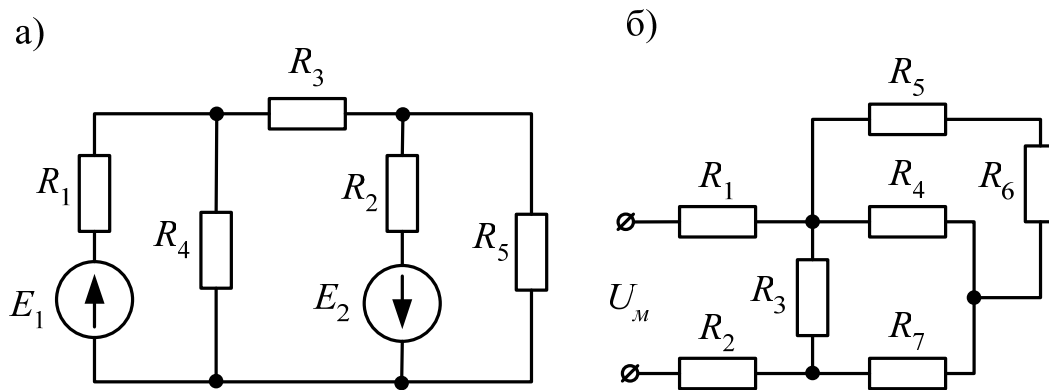


Рисунок 1.11 – Схеми для розрахунку до задач: а) – 1.4.6; б) – 1.4.7

1.4.8 В схемі неврівноваженого моста (рис. 1.12) визначити струми в усіх вітках, якщо відомо:  $r_0 = 0,5 \text{ Ом}$ ;  $R_1 = 1 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 1,5 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = R_5 = 4 \text{ Ом}$ ;  $E = 40 \text{ В}$ ,  $R_4 = 1,6 \text{ Ом}$ .

1.4.9 Для електричного кола, зображеного на рис. 1.13, а), користуючись методом контурних струмів визначити струми в вітках за умови, що елементи кола мають такі параметри:  $E_1 = 70 \text{ В}$ ;  $E_2 = 15 \text{ В}$ ;  $E_3 = 10 \text{ В}$ ;  $E_4 = 20 \text{ В}$ ;  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = R_4 = 10 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 8 \text{ Ом}$ ;  $R_5 = 3 \text{ Ом}$ .

1.4.10 Користуючись методом вузлової напруги визначити струми в вітках схеми, зображеної на рис. 1.13, б). Елементи кола мають такі параметри:  $E_1 = 20 \text{ В}$ ;  $E_2 = 25 \text{ В}$ ;  $E_3 = 40 \text{ В}$ ;  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 7 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 12 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 4 \text{ Ом}$ ;  $r_{01} = r_{02} = r_{03} = 0,5 \text{ Ом}$ .



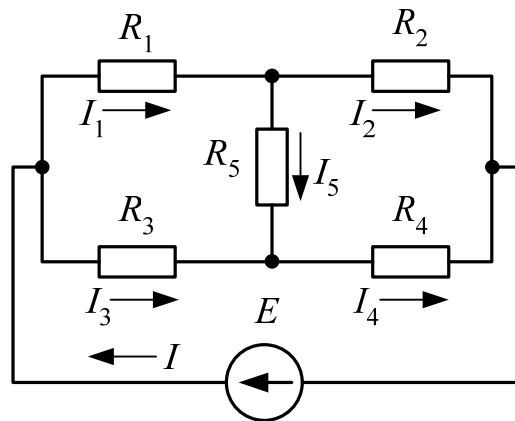


Рисунок 1.12 – Схема для розрахунку до задачі 1.4.8

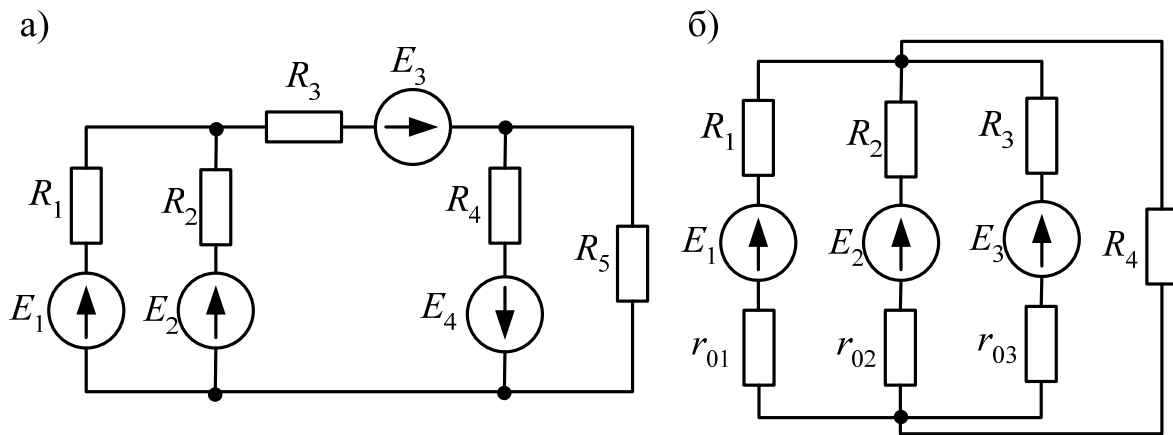


Рисунок 1.13 – Схеми для розрахунків до задач: а) – 1.4.9; б) – 1.4.10

### 1.5 Вправи для закріплення матеріалу

Для перевірки законів Ома та Кірхгофа пропонується дослідити електричні процеси в ППП Electronics Workbench. Самою простою схемою є послідовно-паралельне увімкнення резисторів (рис. 1.14), наприклад, з такими параметрами:  $U = 50$  В;  $R_1 = 2$  Ом;  $R_2 = 4$  Ом;  $R_3 = 6$  Ом.

Знайдемо струми у вітках та спади напруг на резисторах для даної схеми.

Еквівалентний опір ділянки кола з паралельним увімкненням  $R_1$  та  $R_2$ :

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4} = 1,333 \text{ (Ом)},$$

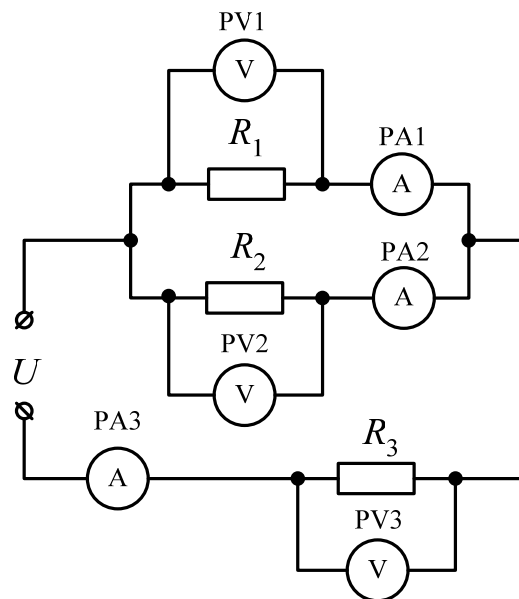


Рисунок 1.14 – Схема послідовно-паралельного з'єднання резисторів

а сумарний опір всієї схеми –

$$R_{\Sigma} = R_e + R_3 = 1,333 + 6 = 7,333 \text{ (Ом)}.$$

Тоді струм, що протікає через  $R_3$ , буде рівним

$$I_3 = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{50}{7,333} = 6,818 \text{ (А)},$$

а спад напруги на ньому –

$$U_3 = I_3 R_3 = 6,818 \cdot 6 = 40,91 \text{ (В)}.$$

За таких умов спад напруги на паралельно увімкнених  $R_1$  та  $R_2$ :

$$U_1 = U_2 = U - U_3 = 50 - 40,91 = 9,09 \text{ (В)},$$

а струми, що протікають через них –

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{9,09}{2} = 4,545 \text{ (A)};$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{9,09}{4} = 2,273 \text{ (A)}.$$

На рис. 1.15 наведено реалізацію схеми, що розглядається, в ППП Electronics Workbench після моделювання, тобто вже з розподілом струмів у вітках та напругу на кожному з резистивних елементів, що свідчить про правильність проведених вище розрахунків.

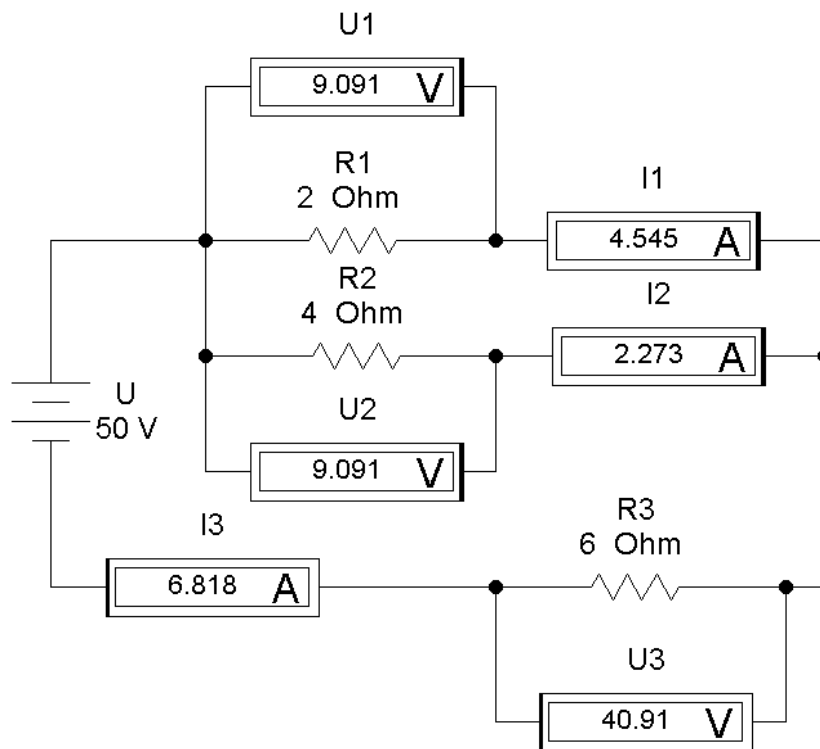


Рисунок 1.15 – Результат моделювання схеми рис. 1.13

Розв'язавши задачі 1.4.7 – 1.4.10 аналітичним методом, можна перевірити отримані результати за допомогою ППП Electronics Workbench, склавши відповідні схеми (рис. 1.16 – рис. 1.20).

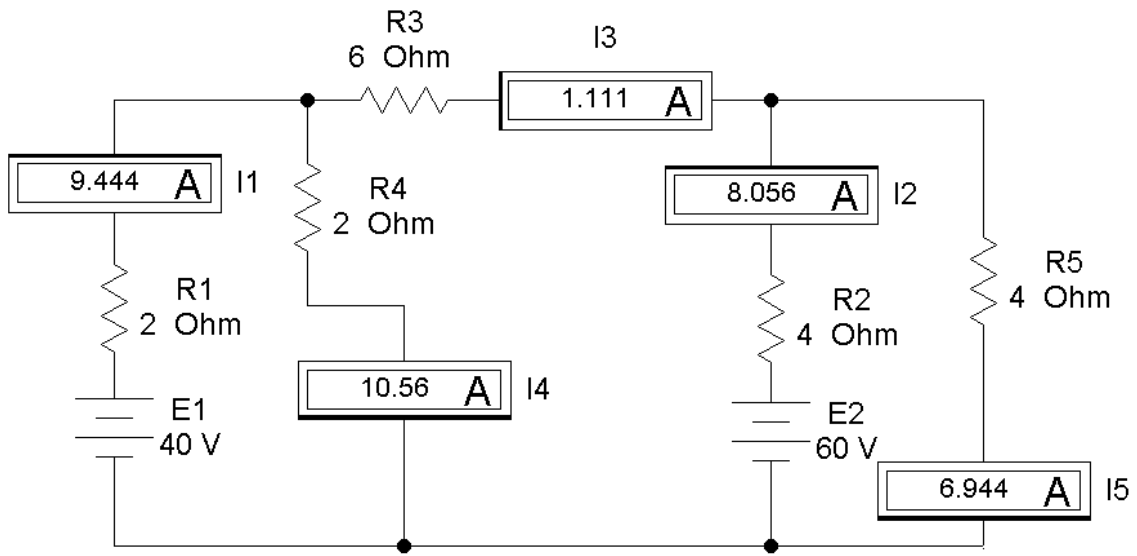


Рисунок 1.16 – Результат моделювання схеми рис. 1.11, а)

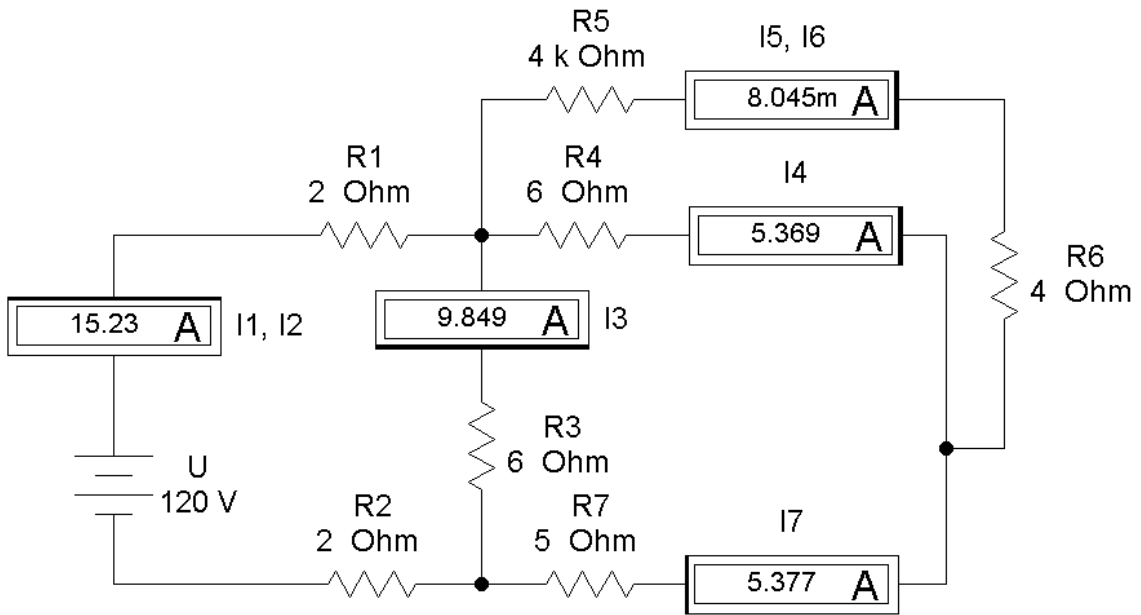


Рисунок 1.17 – Результат моделювання схеми рис. 1.11, б)

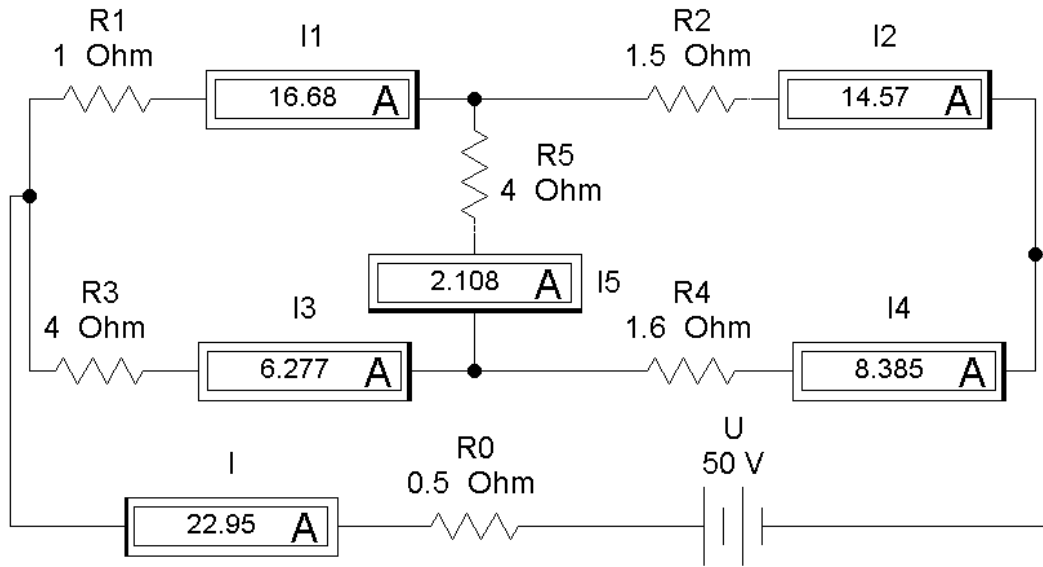


Рисунок 1.18 – Результат моделювання схеми рис. 1.12

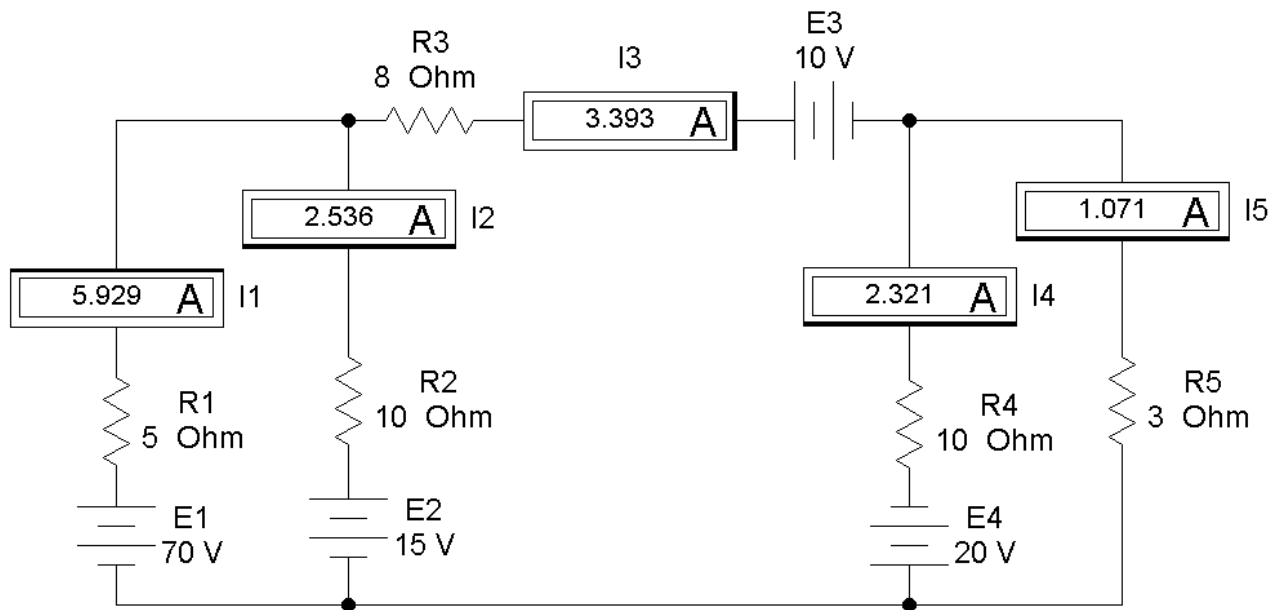


Рисунок 1.19 – Результат моделювання схеми рис. 1.13, а)

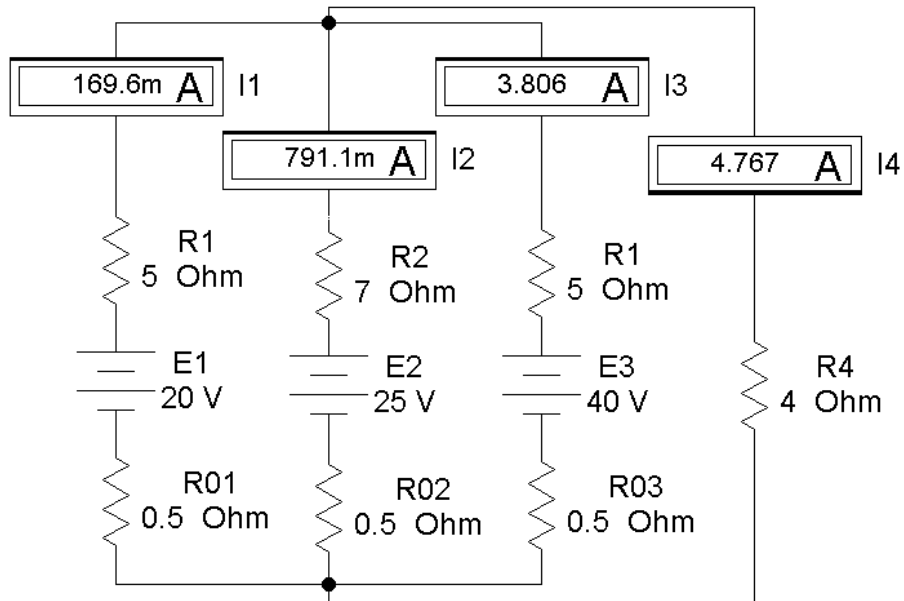


Рисунок 1.20 – Результат моделювання схеми рис. 1.13, б)

## Лабораторна робота №2

### ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

📁 **Мета роботи** Дослідити нелінійні елементи; електричне коло з нелінійними елементами при послідовному, паралельному та змішаному їх з'єднанні.

#### 2.1 Основні теоретичні положення

##### 2.1.1 Загальні відомості про нелінійні елементи та нелінійні кола

**Нелінійний елемент** (НЕ) – це елемент, в якому струм і напруга пов'язані між собою нелінійною залежністю. Електричне коло, яке містить в собі хоча б один нелінійний елемент, називається **нелінійним електричним колом** [3, 4].

Процеси в нелінійних колах, на відміну від лінійних, відрізняються складністю та багатогранністю.

Залежність між напругою й струмом на НЕ називається **вольт-амперною характеристикою** (ВАХ)  $U = f(I)$ .

Суттєвою особливістю нелінійних електричних кіл є неможливість застосувати до них метод накладання. Процеси в нелінійних електричних колах описуються нелійними алгебраїчними або диференціальними рівняннями.

За характером елементів розрізняють нелінійні опори (резистори), нелінійні індуктивності та нелінійні ємності. НЕ поділяють на **керовані** (транзистори, тиристори, мікросхеми) та **некеровані** (діод, електрична лампа розжарювання); **інерційні** (параметри яких не встигають змінитися за тривалість періоду) та **неінерційні**.

У НЕ ВАХ є не прямою, що характерно для лінійних елементів, а кривою різної форми. Розглянемо деякі з НЕ.

1. *Напівпровідниковий діод* (рис. 2.1, а) призначений для випрямлення змінного струму в постійний пульсуючий. ВАХ даного НЕ наведена на рис. 2.2, а).

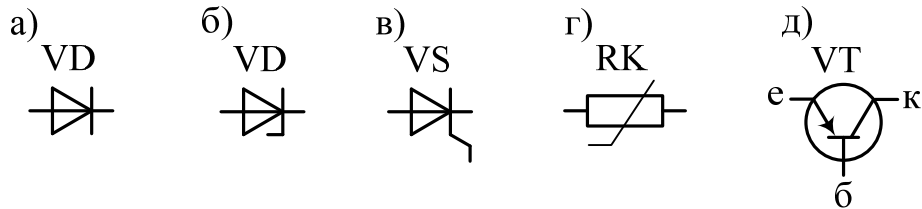


Рисунок 2.1 – Позначення та графічне зображення НЕ: а) – діод; б) – стабілітрон; в) – тиристор; г) – термістор; д) – транзистор

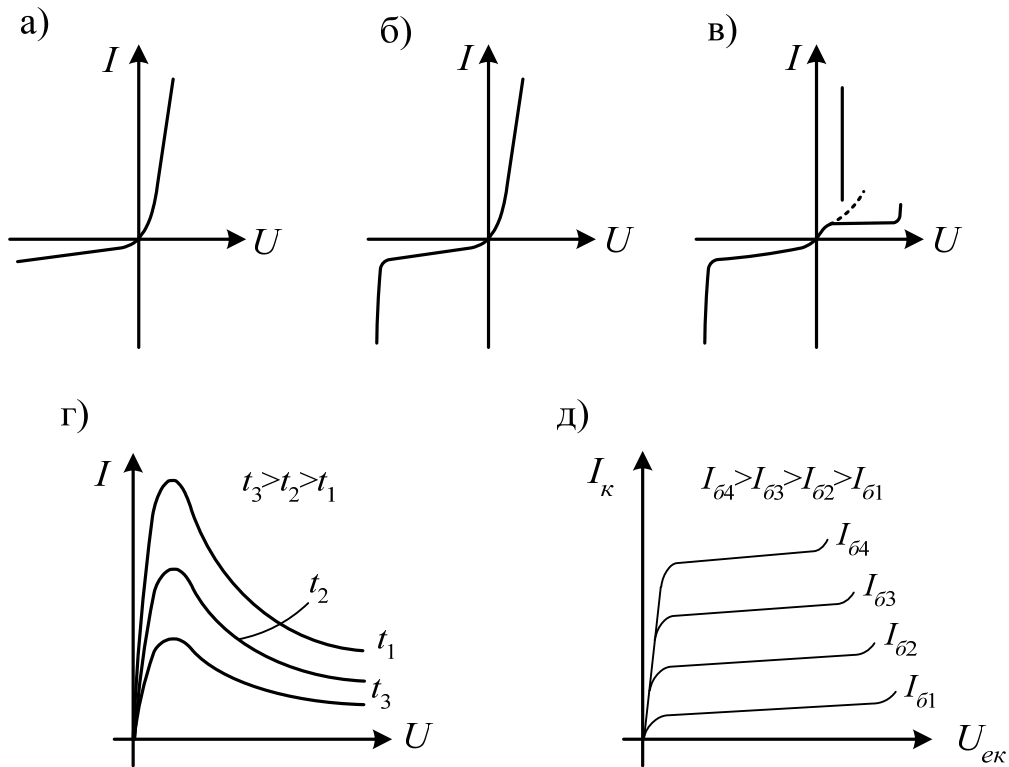


Рисунок 2.2 – ВАХ: а) – діода; б) – стабілітрона; в) – тиристора; г) – термістора; д) – транзистора

2. *Стабілітрон* – напівпровідниковий діод (рис. 2.1, б), який тривалий час може працювати на ділянці лавинного пробою *p-n*-переходу. В таких



НЕ напруга в деякому діапазоні зміни струму практично залишається без змін (рис. 2.3, б).

3. *Тиристор* – електроперетворювальний пристрій (рис. 2.1, в), який містить три і більше *p-n*-переходів та може тривалий час знаходитися в одному із станів (відкритому чи закритому). Його ВАХ наведена на рис. 2.2, в).

4. *Термістор* – резистор (рис. 2.1, г), опір якого залежить від температури навколишнього середовища. Його ВАХ наведена на рис. 2.2, г).

5. *Транзистор* – електроперетворювальний пристрій, який має два *p-n*-переходи і здатний підсилювати електричний сигнал. Крім того, він може працювати в режимі ключа. На рис. 2.1, д) показано біполярний транзистор, що має структуру *p-n-p*-переходу, а на рис. 2.2, д) – його ВАХ.

Характеристики нелінійних елементів визначаються експериментально й дають вичерпну інформацію про властивості елементів. Разом з тим при аналізуванні та проведенні розрахунків нелінійних кіл оперують поняттями параметрів нелінійних елементів, наприклад, поняттями статичного й динамічного опорів.

*Статичним опором НЕ*  $R_{cm}$  в заданій точці  $A$  його характеристики називають відношення напруги на елементі до його струму. Його можна визначити графічно як тангенс кута між прямою, проведеною з початку координат через дану точку  $A$  ВАХ (рис. 2.3), і віссю абсцис:

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.1)$$

де  $m_U$  і  $m_I$  – відповідно масштаби напруги і струму.

*Динамічним опором НЕ*  $R_{дин}$  в заданій точці  $A$  його характеристики називають відношення нескінченно малого приросту напруги до відповідного приросту струму. Його можна визначити графічно як тангенс кута між дотичною в даній точці  $A$  ВАХ (рис. 2.3) і віссю абсцис:

$$R_{\text{дин}} = \frac{dU}{dI} = \frac{m_U}{m_I} \operatorname{tg}\beta. \quad (2.2)$$

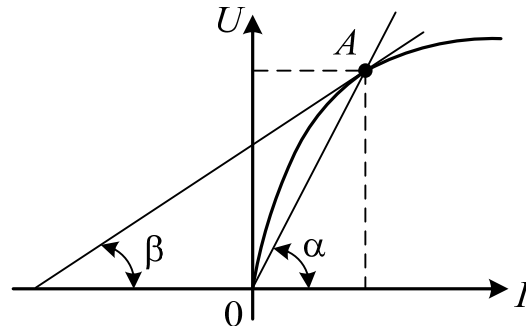


Рисунок 2.3 – Визначення статичного й динамічного опорів НЕ

Очевидно, що статичний і динамічний опори НЕ є функціями струму і напруги.

Оскільки аналітичні розрахунки простих нелінійних кіл трудомісткі, тому здебільшого використовують наближені методи розрахунку, в основу яких також закладені закони Ома й Кірхгофа.

### 2.1.2 Графічний метод розрахунку нелінійних кіл

В цьому методі струми та напруги в нелінійному колі визначаються за ВАХ елементів, що включені в дане коло. Ці характеристики одержують експериментально або із довідника для стандартних НЕ.

Розглянемо особливості розрахунків нелінійних електричних кіл при різних способах з'єднання НЕ.

1. *Послідовне з'єднання НЕ.* На ділянці кола з двома послідовно з'єднаними НЕ (рис. 2.4, а) відповідно до другого закону Кірхгофа прикладена напруга  $U$  визначається як

$$U = U_1 + U_2, \quad (2.3)$$

де  $U_1$  – напруга на елементі НЕ1;

$U_2$  – напруга на елементі НЕ2.

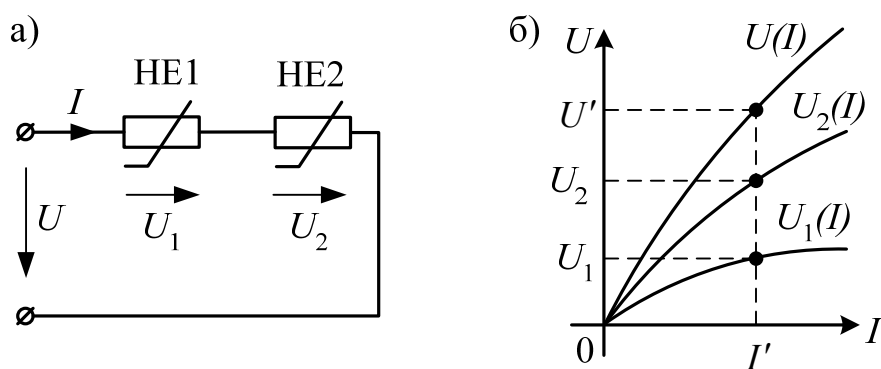


Рисунок 2.4 – Схема (а) і ВАХ (б) ділянки кола з послідовним з'єднанням двох НЕ

Тому для побудови ВАХ  $U = f(I)$  ділянки додають напругу на елементах при заданому спільному струмі в колі  $I'$  (рис. 2.4, б).

**2. Паралельне з'єднання НЕ.** При даному з'єднанні НЕ знаходяться від однією напругою  $U$ , а струм  $I$  в нерозгалуженій ділянці кола за першим законом Кірхгофа дорівнює сумі струмів у вітках, тобто для схеми рис. 2.5, а):

$$I = I_1 + I_2, \quad (2.4)$$

де  $I_1$  – струм, що протікає через НЕ1;

$I_2$  – струм, що протікає через НЕ2.

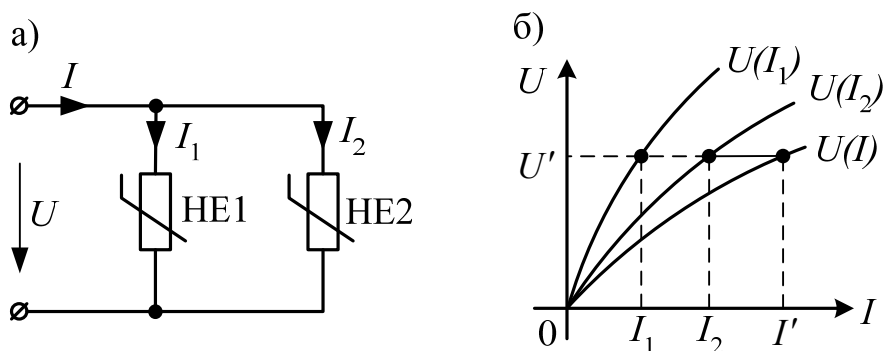


Рисунок 2.5 – Схема (а) і ВАХ (б) ділянки кола з паралельним з'єднанням двох НЕ

Точки ВАХ ділянки кола  $U = f(I)$  знаходяться додаванням абсцис залежностей  $U(I_1)$  і  $U(I_2)$  (рис. 2.5, б).

3. **Змішане з'єднання НЕ.** Таке з'єднання потрібно звести до послідовного з'єднання, для чого паралельно увімкнені елементи замінюються одним еквівалентним (його ВАХ будується так само, як і при паралельному з'єднанні НЕ), що вмикається послідовно з іншими (при цьому потрібно скласти ВАХ, як це було показано для послідовного з'єднання НЕ).

4. **Послідовне з'єднання НЕ з лінійним елементом.** В цьому випадку (рис. 2.6) робочу точку  $C$  визначають за другим законом Кірхгофа:

$$U_2 = U_m - R_1 I_1. \quad (2.5)$$

Це рівняння в координатах напруги  $U$  і струму  $I$  є прямою  $AB$  (рис. 2.6, б): якщо  $I = 0$ , то  $U_2 = U_m$  (точка  $A$ ); якщо  $U_2 = 0$ , то  $I = U_m / R_1$  (точка  $B$ ). Робоча точка  $C$  знаходиться на перетині ВАХ НЕ та прямої  $AB$ , що визначає рівняння кола.

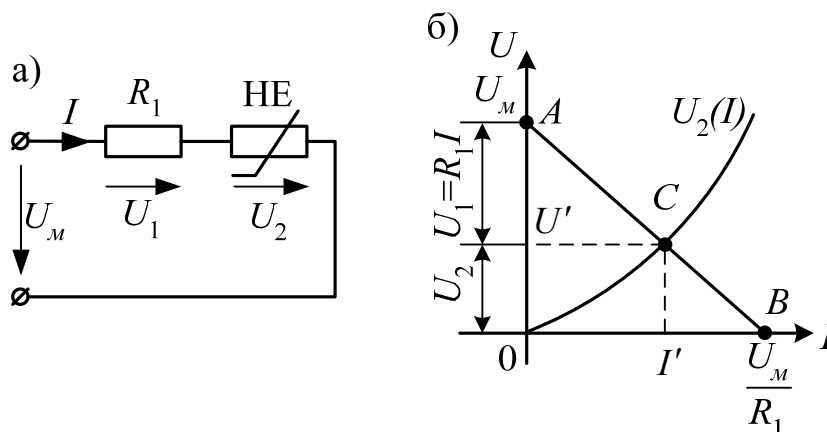


Рисунок 2.6 – До розрахунку кола, що містить послідовно з'єднані НЕ та лінійний резистор

Цю задачу можна розв'язати ще й в такий спосіб: спочатку побудувати ВАХ лінійного елемента  $R_1$  ( $U_1 = R_1 I$  – пряму лінію, яка проходить через

початок координат), а потім задачу розв'язувати як і в попередніх задачах при послідовному з'єднанні елементів.

### 2.1.3 Графоаналітичний метод розрахунку нелінійних кіл

ВАХ НЕ іноді вдається апроксимувати аналітичними виразами. Це дає змогу електричний стан нелінійного кола описати математичними рівняннями, розв'язання яких дає числові значення струмів та напруг в нелінійному колі.

Один із графоаналітичних методів розрахунку нелінійних кіл полягає в тому, що ВАХ НЕ розділяють на декілька ділянок і кожну таку ділянку зображують вже прямою лінією. Для кожної із цих ділянок коло розраховують вже як лінійне, що має опір нелінійного елемента  $R = R_0 = dU/dI$  на цій ділянці. Потім розрахунки окремих ділянок аналітично стикують. Цей метод інколи називають *кусково-лінійною апроксимацією* ВАХ НЕ.

Обидва методи вимагають громіздкого числового розрахунку.

## 2.2 Програма роботи

2.2.1 Ознайомитися з елементною базою й електричними вимірювальними приладами, що використовуються при проведенні досліду.

2.2.2 Скласти електричну схему для зняття ВАХ паралельно увімкнених лінійного резистора та двох НЕ (рис. 2.7). Результати досліду занести до табл. 2.1.

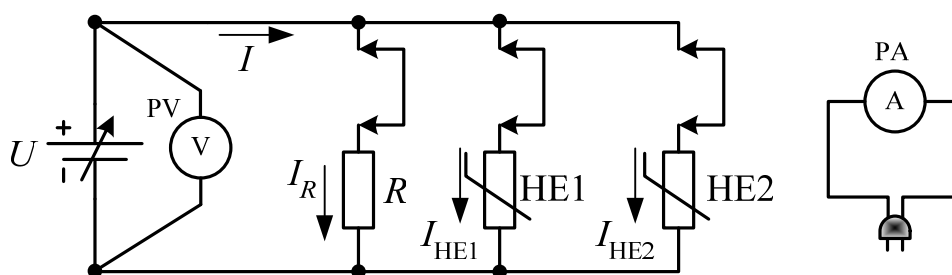


Рисунок 2.7 – Схема для зняття ВАХ резистора та двох НЕ

Таблиця 2.1 – Експериментальні дані до досліду п. 2.2.2

№ досл.	Параметри										
	на вході		на $R$		на НЕ1			на НЕ2			
	$U$ , В	$I$ , А	$U_R$ , В	$I_R$ , А	$R$ , Ом	$U_{НЕ1}$ , В	$I_{НЕ1}$ , А	$R_{НЕ1}$ , Ом	$U_{НЕ2}$ , В	$I_{НЕ2}$ , А	$R_{НЕ2}$ , Ом

2.2.3 Зібрати електричну схему для дослідження електричного кола з послідовно увімкненими лінійним резистором та двома НЕ (рис. 2.8). Результати досліду занести до табл. 2.2.

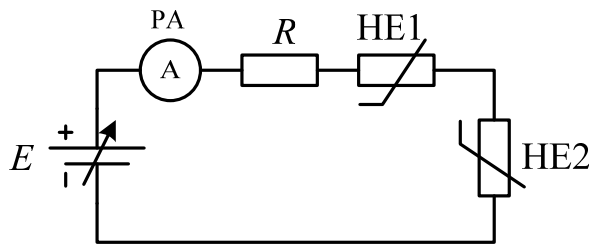


Рисунок 2.8 – Схема для зняття ВАХ послідовно увімкнених лінійного резистора та двох НЕ

Таблиця 2.2 – Експериментальні дані до досліду п. 2.2.3

Параметри	№ досліду						Похибка, %
	1	2	3	4	5	6	
$U$ , В							
$I$ , А							
$U_R$ , А							
$U_{НЕ1}$ , В							
$U_{НЕ2}$ , В							

2.2.4 Зібрати схему зі змішаним з'єднанням лінійного резистора та двох НЕ (рис. 2.9). Результати досліду занести до табл. 2.3. В даному

експерименті досліджується схема однокаскадного параметричного стабілізатора напруги.

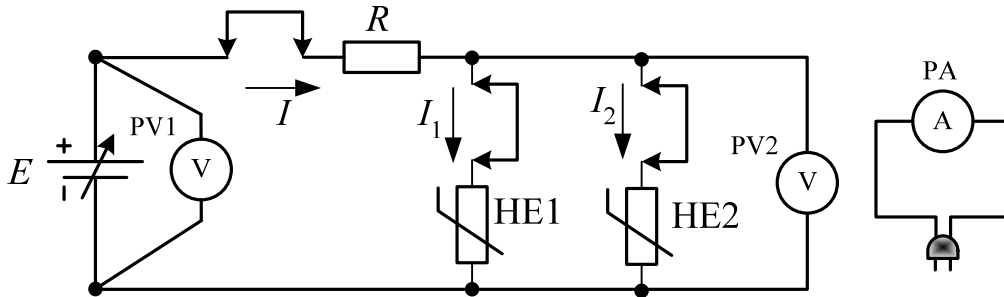


Рисунок 2.9 – Схема для зняття ВАХ послідовно-паралельно увімкнених лінійного резистора та двох НЕ

Таблиця 2.3 – Експериментальні дані до досліду п. 2.2.4

№ досл.	Параметри						Похибка, %
	$U,$ В	$U_R,$ В	$U_{HE1}=U_{HE2},$ В	$I,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А	

2.2.5 За результатами дослідів необхідно:

- побудувати в масштабі ВАХ всіх елементів;
- побудувати сумарну ВАХ при послідовному з'єднанні елементів та визначити похибку за графічним методом розрахунку й експериментальними даними;
- побудувати характеристику параметричного стабілізатора й визначити похибку за графічним методом розрахунку й експериментальними даними.

2.2.6 За результатами дослідів зробити висновки.

### 2.3 Питання для самоконтролю

- Нелінійні елементи електричних кіл. Основні характеристики НЕ.

2. Що називається статичним опором НЕ і як він визначається?
3. Що називається диференційним опором нелінійного елемента і як він визначається?
4. Чим відрізняються некеровані лінійні елементи від керованих?
5. Нелінійні кола постійного струму. Навести приклади застосування НЕ в електричних колах.
6. Показати на прикладі графічний метод розрахунку нелінійного електричного кола з послідовним з'єднанням елементів.
7. Показати на прикладі графічний метод розрахунку нелінійного електричного кола з паралельним з'єднанням елементів.
8. Показати на прикладі графічний метод розрахунку нелінійного електричного кола зі змішаним з'єднанням елементів.
9. На зображених ВАХ НЕ (рис. 2.10) вказати відрізки, на яких динамічний опір елемента: а) рівний нулю; б) більший нуля; в) від'ємний.

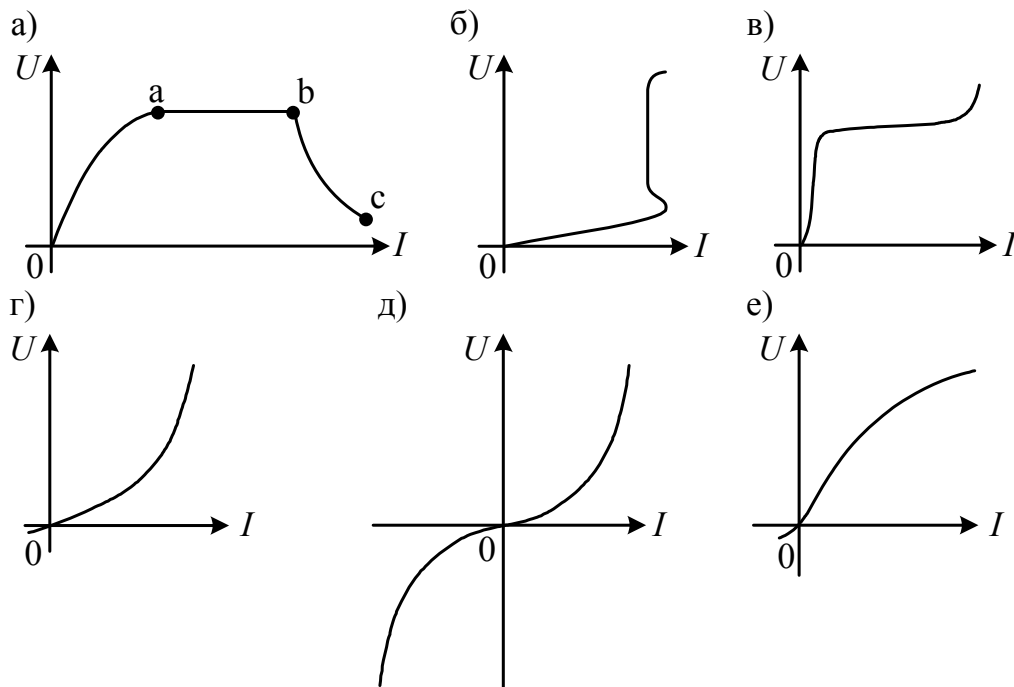


Рисунок 2.10 – ВАХ НЕ

10. Яка із зображених ВАХ (рис. 2.10) є симетричною?



11. Серед зображених нелінійних ВАХ (рис. 2.10) вказати характеристику елемента, який може бути використаний для а) стабілізації напруги; б) стабілізації струму.

## 2.4 Задачі для самостійного розв'язування

2.4.1 ВАХ послідовного з'єднання опору  $R = 100$  Ом та НЕ показана на рис. 2.11, а). Який струм пройдётиме через елементи, якщо напруги на їхніх затискачах однакові?

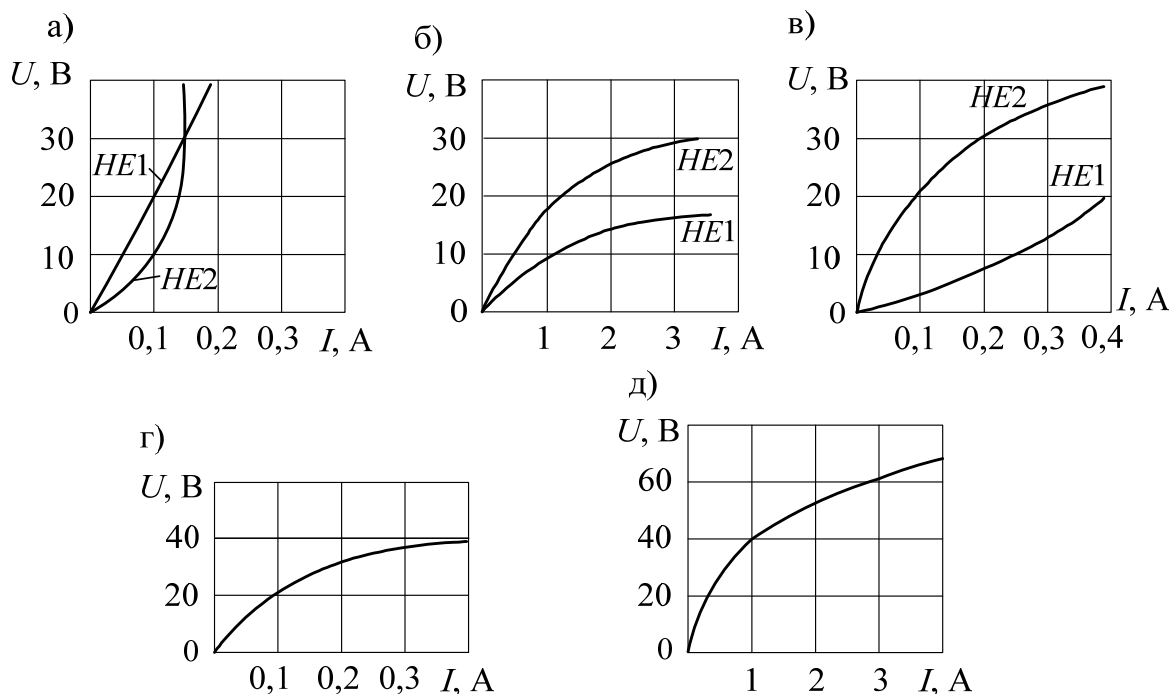


Рисунок 2.11 – ВАХ НЕ

2.4.2 В електричному колі з послідовним з'єднанням нелінійних елементів HE1 і HE2, ВАХ яких наведені на рис. 2.11, б), визначити: напругу на нелінійних елементах; напругу на затискачах кола при струмі в колі  $I = 1,5$  А.

2.4.3 На основі зображених на рис. 2.11, в) ВАХ двох послідовно з'єднаних НЕ визначити графічно струм, при якому напруга  $U_2 = 2U_1$ .

2.4.4 НЕ, ВАХ якого показано на рис. 2.11, г), та лінійний резистор, опір якого  $R = 100$  Ом, з'єднані паралельно. Знайти напругу  $U$ , при якій струми в елементах будуть однакові.

2.4.5 НЕ, ВАХ якого показано на рис. 2.11, д), та лінійний резистор, опір якого  $R = 50$  Ом, з'єднані паралельно. При якій напрузі  $U$  струми в паралельних вітках будуть однакові?

2.4.6 Три однакові НЕ, ВАХ яких зображена на рис. 2.12, а), з'єднані так, як показано на схемі рис. 2.12, б). При якій напрузі  $U$  струм  $I = 0,3$  А?

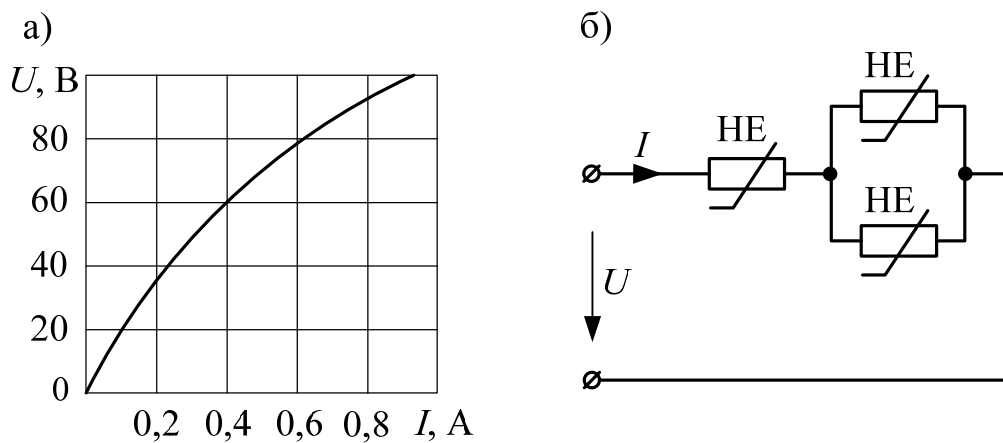


Рисунок 2.12 – ВАХ НЕ (а) та схема їх з'єднання (б)

## 2.5 Вправи для закріплення матеріалу

Для дослідження нелінійних елементів пропонується на самостійне опрацювання ряд схем, за допомогою яких можна визначити характеристики діодів, тиристорів та транзисторів.

Дослідження прямої вітки ВАХ діода можна здійснити за схемою рис. 2.13, яка складається із функціонального генератора, амперметра РА, досліджуваного діода VD, вольтметра PV та осцилографа.

Для дослідження зворотної вітки ВАХ діода рекомендується використати схему рис. 2.14, в якій додатково використовується захисний резистор для обмеження струму через діод у випадку його пробою.

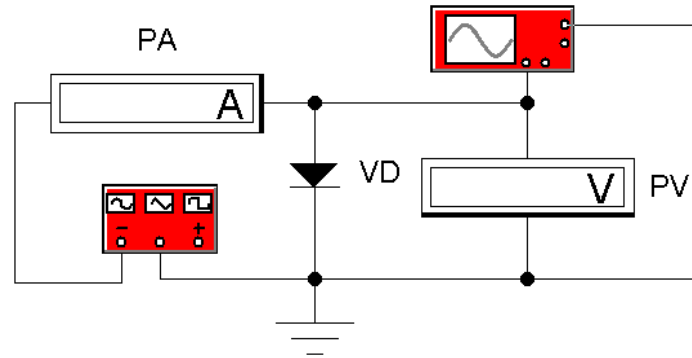


Рисунок 2.13 – Схема для дослідження прямої вітки ВАХ діода

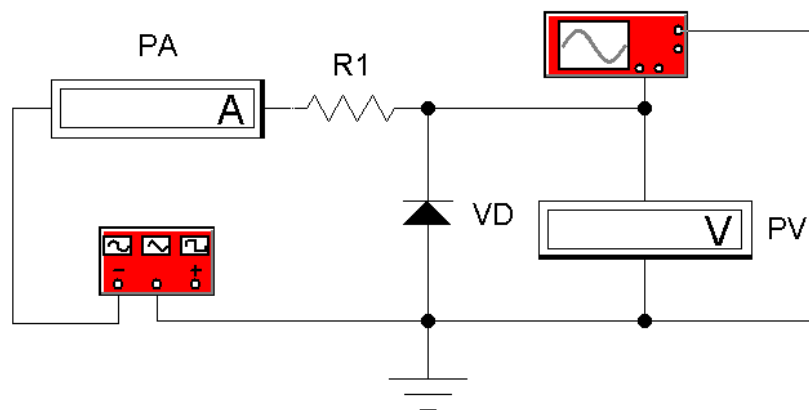


Рисунок 2.14 – Схема для дослідження зворотної вітки ВАХ діода

Для дослідження тиристора VS пропонується схема (рис. 2.15), яка складається з джерела живлення напругою  $U$ , джерела живлення з напругою управління  $U_y$ , потенціометра  $RP$ , захисних опорів  $R_{zt\_yx}$  та  $R_{zt\_y}$ , контрольно-вимірювальних приладів. Змінюючи вхідну напругу тиристора за допомогою потенціометра  $RP$  (контроль здійснюється по вольтметру  $U_{vx}$ ) від нуля до  $U$ , знімається ВАХ. При дослідженні потрібно змінювати полярність напруги управління на джерелі живленні  $U_y$ .

Схема для дослідження вихідних ВАХ біполярного транзистора наведена на рис. 2.16.

Сімейства вихідних ВАХ  $I_k = f(U_{кб})$ , де  $I_k$  – струм, що протікає через колектор,  $U_{кб}$  – напруга на колекторі відносно бази, знімаються при фіксованих значеннях струму, що протікає через емітер,  $I_e$  шляхом зміни напруги  $U_{кб}$  та вимірювання  $I_k$ . Сімейство вхідних ВАХ  $I_e = f(U_{еб})$ , де  $U_{еб}$  –

напруга на емітері відносно бази, знімається шляхом зміни  $I_e$  та вимірювання  $U_{eб}$  при фіксованих значеннях  $U_{кб}$ .

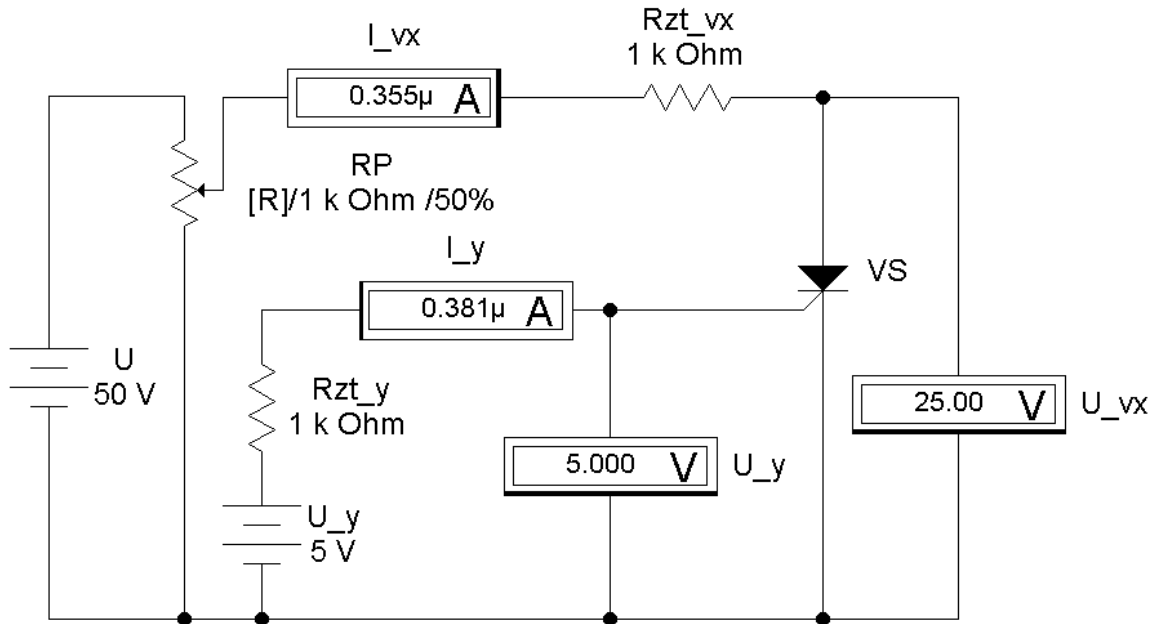


Рисунок 2.15 – Схема для дослідження тиристора

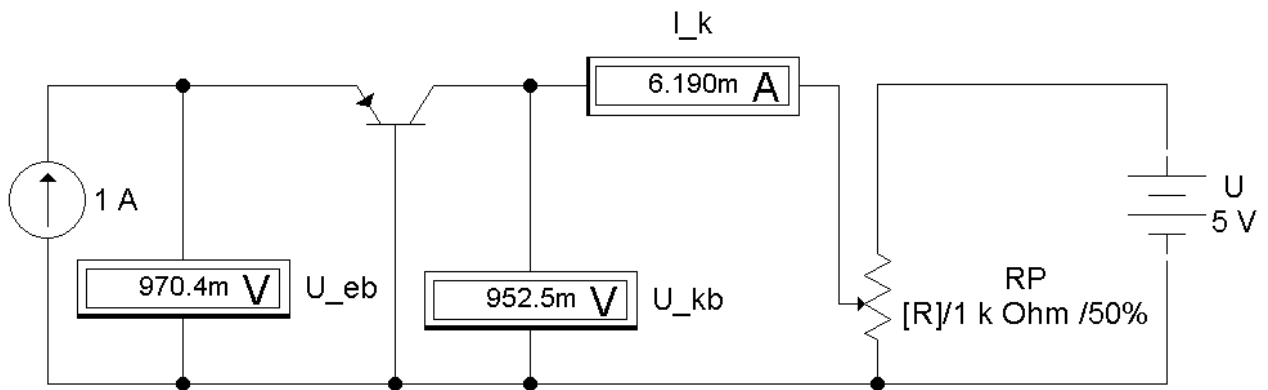



Рисунок 2.16 – Схема для дослідження вихідних ВАХ біполярного транзистора

### Лабораторна робота №3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНОГО ОПОРУ, ІНДУКТИВНОСТІ ТА ЄМНОСТІ

 **Мета роботи** Провести експериментальну перевірку розподілення напруг на елементах кола, закону Ома, набути навичок у побудові векторних діаграм та визначенні параметрів кола; дослідити резонанс напруг.

### 3.1 Основні теоретичні положення

В загальному випадку електричне коло змінного струму може мати резистивні ( $R$ ), індуктивні ( $L$ ) та ємнісні елементи ( $C$ ).

#### 3.1.1 Коло змінного струму з резистивним елементом

*Резистивний (активний) опір  $R$*  – це елемент, в якому відбувається необоротний процес перетворення електричної енергії в теплову [6-10].

При підключенні активного опору  $R$  до джерела (рис. 3.1, а) з напругою  $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ , де  $U_m$  – амплітуда напруги,  $\omega$  [рад/с] – кругова частота ( $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ , де  $f$  [Гц] – циклова частота,  $T$  [с] – період),  $\psi_u$  – початкова фаза напруги, то відповідно до закону Ома в колі протікатиме струм

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \psi_u) = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (3.1)$$

амплітуда якого

$$I_m = \frac{U_m}{R}, \quad (3.2)$$

а початкова фаза  $\psi_i = \psi_u$ , тобто кут зсуву фаз  $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$ , звідки виходить, що *коефіцієнт* потужності  $\cos\varphi = 1$ .

Таким чином, в колі змінного струму з активним опором струм змінюється за таким самим законом, що й напруга (рис. 3.1, б) і вони збігаються за фазою.

Векторна діаграма напруги і струму резистивного елемента наведена на рис. 3.1, в).

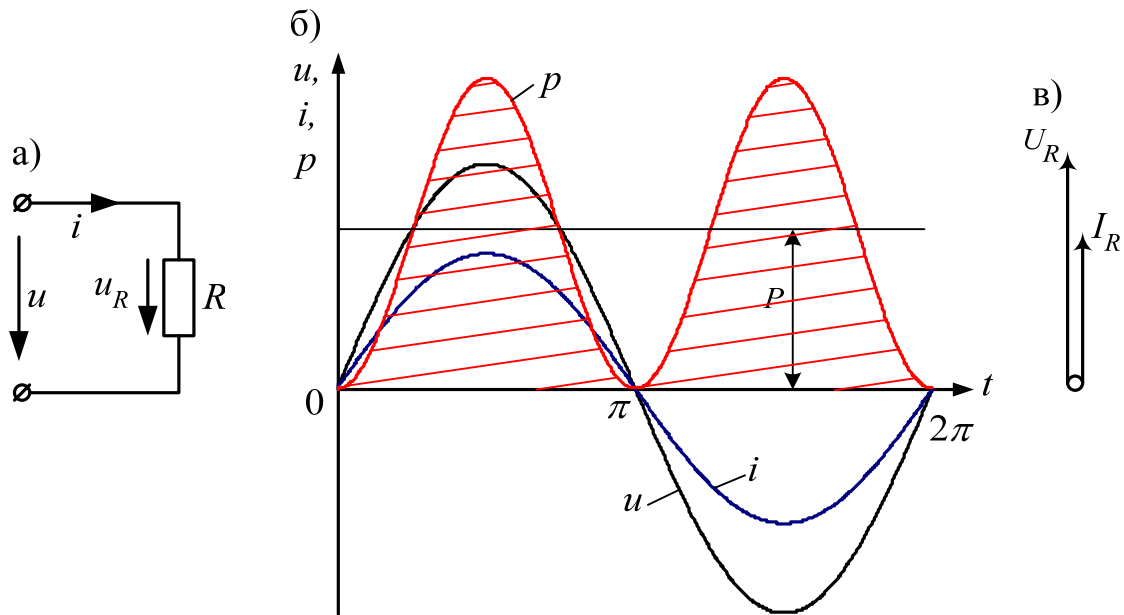


Рисунок 3.1 – До розгляду кола змінного струму з резистивним елементом:

а) – схема; б) – графіки синусоїдальних напруги і струму;

в) – векторна діаграма

Миттєве значення потужності визначається як добуток миттєвого значення напруги на миттєве значення струму:

$$\begin{aligned}
 p &= u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t = \\
 &= 2UI \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = UI(1 - \cos 2\omega t).
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Як видно з рис. 3.1, б), миттєва потужність  $p(t)$  коливається з подвійною частотою навколо середнього значення  $P$  від нуля до амплітудного значення, тобто завжди залишається додатною.

Середнє значення потужності за період визначається як

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_m I_m \sin^2 \omega t dt = \quad (3.4)$$
$$= \frac{U_m I_m}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{U_m I_m}{2}.$$

Виразивши амплітудні значення напруги і струму через діючі значення, одержимо:

$$P = UI, \quad (3.5)$$

а з врахуванням  $U=IR$  –

$$P = I^2 R. \quad (3.6)$$

З останнього виразу витікає, що **середня потужність** – це електрична потужність, яка перетворюється в електричному опорі в тепло. Така потужність називається **активною**.

### 3.1.2 Коло змінного струму з індуктивністю

**Індуктивність**  $L$  [Гн] – характеризує властивість елемента кола, наприклад індуктивної котушки, під дією струму в ньому створювати власне магнітне поле.

**Індуктивний опір (реактивний опір індуктивності)** прямо пропорційний частоті змінного струму й індуктивності кола:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \text{ [Ом]}. \quad (3.7)$$

Напруга на індуктивному опорі визначається як

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos(\omega t + \psi_i) \quad (3.8)$$

або ж як

$$u_L = U_m \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + \psi_u), \quad (3.9)$$

звідки витікає, що в колі з індуктивною котушкою (рис. 3.2, а) струм відстає від напруги на  $90^\circ$ , тобто  $\varphi = \psi_u - \psi_i = \pi/2$  (рис. 3.2, б), в), а коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi = 0$ .

Закон Ома для діючих значень напруги і струму в колі з котушкою записується як

$$I = \frac{U}{X_L}. \quad (3.10)$$

Діюча змінна напруга пов'язана з амплітудою співвідношенням

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.11)$$

Із часової діаграми (рис. 3.2, б) видно, що потужність  $p(t)$  в колі з індуктивністю змінюється від нуля до амплітудного значення двічі за період, змінюючи свій знак:

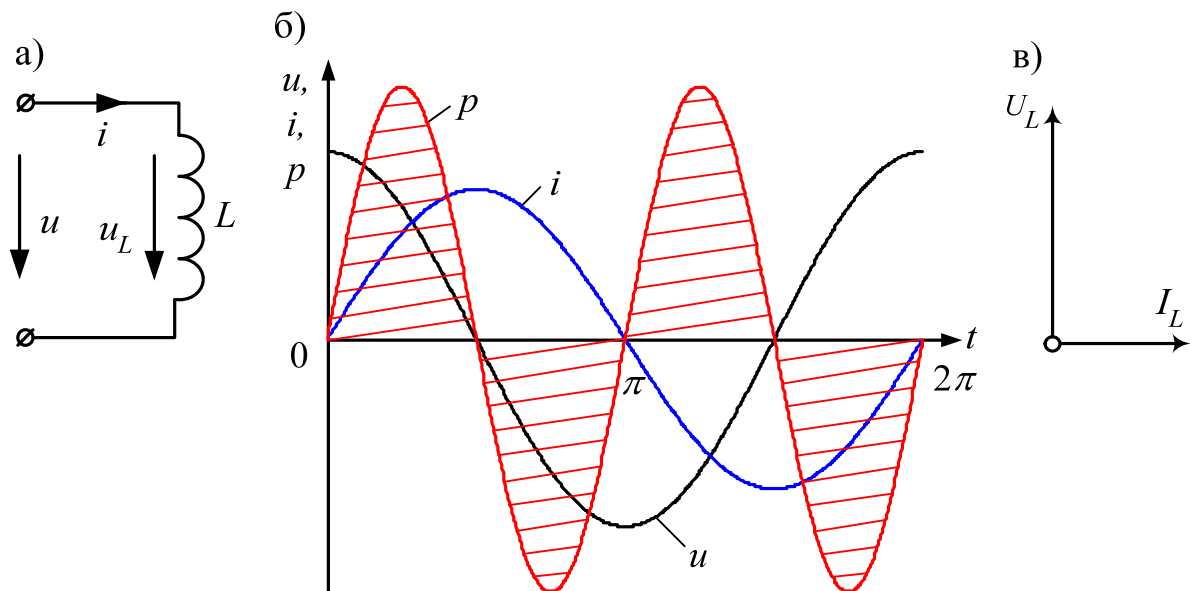


Рисунок 3.2 – До розгляду кола змінного струму з ідеальною індуктивною котушкою: а) – схема; б) – графіки синусоїдальних напруги і струму; в) – векторна діаграма



$$p(t) = u \cdot i = U_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \cdot I_m \sin \omega t = UI \sin 2\omega t. \quad (3.12).$$

Середнє значення потужності за період визначається як

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T ui \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t \cdot dt = 0, \quad (3.13)$$

тобто індуктивність активної потужності не споживає, що свідчить про наявність періодичного процесу обміну енергією між джерелом електричної енергії й магнітним полем індуктивності. Цю енергію називають *реактивною енергією*, а відповідну їй потужність – *реактивною потужністю*:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X_L \text{ [ВАр]}. \quad (3.14)$$

### 3.1.3 Коло змінного струму з конденсатором

*Ємність*  $C$  [Ф] – характеризує властивість елемента кола, наприклад конденсатора, накопичувати електричні заряди і створювати електричне поле.

В електричних установках ємності утворюються між проводами, проводами і землею в лініях електропередач, а також між іншими елементами струмоведучих конструкцій. В силових електроустановках використовуються конденсатори для підвищення коефіцієнта потужності. В радіотехніці конденсатори застосовуються в коливальних контурах, фільтрах тощо.

*Ємнісний опір (реактивний опір конденсатора)* обернено пропорційний частоті синусоїдального струму і ємності конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \text{ [Ом]}. \quad (3.15)$$

Якщо конденсатор увімкнути в коло змінного струму (рис. 3.3, а) із синусоїдальною напругою, то він буде заряджатися в такт зміні прикладеної напруги.

Закон Ома для діючих значень напруги і струму в колі з конденсатором записується як

$$I = \frac{U}{X_C}. \quad (3.16)$$

Діюче значення струму в колі визначається як

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.17)$$

В колі з конденсатором струм випереджає напругу на  $90^\circ$ , тобто  $\varphi = \psi_u - \psi_i = -\pi/2$  (рис. 3.3, б), в), а коефіцієнт потужності –  $\cos\varphi = 0$ .

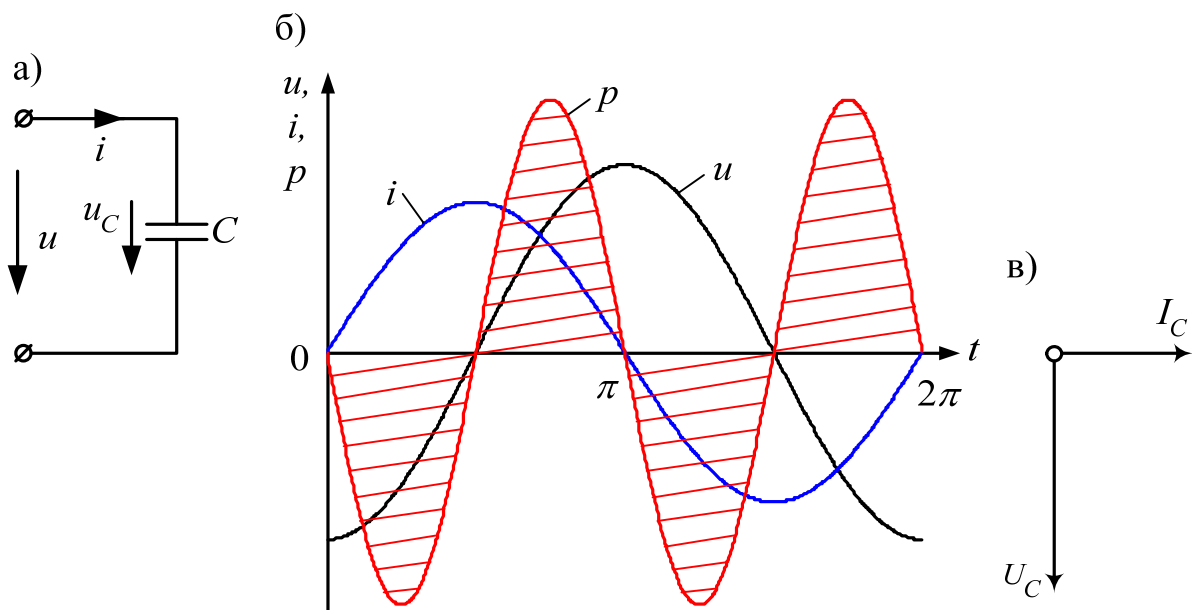


Рисунок 3.3 – До розгляду кола змінного струму з конденсатором:

а) – схема; б) – графіки синусоїдальних напруги і струму;

в) – векторна діаграма

Із часової діаграми (рис. 3.3, б) видно, що потужність  $p(t)$  в колі з конденсатором змінюється від нуля до амплітудного значення двічі за період, змінюючи свій знак.

Миттєве та середнє значення потужностей в колі з конденсатором визначається відповідно співвідношеннями (3.12) та (3.13), тобто, як і в колі з індуктивністю, відбувається неперервний обмін енергією між мережею та конденсатором. Потужність, що характеризує швидкість змін цієї енергії, називається *реактивною потужністю*:

$$Q = UI \sin \varphi = I^2 X_C \text{ [ВАр]}. \quad (3.18)$$

### 3.1.4 Послідове з'єднання резистора, конденсатора й індуктивності

Розглянемо загальний випадок електричного кола з послідовним з'єднанням активного опору, реальної котушки індуктивністю  $L$  та конденсатора  $C$  (рис. 3.4).

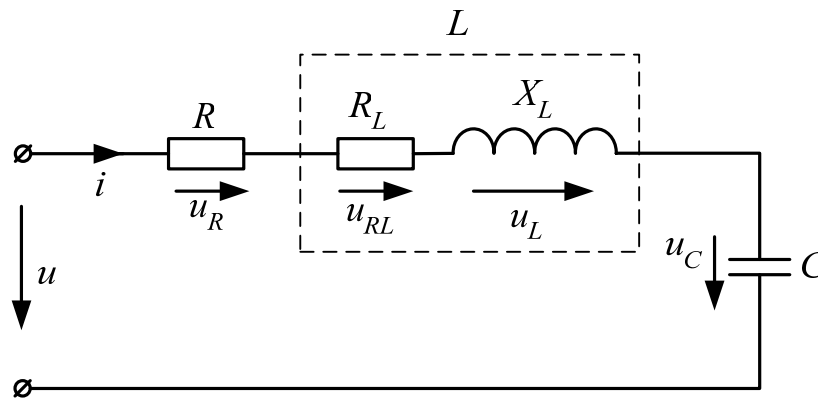


Рисунок 3.4 – Послідовне включення резистора, індуктивної котушки та конденсатора в коло змінного струму

Рівняння за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень напруг записується у вигляді:

$$u = u_R + u_{RL} + u_{XL} + u_C. \quad (3.19)$$

Якщо напруги виразити через струм і відповідні опори, а миттєве значення напруги мережі записати як  $u = U_m \sin \omega t$ , то отримаємо таке рівняння:

$$u = RI_m \sin \omega t + R_L I_m \sin \omega t + X_L I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) + X_C I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (3.20)$$

для якого векторна діаграма для діючих значень напруг буде мати вигляд як на рис. 3.5, причому при  $X_L > X_C$  – коло носитиме індуктивний характер (рис. 3.5, а), а при  $X_L < X_C$  – ємнісний (рис. 3.5, б).

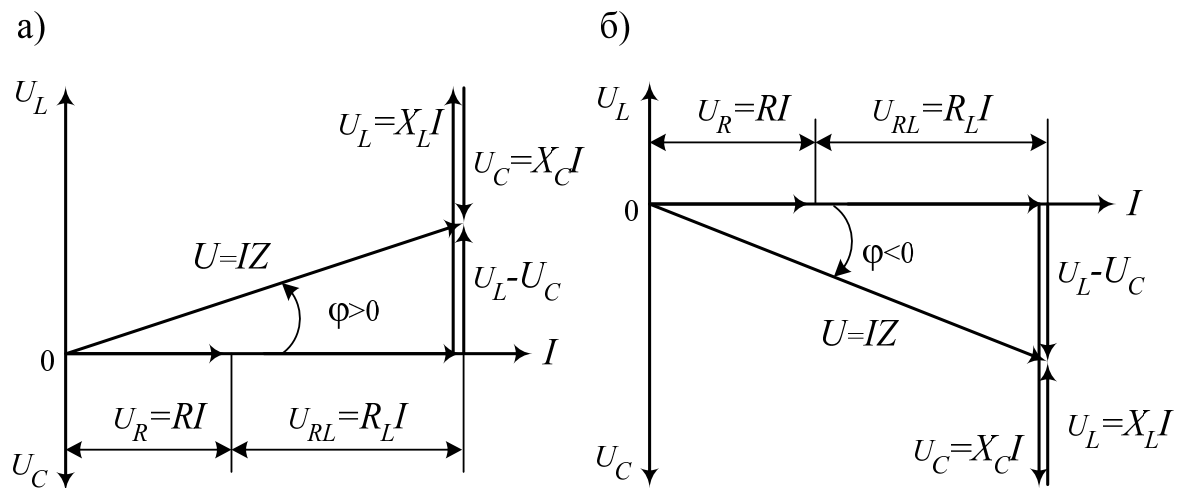


Рисунок 3.5 – Векторні діаграми напруг індуктивного (а) та ємнісного (б) характерів

Вектор напруги, прикладеної до кола, дорівнює геометричній сумі векторів напруг окремих її ділянок:

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_{RL} + \bar{U}_L + \bar{U}_C, \quad (3.21)$$

а його величина визначається як

$$U = \sqrt{(U_R + U_{RL})^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (3.22)$$

Виразивши напруги через струм і опори, отримаємо:

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{[(R + R_L) \cdot I]^2 + [(X_L - X_C) \cdot I]^2} = \\ &= I \sqrt{(R + R_L)^2 + (X_L - X_C)^2} = ZI, \end{aligned} \quad (3.23)$$

де  $Z$  – повний опір кола, який визначається як

$$Z = \sqrt{(R + R_L)^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (3.24)$$

Кут зсуву фаз між напругою і струмом визначається із співвідношення опорів:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X_L - X_C}{R + R_L}\right) = \arccos\left(\frac{R + R_L}{Z}\right). \quad (3.25)$$

При  $X_L = X_C$  в колі спостерігатиметься резонанс напруг. При цьому струм в колі

$$I = \frac{U}{R + R_L} \quad (3.26)$$

може значно зрости відносно свого значення за відсутності резонансу. В такому випадку напруга на індуктивності  $U_L$  стає рівною напрузі на ємності  $U_C$ :

$$IX_L = IX_C = U_L = U_C. \quad (3.27)$$

тобто при збігові початкових фаз напруги й струму.

Резонансні частоти можна знайти із співвідношень

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (3.28)$$

Тоді резонансну ємність можна записати як

$$C_{рез} = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (3.29)$$

① *Приклад 3.1.* Коло змінного струму, що складається з послідовно увімкнених індуктивної котушки з параметрами  $R_L = 20$  Ом,  $L = 0,5$  Гн та конденсатора  $C = 75$  мкФ, живиться від напруги  $U = 220$  В з частотою  $f = 50$  Гц. Визначити опори, коефіцієнт потужності, струм і напруги на ділянках кола.

*Розв'язок.* Спочатку знайдемо кругову частоту:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ (рад/с)}.$$

Індуктивний опір котушки:

$$X_L = L\omega = 0,5 \cdot 314 = 157 \text{ (Ом)}.$$

Повний опір котушки:

$$Z_L = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 157^2} = 158,3 \text{ (Ом)}.$$

Коефіцієнт потужності котушки:

$$\cos \varphi_L = \frac{R_L}{Z_L} = \frac{20}{158,3} = 0,126,$$

звідки  $\varphi_L = \arccos 0,126 \approx 83^\circ$ .

Індуктивний опір конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 42,5 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір кола:

$$X = X_L - X_C = 157 - 42,5 = 114,5 \text{ (Ом)}.$$

Повний опір кола:

$$Z = \sqrt{R_L^2 + X^2} = \sqrt{20^2 + 114,5^2} = 116,2 \text{ (Ом)}.$$

Коефіцієнт потужності кола:

$$\cos \varphi = \frac{R_L}{Z} = \frac{20}{116,2} = 0,172,$$

звідки  $\varphi = \arccos 0,172 = 80^\circ$ .

Струм, що протікає в колі:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{116,2} = 1,7 \text{ (Ом)}.$$

Напруга на індуктивній котушці:

$$U_{RL} = R_L I = 20 \cdot 1,7 = 34 \text{ (В)};$$

$$U_{XL} = X_L I = 157 \cdot 1,7 = 266,9 \text{ (В)};$$

$$U_L = Z_L I = 158,3 \cdot 1,7 = 269,1 \text{ (В)}.$$

Напруга на конденсаторі:

$$U_{XC} = X_C I = 42,5 \cdot 1,7 = 72,3 \text{ (В)}.$$

Активна та реактивна напруги, відповідно:

$$U_a = U_{RL} = 34 \text{ (В)}.$$

$$U_p = U_{XL} - U_{XC} = 266,9 - 72,3 = 194,6 \text{ (В)}.$$

### 3.2 Програма роботи

3.2.1 Ознайомитися з елементною базою і електричними вимірювальними приладами, які застосовуються для проведення досліду.

3.2.2 Зібрати електричну схему для визначення параметрів реальної котушки з індуктивністю  $L$  (рис. 3.6). Здійснити вимірювання необхідних величин, розрахувати повний, активний, реактивний опори котушки, а також її індуктивність. Результати досліду занести до табл. 3.1.

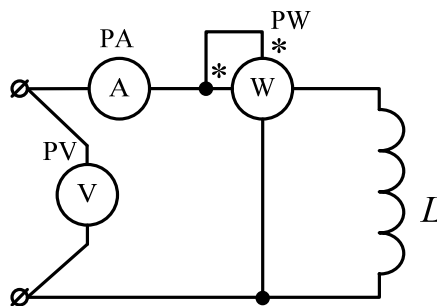


Рисунок 3.6 – Схема для визначення параметрів індуктивної котушки

Таблиця 3.1 – Визначення параметрів індуктивної котушки

Покази приладів			Розраховані параметри котушки $L$				
$U$ ,	$I$ ,	$P_L$ ,	$Z_L$ ,	$R_L$ ,	$X_L$ ,	$L$ ,	$\varphi_L$ ,
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	град.

Повний  $Z_L$ , активний  $R_L$  та реактивний  $X_L$  опори котушки можна визначити із відповідних співвідношень:

$$Z_L = \frac{U}{I}, \quad (3.30)$$

$$R_L = \frac{P_L}{I^2}, \quad (3.31)$$



$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}. \quad (3.32)$$

Індуктивність котушки можна визначити із (3.4):

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}. \quad (3.33)$$

3.2.3 Розрахувати ємність конденсаторної батареї, при якій в електричному колі з послідовним з'єднанням елементів виникає резонанс напруг.

3.2.4 Зібрати схему з послідовним з'єднанням елементів (рис. 3.7) і провести експериментальні дослідження для трьох випадків:

- 1)  $C = C_{рез}$ ;                      2)  $C > C_{рез}$ ;                      3)  $C < C_{рез}$ .

Результати дослідів занести до табл. 3.2.

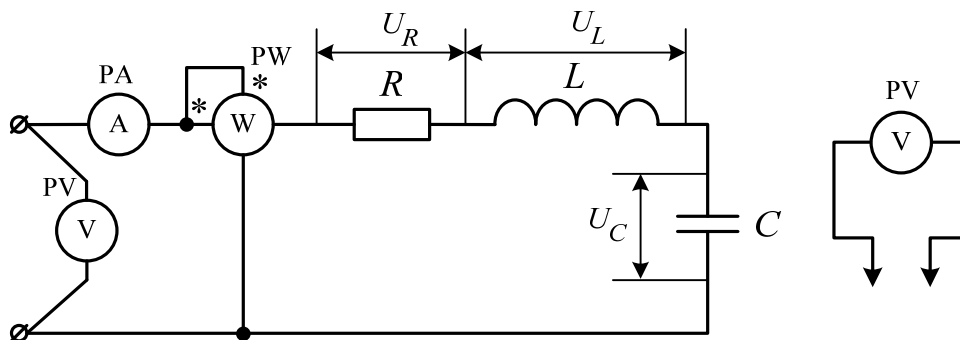


Рисунок 3.7 – Схема для дослідження послідовного з'єднання елементів

Таблиця 3.2 – Експериментальні та розрахункові дані дослідження кола з послідовним з'єднанням елементів

№ досл.	Покази приладів						Розраховані параметри кола							Умови
	U, В	I, А	P, Вт	UR, В	UL, В	UC, В	URL, В	UXL, В	S, ВА	QL, ВАр	QC, ВАр	cosφ	φ, град	
1														$C = C_{рез}$
2														$C > C_{рез}$
3														$C < C_{рез}$

Повна потужність кола визначається як

$$S = UI \text{ (ВА)}. \quad (3.34)$$

3.2.5 За результатами досліду побудувати в масштабі векторні діаграми та зробити висновки.

### 3.3 Питання для самоконтролю



1. Що називається миттєвим значенням синусоїдальної величини? Навести приклад запису миттєвих значень, дати пояснення на часовій діаграмі.
2. Що таке діюче і середнє значення синусоїдальних величин? Показати ці значення на часовій діаграмі синусоїдальної величини.
3. Векторне відображення синусоїдальних величин. Векторні діаграми.
4. Дати коротку характеристику елементів електричного кола (активного, реактивних і повного). Означення реактивного та повного опорів.
5. Записати закон Ома в класичній формі.
6. Трикутник напруг, опорів, потужностей.
7. Потужності в електричних колах змінного струму. Пояснити фізичний зміст перетворення електромагнітної енергії.
8. Які умови виникнення резонансу напруг і які співвідношення основних величин у цьому режимі?
9. Що таке коефіцієнт потужності і що він характеризує?

### 3.4 Задачі для самостійного розв'язування

3.4.1 ЕРС і струм в електричному колі виражені рівняннями:

$$e = E_m \sin \omega t; \quad i = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Яке значення має ЕРС в момент, коли струм  $i = 0$ ?

Яке значення має струм, коли ЕРС  $e = E_m$ ?

Яка величина відстає по фазі від іншої?

3.4.2 Напруги на послідовно з'єднаних елементах кола мають такі значення:  $u_1 = 70\sin 314t$ ;  $u_2 = 141\sin(314t + 90^\circ)$ ;  $u_3 = 55\sin 314t$ ;  $u_4 = 220\sin(314t - 90^\circ)$ , а струм в колі –  $i = 14,1\sin 314t$ . Необхідно:

- зобразити принципову електричну схему, яка відповідала б заданим параметрам;
- визначити діючі значення напруг на елементах кола і напругу на затискачах;
- побудувати топографічну векторну діаграму.

3.4.3 Для задачі 3.4.2 необхідно:

- визначити параметри елементів схеми;
- визначити потужності в колі;
- визначити коефіцієнт потужності;
- записати рівняння миттєвого значення напруги на затискачах.

3.4.4 Визначити частоту  $f$  та кутову частоту  $\omega$  синусоїдального струму, період якого дорівнює 0,05 с.

3.4.5 Задані миттєві значення синусоїдальної напруги та струму:

1)  $u = U_m \sin \omega t$ ;  $i = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$ ;

2)  $u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ ;  $i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ ;

3)  $u = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$ ;  $i = I_m \sin \omega t$ ;

4)  $u = U_m \sin \omega t$ ;  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi^0)$ ;

5)  $u = U_m \sin \omega t$ ;  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi^0)$ .

Визначити, які значення  $u$  та  $i$  відповідатимуть:

- а) активному навантаженню;
- б) індуктивному навантаженню;
- в) ємнісному навантаженню;
- г) активно-індуктивному навантаженню;
- д) активно-ємнісному навантаженню.

3.4.6 Визначити миттєве значення синусоїдальної напруги  $500\sin(314t + 20^\circ)$  в момент часу  $t = 0,003$  с.

Варіанти відповідей:

- 1)  $\approx 170$  В;    2)  $\approx 250$  В;    3)  $\approx 340$  В;    4) 480 В;    5)  $\approx -480$  В.

3.4.7 Вказати вираз для визначення миттєвого значення загального струму  $i$  в схемі (рис. 3.8), якщо  $i_1 = 2,5\sin(\omega t + 60^\circ)$  А, а  $i_2 = 2,5\sin(\omega t - 60^\circ)$ .

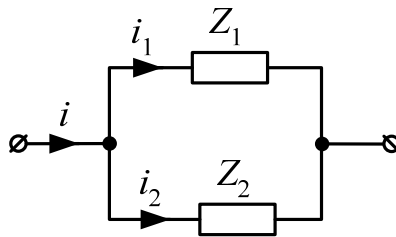


Рисунок 3. 8 – Схема до задачі 3.4.7

Варіанти відповідей:

- 1)  $i = 2,5\sin\omega t$ ;
- 2)  $i = 2,5\sin(\omega t + 120^\circ)$ ;
- 3)  $i = 2,5\sin(\omega t + 60^\circ)$ ;
- 4)  $i = 2,5\sqrt{2}\sin(\omega t + 120^\circ)$ ;
- 5)  $i = 5\sin\omega t$ .

### 3.5 Вправи для закріплення матеріалу

Для більш кращого розуміння процесів, що протікають в  $RLC$ -колі, розглянемо послідовні  $RL$ - та  $RC$ - кола, а потім коло, що містить всі три елементи одночасно.

### 3.5.1 Послідовне з'єднання резистора та індуктивності

Виберемо такі параметри кола: напруга живлення –  $U = 220$  В; частота напруги –  $f = 50$  Гц; активний опір –  $R = 22$  Ом; індуктивність –  $L = 0,3$  Гн.

В прикладі 3.1 розраховано, що при  $f = 50$  Гц кругова частота  $\omega = 314$  рад/с. Тоді індуктивний опір кола

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 0,3 = 94,2 \text{ (Ом)},$$

а повний опір кола –

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{22^2 + 94,2^2} = 96,7 \text{ (Ом)}.$$

Струм, що протікає в колі, та напруга на елементах схеми, відповідно, дорівнюють:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{96,7} = 2,28 \text{ (А)};$$

$$U_R = IR = 2,28 \cdot 22 = 50 \text{ (В)};$$

$$U_L = IX_L = 2,28 \cdot 94,2 = 214,7 \text{ (В)}.$$

Початкова фаза:

$$\psi = \arccos \frac{R}{Z} = \arccos \frac{22}{96,7} = 76,8^\circ.$$

В результаті моделювання послідовного з'єднання  $RL$ -кола із заданими параметрами, як видно з рис. 3.9, числові значення моделювання практично збігаються із розрахунковими. Похибка моделювання викликана неточним заданням в програмі індуктивності.

З осцилограм рис. 3.10 видно, що напруга на вході  $RL$ -кола (візирна лінія 1 перетинає осцилограму цієї напруги при  $u = 0$ ) випереджає напругу на опорі  $R$  (візирна лінія 2), а відповідно і струм, на час  $T_2 - T_1 = 4,25$  мс (рис. 3.10).

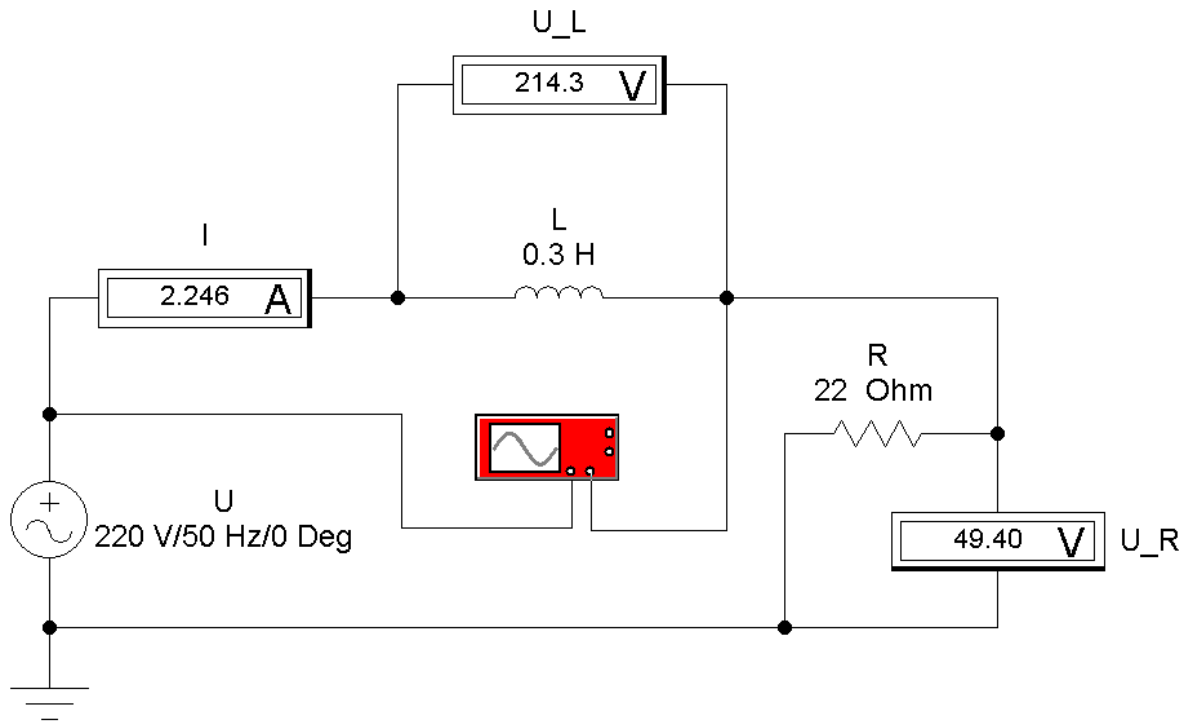


Рисунок 3.9 – Схема послідовного  $RL$ -кола в Electronics Workbench

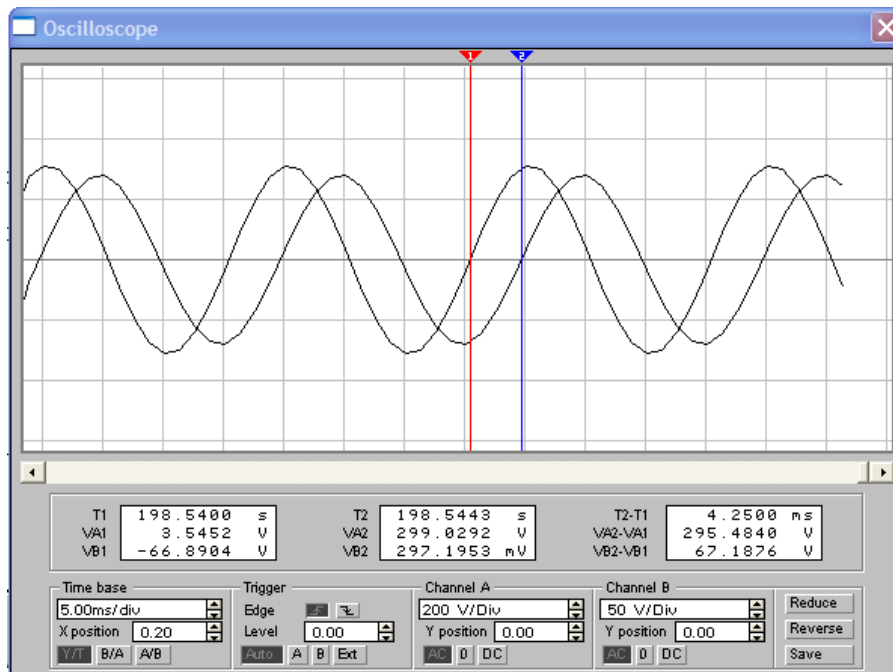


Рисунок 3.10 – Осцилограми сигналів послідовного  $RL$ -кола

Оскільки період коливань  $T = 1 / f = 1 / 50 = 0,02$  с, то в градусах цей часовий проміжок складає

$$\psi_m = \frac{360^\circ \cdot (T_2 - T_1)}{T} = \frac{360^\circ \cdot 4,25 \cdot 10^{-3}}{0,02} = 76,5^\circ,$$

тобто похибка моделювання за  $\psi$  становить 0,4%.

### 3.5.2 Послідовне з'єднання резистора та ємності

Візьмемо ті ж самі параметри кола ( $U, f, R$ ), що і п. 3.5.1, та ємність конденсатора  $C = 75$  мкФ. Тоді ємнісний опір кола

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 75 \cdot 10^{-6}} = 42,5 \text{ (Ом)},$$

а повний опір –  $Z = 47,9$  Ом.

Результати розрахунку:  $I = 4,6$  Ом;  $U_R = 101,2$  В;  $U_C = 220$  В;  $\psi = 62,7^\circ$ .

З схеми моделювання (рис. 3.11) та осцилограм (рис. 3.12) видно, що похибка моделювання за струмом та напругами в основному спричинена ємністю (як і індуктивністю в попередньому випадку), а похибка за  $\psi$  практично відсутня: при  $T_2 - T_1 = -3,5$  мс (рис. 3.12)  $\psi_m = 63^\circ$ . Крім того, осцилограми (рис. 3.12) показують, що напруга на вході (візирна лінія 1) відстає від напруги на резисторі (візирна лінія 2).

### 3.5.3 Послідовне з'єднання індуктивності, ємності та резистора

Для тих самих параметрів елементів та вхідної напруги кола розрахуємо частоту  $f_{рез}$ , при якій в колі настане резонанс напруг.

Відповідно до виразу (3.23)  $f_{рез} = 33,6$  Гц, що відповідає  $X_L = X_C = 63,2$  Ом. Оскільки умовою резонансу є рівність індуктивних опорів, то  $I = 10$  А,  $U_R = 220$  В,  $U_C = U_L = 632$  В,  $\psi = 0^\circ$ .

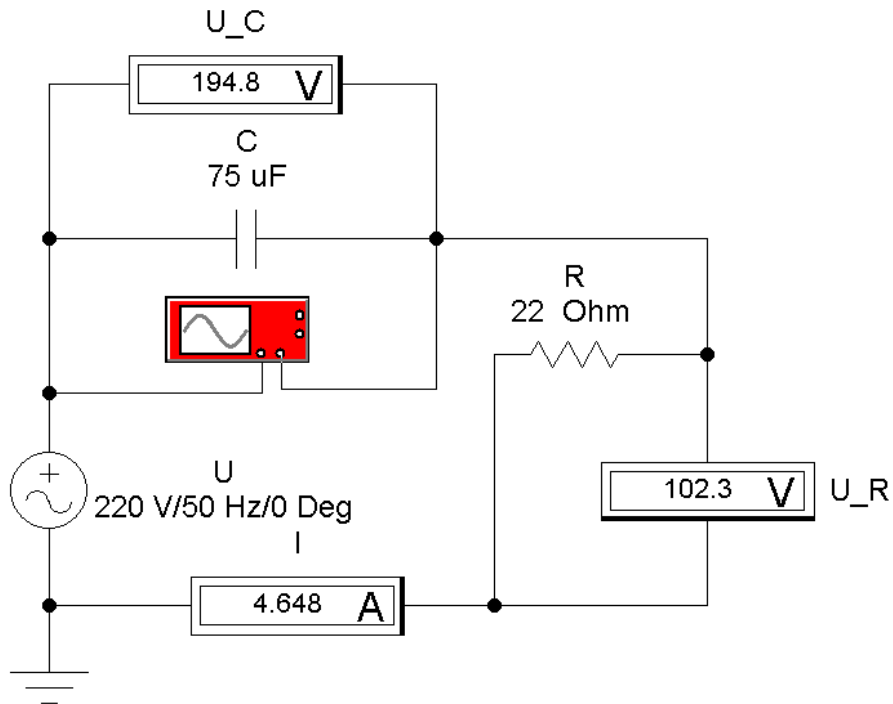


Рисунок 3.11 – Схема послідовного  $RC$ -кола в Electronics Workbench

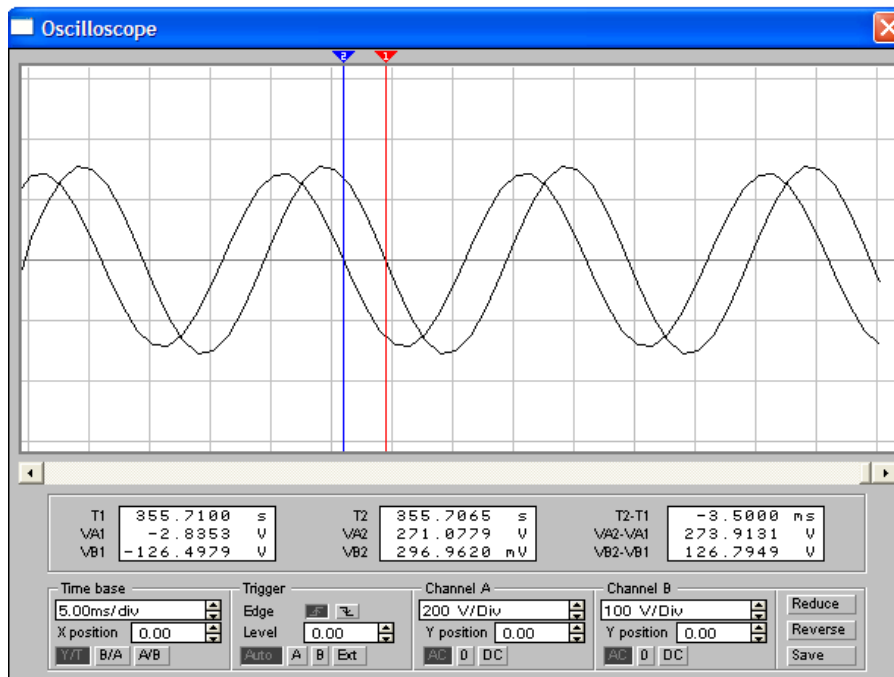


Рисунок 3.12 – Осцилограми сигналів послідовного  $RC$ -кола

Як видно з результатів моделювання (рис. 3.13), наявні одні і ті ж похибки (причини ті ж самі). Напряга на опорі і, власне, струм в колі в послідовному коливальному контурі збігається за фазою з вхідною напругою (рис. 3.14).



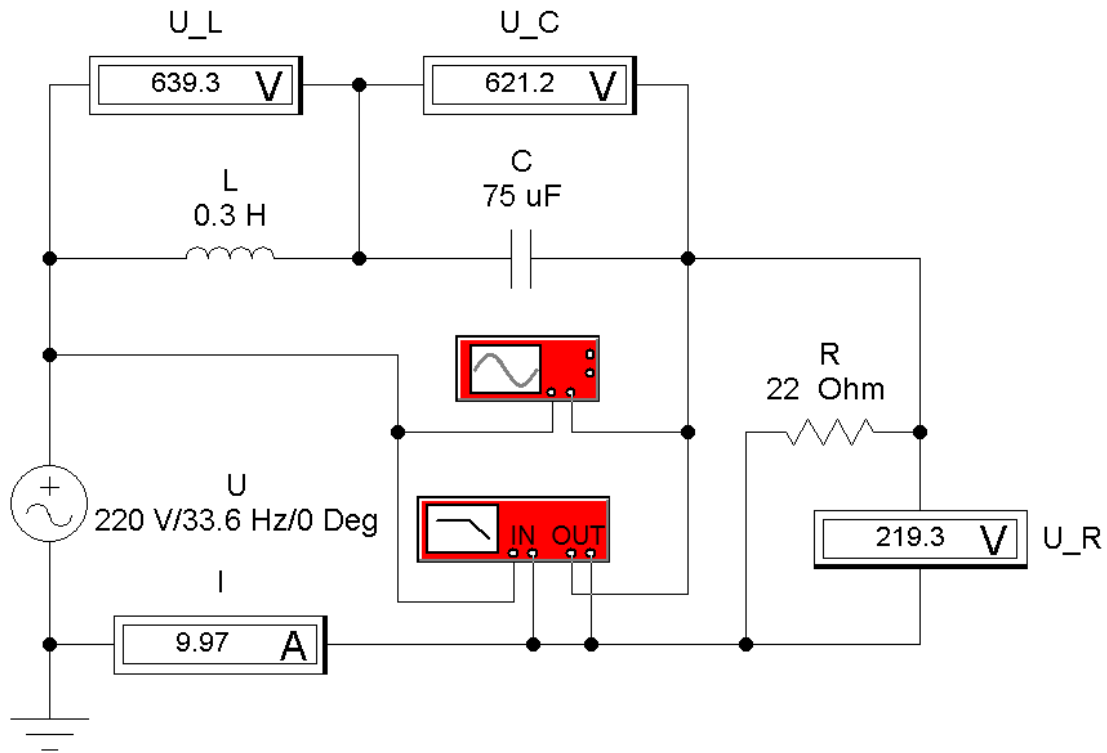


Рисунок 3.13 – Схема послідовного  $RCL$ -кола в Electronics Workbench

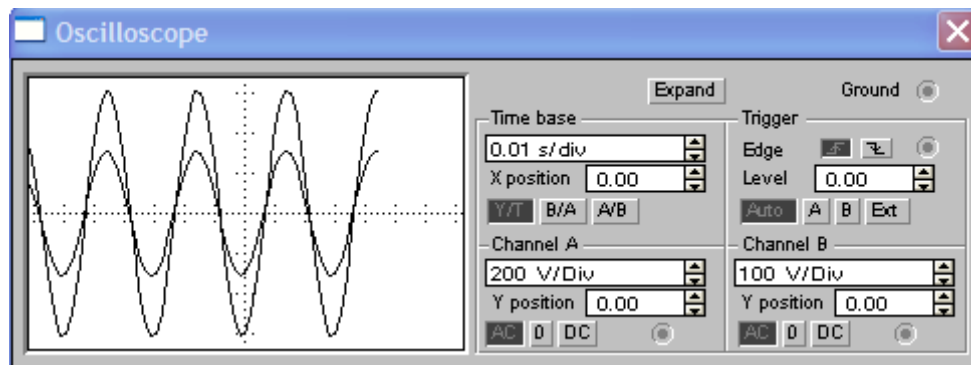


Рисунок 3.14 – Осцилограми сигналів послідовного  $RCL$ -кола

Це означає, що на резонансній частоті фазо-частотна характеристика контуру (рис. 3.15) повинна мати нульове значення. Але через прийняту за замовчуванням дискретність візирну лінію не можна встановити на фазо-частотній характеристиці на нулю, найближчим значенням є частота 33,11 Гц, що відповідає значенню фази  $4,337^{\circ}$ .

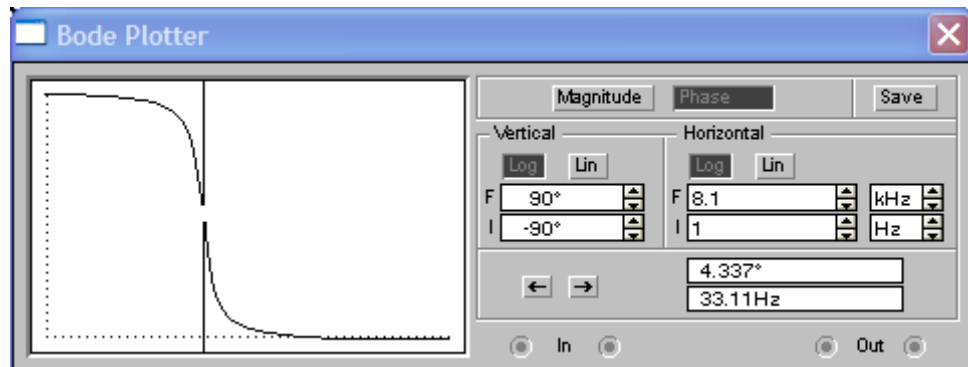


Рисунок 3.15 – Фазо-частотна характеристика послідовного  $RCL$ -кола

Фазо-частотні характеристики в Electronics Workbench можна досліджувати з використанням елемента вимірювача амплітудо-частотної та фазо-частотної характеристик (на рис. 3.13 він поданий під осцилографом).

## Лабораторна робота №4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ З'ЄДНАННЯМ АКТИВНОГО ОПОРУ, РЕАЛЬНОЇ ІНДУКТИВНОЇ КОТУШКИ ТА ЄМНОСТІ

📁 **Мета роботи**    Експериментально перевірити закон Ома і перший закон Кірхгофа для електричного кола з паралельним з'єднанням елементів. Дослідити резонанс струмів і вплив зміни ємності на величину коефіцієнта потужності кола. Набути навичок визначення параметрів елементів кола і побудови векторних діаграм.

#### 4.1 Основні теоретичні положення

Для аналізування і проведення розрахунку розгалужених електричних кіл змінного струму застосовують метод провідностей. За допомогою цього методу паралельну ділянку кола замінюють елементом з послідовним з'єднанням, в якому аналітично визначають струми і напруги на всіх ділянках кола.

В електричних колах змінного струму розрізняють три провідності – *повну*, яка визначається відповідно до (1.8), *активну* й *реактивну*, які, відповідно, визначаються як [3]

$$G = Y \cos \varphi; \quad B = Y \sin \varphi, \quad (4.1)$$

причому

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2}. \quad (4.2)$$

Повна реактивна провідність визначається як

$$B = B_L - B_C, \quad (4.3)$$

де індуктивна і ємнісна провідності, відповідно, визначаються як

$$B_L = \frac{X_L}{Z^2}; \quad B_C = \frac{X_C}{Z^2}. \quad (4.4)$$

При паралельному з'єднанні елементів (рис. 4.1) рівняння для миттєвих значень струму можна записати у вигляді:

$$i = i_R + i_L + i_C, \quad (4.5)$$

а у комплексній формі –

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C. \quad (4.6)$$

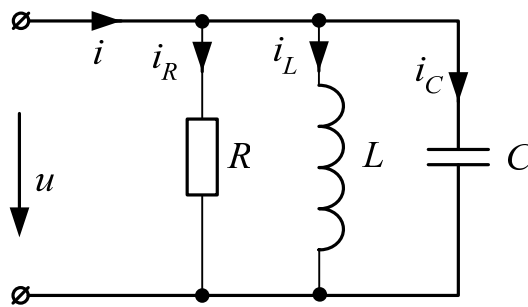


Рисунок 4.1 – Паралельне вмикання резистора, індуктивної котушки та конденсатора в коло змінного струму

Активна та реактивна складові струму, відповідно, можна виразити як

$$\dot{I}_a = \dot{I}_R = G\dot{U}, \quad (4.7)$$

$$\dot{I}_p = \dot{I}_L - \dot{I}_C = -jB\dot{U}.$$

Діючий повний комплексний струм паралельної вітки

$$\dot{I} = \dot{I}_a + \dot{I}_p. \quad (4.8)$$

Векторна діаграма для кола, що розглядається, побудована за рівнянням (4.6), зображена на рис. 4.2, з якого видно, що повний струм  $\dot{I}$  є гіпотенузою трикутника струмів:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (4.9)$$

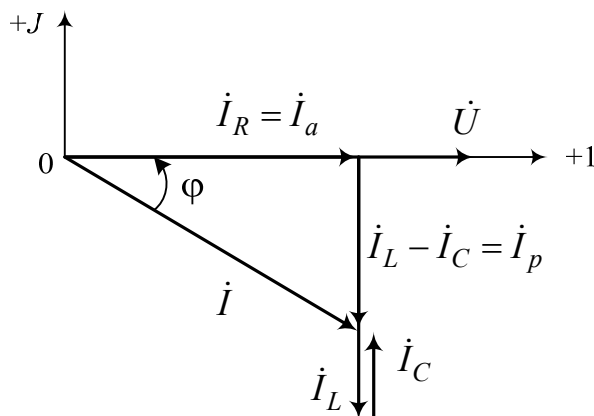


Рисунок 4.2 – Векторна діаграма кола змінного струму, що містить паралельно включені  $R$ - $L$ - $C$  елементи

З практичної точки зору важливим є той момент, що струми в індуктивній  $\dot{I}_L$  і ємнісній  $\dot{I}_C$  вітках паралельного кола знаходяться в протифазі, а реактивний струм  $\dot{I}_p$  дорівнює їх різниці. Це використовується для компенсації індуктивного зсуву фаз.

Відповідно до трикутника струмів (рис. 4.2), що відповідає рівнянню (4.6), аналогічним чином можна побудувати трикутник провідностей, що відповідатиме рівнянню (4.2), причому

$$\varphi = \arccos \frac{G}{Y}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{B}{G}. \quad (4.10)$$

Розглянемо методику розрахунку паралельного кола на схемі рис. 4.3. Розрахунок здійснюється в такому порядку.

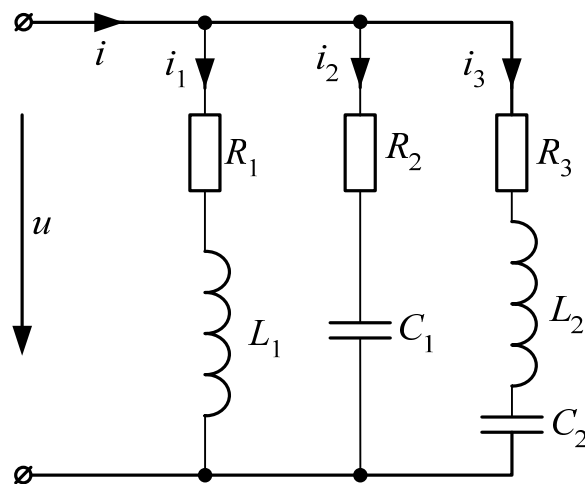


Рисунок 4.3 – Схема з паралельним вмиканням елементів

1. Визначають реактивні опори віток:

$$X_{L1} = X_1 = \omega L_1;$$

$$X_{C1} = X_2 = \frac{1}{\omega C_1};$$

$$X_{L2} = \omega L_2; \quad X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2}; \quad X_3 = X_{L2} - X_{C2}.$$

2. Визначають повні опори віток:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}; \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}; \quad Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_3^2}.$$

3. Визначають провідності віток:

а) активні провідності:

$$G_i = \frac{R_i}{Z_i^2}, \quad i = \overline{1, 3};$$

б) реактивні провідності:

$$B_i = \frac{X_i}{Z_i^2}.$$

4. Визначають активні складові струмів віток:

$$I_{ai} = UG_i.$$

5. Визначають реактивні складові струмів:

$$I_{pi} = UB_i.$$

6. Визначають активну складову загального струму:

$$I_a = \sum_{i=1}^3 I_{ai}.$$

7. Визначають реактивну складову загального струму:

$$I_p = I_{p1} - I_{p2} - I_{p3}$$

за умови, що  $X_{C2} > X_{L2}$ .

8. Еквівалентна активна провідність кола дорівнює арифметичній сумі активних провідностей віток:

$$G_e = \sum_{i=1}^3 G_i,$$

а реактивна провідність віток кола – алгебраїчній сумі реактивних провідностей:

$$B_e = \sum_{i=1}^3 B_i,$$

причому провідності віток з індуктивним характером навантаження беруться зі знаком „+”, а віток з ємнісним характером навантаження – зі знаком „-”.

Повна еквівалентна провідність кола:

$$Y_e = \sqrt{G_e^2 + B_e^2}.$$

За еквівалентними активною, реактивною і повною провідностями визначаються параметри еквівалентної схеми.

Еквівалентні активні, реактивні і повні опори кола, відповідно, визначаються за допомогою виразів:

$$Y_e = \frac{1}{Z_e}; \quad R_e = G_e Z_e^2; \quad X_e = B_e Z_e^2.$$

Векторна діаграма розглянутої схеми зображена на рис. 4.4.

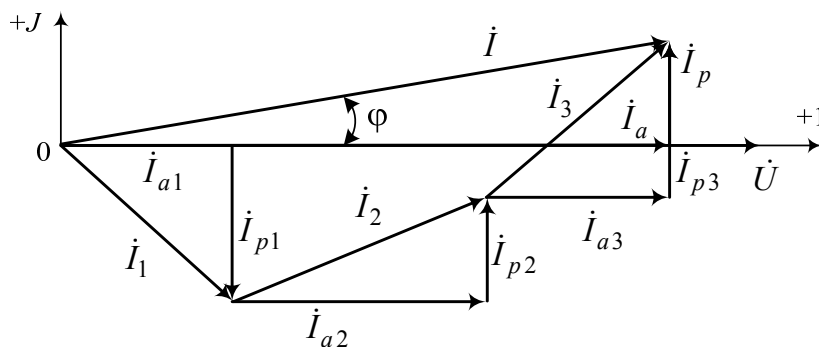


Рисунок 4.4 – Векторна діаграма схеми (рис. 4.3)

В колі змінного струму, що містить паралельно увімкнені індуктивний та ємнісний елементи, може виникати **резонанс струмів** – режим роботи кола, коли загальний струм збігається за фазою з напругою, реактивна потужність  $Q$  рівна нулю і коло споживає тільки активну потужність (повна реактивна провідність кола рівна нулю:  $B = B_L - B_C = 0$ ). При цьому векторна діаграма матиме вигляд як рис. 4.5.

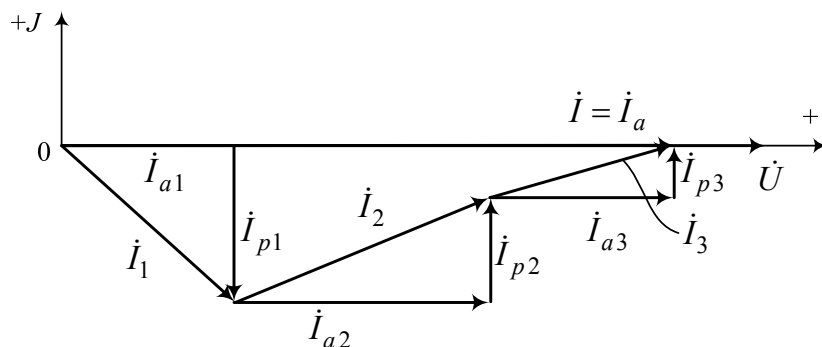


Рисунок 4.5 – Векторна діаграма у випадку наявності резонансу струмів



- ① Приклад 4.1. Елементи кола змінного струму (рис. 4.6), напруга і частота якого, відповідно,  $U = 220$  В,  $f = 50$  Гц, мають такі параметри:  $R_1 = 60$  Ом;  $R_2 = 20$  Ом;  $X_{L2} = 70$  Ом;  $R_3 = 70$  Ом;  $X_{C3} = 85$  Ом. Визначити опори, струми й потужності кола. Побудувати векторну діаграму.

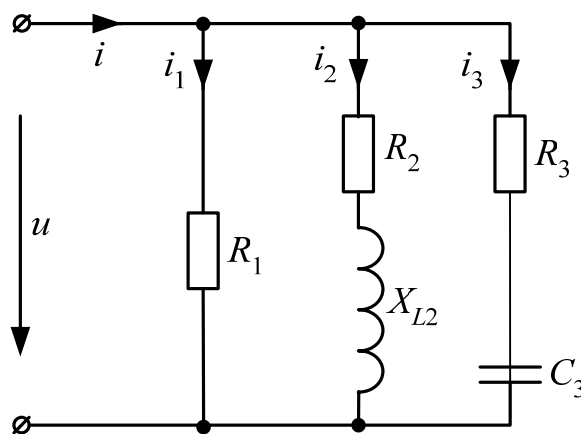


Рисунок 4.6 – Схема до прикладу 4.1

Розв'язування I (через складові струмів). Повний опір першої вітки кола відповідає активному опору:  $Z_1 = R_1 = 60$  Ом. А тому зсув фаз  $\varphi_1 = 0$ . Тоді струм

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{220}{60} = 3,667 \text{ (А)}.$$

Для другої вітки повний опір становитиме

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{20^2 + 70^2} = 72,801 \text{ (Ом)},$$

а коефіцієнт потужності –

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{20}{72,8} = 0,2747,$$

звідки  $\varphi_2 = 74,05^\circ$ .

Струм другої вітки:

$$I_2 = \frac{U_2}{Z_2} = \frac{220}{72,801} = 3,022 \text{ (A)}.$$

Повний опір третьої вітки:

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_{C3}^2} = \sqrt{70^2 + 85^2} = 110,114 \text{ (Ом)},$$

а коефіцієнт потужності –

$$\cos\varphi_3 = \frac{R_3}{Z_3} = \frac{70}{110,114} = 0,6357,$$

звідки  $\varphi_3 = 50,53^\circ$ .

Струм третьої вітки:

$$I_3 = \frac{U_3}{Z_3} = \frac{220}{110,114} = 1,998 \text{ (A)}.$$

Активні складові струмів у вітках та в колі:

$$I_{a1} = I_1 = 3,667 \text{ A};$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 3,022 \cdot \cos 74,05 = 0,83 \text{ (A)};$$

$$I_{a3} = I_3 \cos \varphi_3 = 1,998 \cdot \cos 50,53 = 1,27 \text{ (A)};$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} = 3,667 + 0,83 + 1,27 = 5,767 \text{ (A)}.$$

Реактивні складові струмів у вітках та в колі:

$$I_{p1} = 0;$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 3,022 \cdot \sin 74,05 = 2,906 \text{ (A)};$$

$$I_{p3} = I_3 \sin \varphi_3 = 1,998 \cdot \sin 50,53 = 1,542 \text{ (А)};$$

$$I_p = I_{p2} - I_{p3} = 2,906 - 1,542 = 1,364 \text{ (А)}.$$

Загальний струм кола:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{5,767^2 + 1,364^2} = 5,926 \text{ (А)}$$

3

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I} = \frac{5,767}{5,926} = 0,973; \quad \varphi = 13,3^0.$$

Повний опір кола:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{5,926} = 37,1 \text{ (Ом)}.$$

Потужності кола:

$$P = UI \cos \varphi = 220 \cdot 5,926 \cdot \cos 13,3 = 1268,8 \text{ (Вт)};$$

$$Q = UI \sin \varphi = 220 \cdot 5,926 \cdot \sin 13,3 = 299,9 \text{ (ВАр)};$$

$$S = UI = 220 \cdot 5,926 = 1303,7 \text{ (ВА)}.$$

*Розв'язування II (через провідності).* Активні провідності віток та кола:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{60} = 0,01667 \text{ (См)};$$

$$G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{20}{72,8^2} = 0,00378 \text{ (См)};$$

$$G_3 = \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{70}{110,1^2} = 0,00577 \text{ (См)};$$

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = 0,01667 + 0,00378 + 0,00577 = 0,02622 \text{ (См)}.$$

Реактивні провідності віток та кола:

$$B_1 = 0;$$

$$B_2 = B_{L2} = \frac{X_{L2}}{Z_2^2} = \frac{70}{72,8^2} = 0,01321 \text{ (См)};$$

$$B_3 = B_{C3} = \frac{X_{C3}}{Z_3^2} = \frac{85}{110,1^2} = 0,00701 \text{ (См)};.$$

$$B = B_2 - B_3 = 0,01321 - 0,00701 = 0,0062 \text{ (См)}.$$

Повна провідність кола:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,02622^2 + 0,0062^2} = 0,02694 \text{ (См)}.$$

Коефіцієнт потужності кола:

$$\cos\varphi = \frac{G}{Y} = \frac{0,02622}{0,02694} = 0,9733; \quad \varphi = 13,3^\circ.$$

Повний опір кола і струм:

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{0,02694} = 37,1 \text{ (Ом)};$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{37,1} = 5,93 \text{ (А)}.$$

Векторна діаграма кола зображена на рис. 4.7.

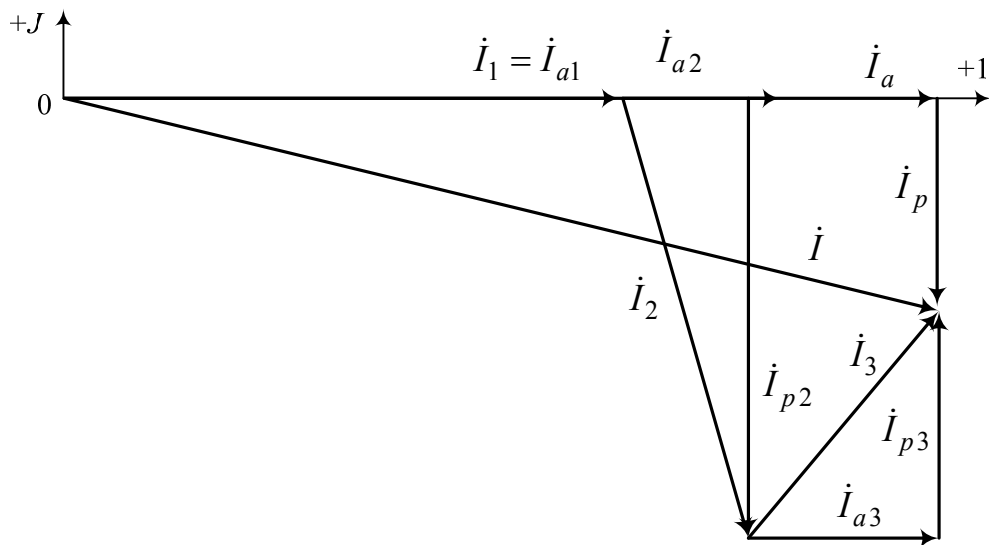


Рисунок 4.7 – Векторна діаграма кола, зображеного на рис. 4.6

## 4.2 Програма роботи

4.2.1 Зібрати схему для дослідження електричного кола з паралельним з'єднанням елементів (рис. 4.8).

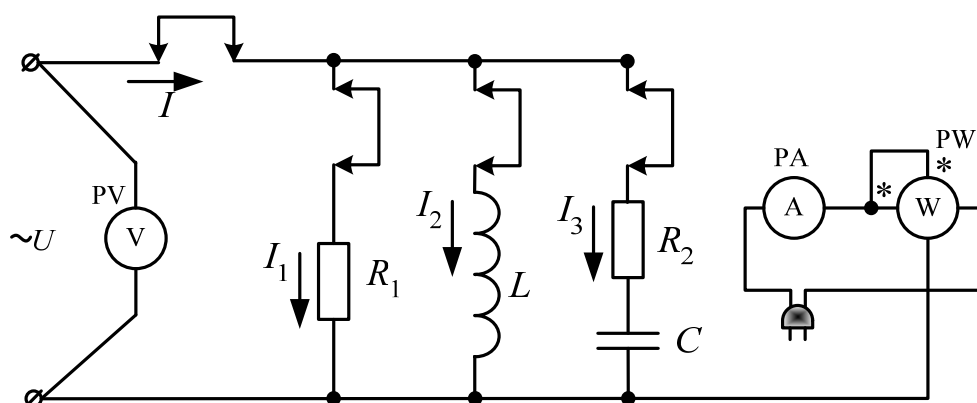


Рисунок 4.8 – Схема для дослідження паралельного з'єднання елементів

4.2.2 Визначити параметри реальної індуктивної котушки  $L$ : повний, активний та реактивний опори. Для цього потрібно поставити заглушку в гнізді нерозгалуженої частини кола, а в вітку з котушкою  $L$  включити вилку та подати напругу на схему (рис. 4.8).

Параметри котушки можна визначити з таких співвідношень:

$$Z_L = \frac{U}{I_L}; \quad R_L = \frac{P}{I_L^2}; \quad X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}.$$

4.2.3 Розрахувати ємність  $C_p$  конденсаторної батареї, при якій в колі виникне резонанс струмів. Умовою резонансу напруг є рівність реактивних провідностей:  $B_L = B_C$ . Тому прийнявши  $Y_C = B_C$ , визначимо

$$C_p = \frac{X_L}{\omega \cdot (R_L^2 + X_L^2)} = \frac{L}{R_L^2 + X_L^2}. \quad (4.11)$$

4.2.4 Подати на схему напругу та провести вимірювання при трьох значеннях ємності, що відповідають:

- 1) неповній компенсації реактивної потужності  $C < C_p$ ;
- 2) повній компенсації реактивної потужності  $C = C_p$ ;
- 3) перекомпенсації реактивної потужності  $C > C_p$ .

Покази приладів занести до табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірювань та розрахунків дослідів

№ досл.	Покази приладів								Розраховані параметри								При- мітка
	$U,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$I,$ А	$P_1,$ Вт	$P_2,$ Вт	$P_3,$ Вт	$I_{a2},$ А	$I_{a3},$ А	$I_{p2},$ А	$I_{p3},$ А	$Q_2,$ ВАр	$Q_3,$ ВАр	$\cos\varphi$	$\varphi^\circ$	
1																	$C < C_p$
2																	$C = C_p$
3																	$C > C_p$

4.2.5 Провести необхідні розрахунки для визначення активних та реактивних складових струму віток, активної та реактивної складової загального струму.

4.2.6 Побудувати векторні діаграми за результатами дослідів.

4.2.7 За результатами дослідів зробити висновки.

### 4.3 Питання для самоконтролю



1. Яке явище називається резонансом струмів та в якому колі воно може виникнути?
2. Яке числове значення має коефіцієнт потужності кола при резонансі?
3. Чому резонанс в паралельному контурі називається резонансом струмів?
4. Який характер (індуктивний чи ємнісний) має повний опір кола при частотах, нижчих за резонансну?
5. Чому в режимі резонансу струмів значення струму в нерозгалуженій ділянці кола найменше?
6. Як практично виявити в колі режим резонансу струмів?

### 4.4 Задачі для самостійного розв'язування

4.4.1 Параметри схеми, зображеної на рис. 4.9, при частоті  $f = 50$  Гц становлять:  $G = 0,3$  См,  $B_C = 1,2$  См,  $B_L = 0,5$  См. Обчислити повну провідність кола за умови, що частоту зменшили вдвічі.

Варіанти відповідей:

- |             |                    |
|-------------|--------------------|
| 1) 1,62 См; | 2) 0,5 См;         |
| 3) 2,7 См;  | 4) 1 См;           |
| 5) 2 См;    | 6) інша відповідь. |

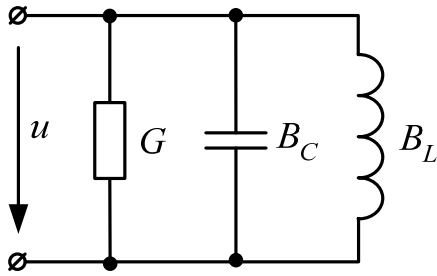


Рисунок 4.9 – До задач 4.4.1, 4.4.2

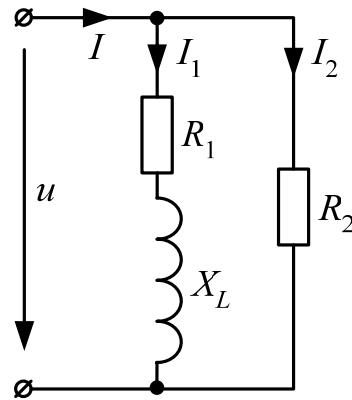


Рисунок 4.10 – До задач 4.4.3, 4.4.4

4.4.2 Обчислити коефіцієнт потужності споживача, зображеного на схемі рис. 4.9, якщо  $G = 6 \text{ См}$ ,  $B_C = 10 \text{ См}$ ,  $B_L = 2 \text{ См}$ .

Варіанти відповідей:

- |  |  |
|--|--|
| 1) $\cos\varphi = 0,445$ ; $\varphi > 0$ ; | 2) $\cos\varphi = 0,8$ ; $\varphi < 0$ ; |
| 3) $\cos\varphi = 0,8$ ; $\varphi > 0$ ;   | 4) $\cos\varphi = 0,6$ ; $\varphi > 0$ ; |
| 5) $\cos\varphi = 0,6$ ; $\varphi < 0$ ;   | 6) інша відповідь.                       |

4.4.3 Для кола, зображеного на схемі рис. 4.10, обчислити струм  $I$ , якщо  $I_1 = 20 \text{ А}$ ,  $I_2 = 10\sqrt{2} \text{ А}$ ,  $R_1 = X_L$ .

Варіанти відповідей:

- |                         |            |
|-------------------------|------------|
| 1) 34 А;                | 2) 5 А;    |
| 3) 24,5 А;              | 4) 31,6 А; |
| 5) обчислити неможливо. |            |

4.4.4 Для кола, зображеного на схемі рис. 4.10, обчислити струм  $I$ , якщо  $I_1 = 10 \text{ А}$ ,  $I_2 = 10 \text{ А}$ ,  $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2} = 2X_L$ .

Варіанти відповідей:

- |                         |            |
|-------------------------|------------|
| 1) 20 А;                | 2) 17,3 А; |
| 3) 19,4 А;              | 4) 14,1 А; |
| 5) обчислити неможливо. |            |

4.4.5 Для схеми, зображеної на рис. 4.11, обчислити комплексне діюче значення струму, якщо  $u = 100\sqrt{2} \sin(314t + 90^\circ) \text{ В}$ ,  $G = 0,03 \text{ См}$ ,  $B_L = 0,06 \text{ См}$ ,  $B_C = 0,1 \text{ См}$ .



Варіанти відповідей:

- |                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| 1) $16,35e^{j36,50}$ А;      | 2) $20e^{j36,50}$ А; |
| 3) $5\sqrt{2} e^{j36,50}$ А; | 4) $5e^{j143,10}$ А; |
| 5) $5e^{j143,10}$ А;         | 6) інша відповідь.   |

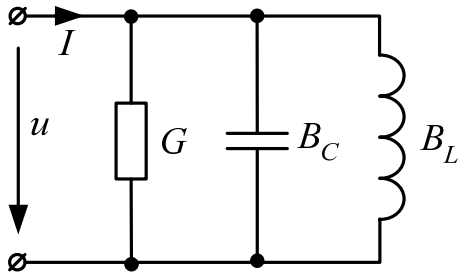


Рисунок 4.11 – До задачі 4.4.5

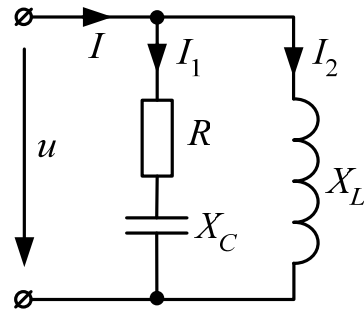


Рисунок 4.12 – До задачі 4.4.6

4.4.6 Для схеми, зображеної на рис. 4.12, обчислити повну провідність кола, якщо  $R = 6$  Ом,  $X_C = 8$  Ом,  $X_L = 10$  Ом.

Варіанти відповідей:

- |               |                    |
|---------------|--------------------|
| 1) 5,84 См;   | 2) 0,19 См;        |
| 3) 0,0632 См; | 4) 0,168 См;       |
| 5) 24 См;     | 6) інша відповідь. |

4.4.7 У колі, зображеному на схемі (рис. 4.13), має місце резонанс струмів. Визначити струм  $I_3$ , якщо  $I_1 = 10$  А,  $I_2 = 20$  А,  $\varphi_2 = 37^\circ$ ,  $\varphi_3 = -30^\circ$ .

Варіанти відповідей:

- |          |                    |
|----------|--------------------|
| 1) 30 А; | 2) -30 А;          |
| 3) 40 А; | 4) 44 А;           |
| 5) 23 А; | 6) інша відповідь. |

4.4.8 У колі синусоїдного струму, зображеному на схемі рис. 4.13, має місце резонанс струмів. Визначити початковий фазовий кут  $\varphi_3$  струму  $I_3$ , якщо  $I_1 = 10$  А,  $\varphi_1 = 53^\circ$ ,  $I_2 = 20$  А,  $\varphi_2 = 37^\circ$ ,  $I_3 = 40$  А.

Варіанти відповідей:

- |                  |                    |
|------------------|--------------------|
| 1) $-53^\circ$ ; | 2) $-90^\circ$ ;   |
| 3) $30^\circ$ ;  | 4) $-30^\circ$ ;   |
| 5) $60^\circ$ ;  | 6) інша відповідь. |

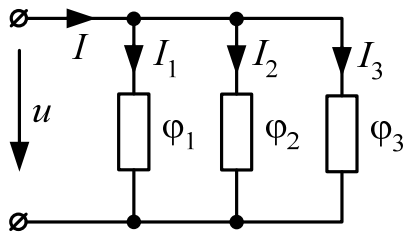


Рисунок 4.13 – До задач  
4.4.7 – 4.4.9

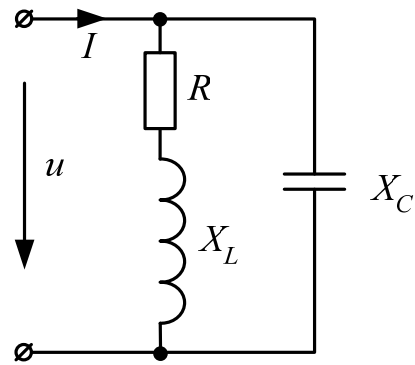


Рисунок 4.14 – До задач  
4.4.10 – 4.4.12

4.4.9 У колі синусоїдного струму, зображеному на схемі рис. 4.13, має місце резонанс струмів. Обчислити струм  $I$ , якщо  $I_1 = 10$  А,  $\varphi_1 = 53^\circ$ ,  $I_2 = 20$  А,  $\varphi_2 = 37^\circ$ ,  $\varphi_3 = -30^\circ$ .

Варіанти відповідей:

- |            |                    |
|------------|--------------------|
| 1) 30 А;   | 2) 40 А;           |
| 3) 22 А;   | 4) 20 А;           |
| 5) 56,6 А; | 6) інша відповідь. |

4.4.10 Для кола, зображеного на схемі рис. 4.14, обчислити  $X_C$  для випадку резонансу струмів, якщо  $X_L = 8$  Ом,  $R = 6$  Ом.

Варіанти відповідей:

- |             |                    |
|-------------|--------------------|
| 1) 12,5 Ом; | 2) 8 Ом;           |
| 3) 10 Ом;   | 4) 14 Ом;          |
| 5) 6 Ом;    | 6) інша відповідь. |

4.4.11 У колі, зображеному на схемі рис. 4.14, обчислити опір  $R$  для випадку резонансу струмів, якщо  $X_C = 12,5$  Ом,  $X_L = 8$  Ом.

Варіанти відповідей:

- |            |                    |
|------------|--------------------|
| 1) 4,5 Ом; | 2) 9,7 Ом;         |
| 3) 6 Ом;   | 4) 12,5 Ом;        |
| 5) 0;      | 6) інша відповідь. |

4.4.12 Для кола, зображеного на схемі рис. 4.14, обчислити  $X_L$  для випадку резонансу струмів, якщо  $X_C = 12,5$  Ом,  $R = 6$  Ом.

Варіанти відповідей:

- |             |                    |
|-------------|--------------------|
| 1) 12,5 Ом; | 2) 8 Ом;           |
| 3) 6 Ом;    | 4) -12,5 Ом;       |
| 5) 6,5 Ом;  | 6) інша відповідь. |

4.4.13 Вказати вираз для визначення миттєвого значення загального струму  $i$  в схемі (рис. 4.15), якщо  $i_1 = 2,5\sin(\omega t + 60^\circ)$  А;  $i_2 = 2,5\sin(\omega t - 60^\circ)$  А.

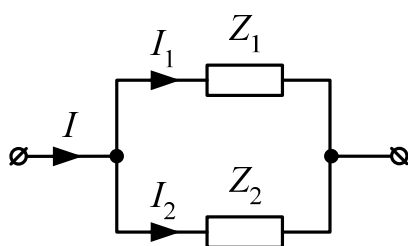


Рисунок 4.15 – До задачі 4.4.13

Варіанти відповідей:

- |   |  |
|---|--|
| 1) $i = 2,5\sin\omega t$ ;              | 2) $i = 2,5\sin(\omega t + 120^\circ)$ ;         |
| 3) $i = 2,5\sin(\omega t + 60^\circ)$ ; | 4) $i = 2,5\sqrt{2}\sin(\omega t + 120^\circ)$ ; |
| 5) $i = 5\sin\omega t$ ;                | 6) інша відповідь.                               |

4.4.14 Визначити комплексні амплітуди струмів схеми рис. 4.15.

Варіанти відповідей:

- |  |  |                                     |
|--|--|-------------------------------------|
| 1) $I_{m1} = 2,5e^{j60}$ А;                  | $I_{m2} = 2,5e^{-j60}$ А;                  | $I_m = 2,5e^{j120}$ А;              |
| 2) $I_{m1} = 2,5e^{j60}$ А;                  | $I_{m2} = 2,5e^{-j60}$ А;                  | $I_m = \sqrt{2} \cdot 2,5e^{j0}$ А; |
| 3) $I_{m1} = \sqrt{2} \cdot 2,5e^{j60}$ А;   | $I_{m2} = \sqrt{2} \cdot 2,5e^{-j60}$ А;   | $I_m = 5e^{j0}$ А;                  |
| 4) $I_{m1} = 2,5e^{j60}$ А;                  | $I_{m2} = 2,5e^{-j60}$ А;                  | $I_m = 2,5$ А;                      |
| 5) $I_{m1} = \frac{2,5}{\sqrt{2}}e^{j60}$ А; | $I_{m2} = \frac{2,5}{\sqrt{2}}e^{-j60}$ А; | $I_m = \frac{5}{\sqrt{2}}$ А.       |

#### 4.5 Вправи для закріплення матеріалу

Промодельємо схему, розраховану в прикладі 4.1. Для цього насамперед потрібно визначити значення величин індуктивного  $X_{L2}$  та ємнісного  $X_{C3}$  опорів. В результаті проведення розрахунків за формулами (3.4) та (3.12), отримуємо  $L = 0,223$  Гн,  $C = 37,47$  мкФ.

Як видно зі схеми рис. 4.16, числові значення розрахунків та моделювання практично збігаються.

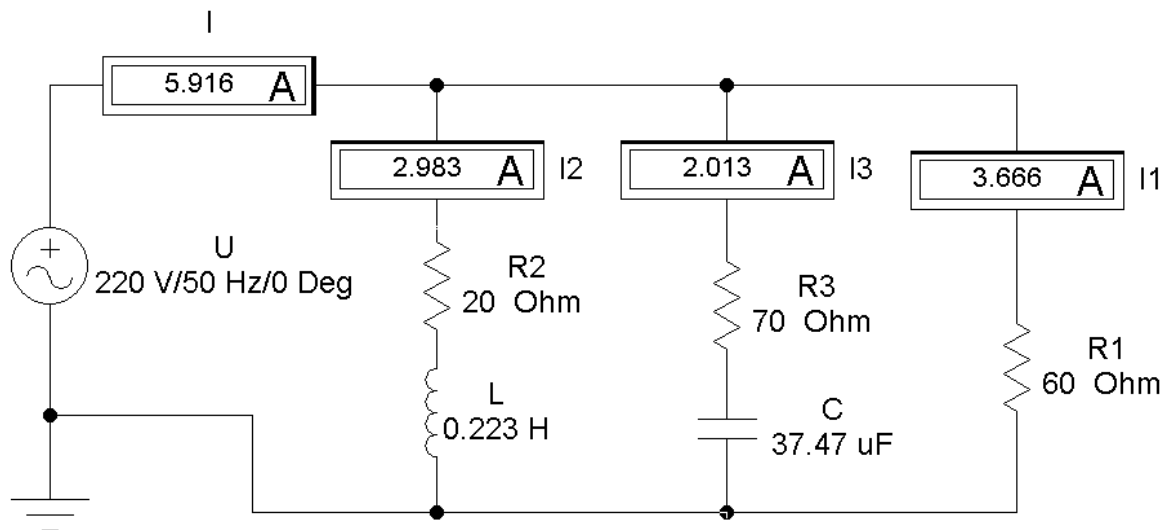


Рисунок 4.16 – Результат моделювання схеми, розрахованої в прикладі 4.1

Ускладнимо задачу: знайдемо індуктивність, при якій в колі настане резонанс струмів. Враховуючи те, що умовою резонансу є рівність реактивних провідностей ( $B_2 = B_3$ ), то при заданих  $f$  і  $C$  знайдемо, що

$$B_3 = \frac{X_{C3}}{Z_3^2} = \frac{85 \cdot 10^{-6}}{110,114^2} = 0,00701 \text{ (См)}.$$

Індуктивність, при якій настає резонанс, можна знайти із співвідношення:

$$B_3 = B_2 = \frac{X_{L2\text{ рез}}}{Z_{2\text{ рез}}} = \frac{X_{L2\text{ рез}}}{R_2^2 + X_{L2\text{ рез}}^2},$$

розв'язавши яке, отримуємо резонансні індуктивності:  $L_{2\text{ рез}1} = 0,445$  Гн;  $L_{2\text{ рез}2} = 0,0091$  Гн.

Крім того змодельюємо схему з деякими змінами: вітку з чисто активним навантаженням (з  $R_1$ ) увімкнемо послідовно з паралельно увімкненими вітками з ємнісним та індуктивним характером навантаження (пропонується схему скласти самостійно).

Для практичних застосувань великий інтерес становить область частот поблизу резонансної ( $\Delta f = f - f_{\text{рез}}$ , де  $f$  – поточне значення частоти). Тому наведемо лише фазо-частотну характеристику даного контуру (рис. 4.17).

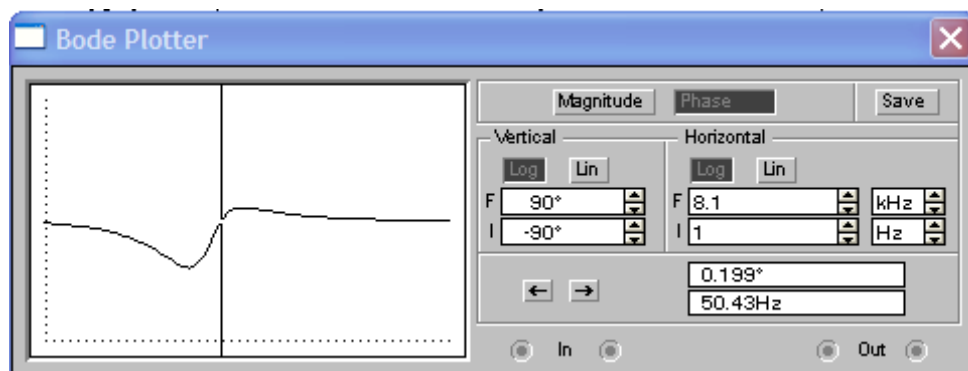


Рисунок 4.17 – Фазо-частотна характеристика паралельного коливального контуру при  $L_{2\text{ рез}1} = 0,445$  Гн

При  $f - f_{\text{рез}}$  фазовий кут рівний нулю, однак при незначному відхиленні частоти від резонансної в будь-яку сторону, спостерігатиметься різка зміна фази як в сторону збільшення, так і в сторону зменшення. Крутість перехідної ділянки залежить від добротності контуру (при більшій добротності – більша крутизна), а ширина визначає смугу пропускання.

**Добротність коливального контуру** – безрозмірна величина

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U},$$

яка показує, в скільки разів напруга на індуктивності  $U_L$  або на ємності  $U_C$  перевищує вхідну напругу  $U$  в момент резонансу.

В результаті моделювання схеми з другою резонансною індуктивністю  $L_{2\text{рез}2} = 0,0091$  Гн, як видно з рис. 4.18, контур має меншу добротність.

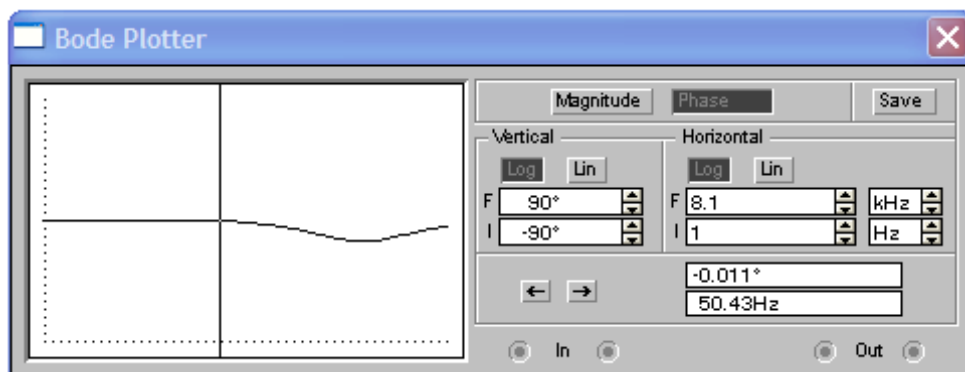


Рисунок 4.18 – Фазо-частотна характеристика паралельного коливального контуру при  $L_{2\text{рез}2} = 0,0091$  Гн

## Лабораторна робота №5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ ДЖЕРЕЛА ТА СПОЖИВАЧІВ ЗА СХЕМОЮ „ЗІРКА”

📁 **Мета роботи** Дослідити режими роботи трифазної три- і чотирипроводнової системи з симетричним та несиметричним навантаженням, а також з обривом фази. Набути навичок вимірювання параметрів трифазної системи і побудови векторних діаграм.

#### 5.1 Основні теоретичні положення

*Трифазну систему* можна подати як сукупність трьох однофазних кіл синусоїдного змінного струму однакової частоти зі спільним джерелом енергії, причому ці однофазні кола електрично зв'язані між собою й називаються *фазами* [3-9].

Якщо в трифазній системі діють електрорушійні сили, рівні за величиною та зсунуті за фазою на  $120^\circ$ , а повні опори всіх трьох фаз як за величиною, так і за характером однакові, то такий режим називається *симетричним*. Невиконання однієї із зазначених умов або обох разом є ознакою *несиметричного режиму*. Несиметричний режим створюється, як правило, за рахунок нерівномірного навантаження фаз.

В трифазних колах обмотки генератора (джерела живлення) і споживачів електричної енергії можуть з'єднуватися „зіркою” або „трикутником”. В даній роботі розглядаємо перший варіант з'єднання.

Електрично незв'язану трифазну шестипроводову систему (рис. 5.1) можна замінити чотирипроводновою системою, що містить нейтральний провід (рис. 5.2). При цьому спільний провід такої системи називається *нульовим (нейтральним) проводом*, а спільні точки  $0$  і  $0'$  – *нульовими (нейтральними) точками*. Тоді інші три проводи системи називаються *лінійними проводами*.

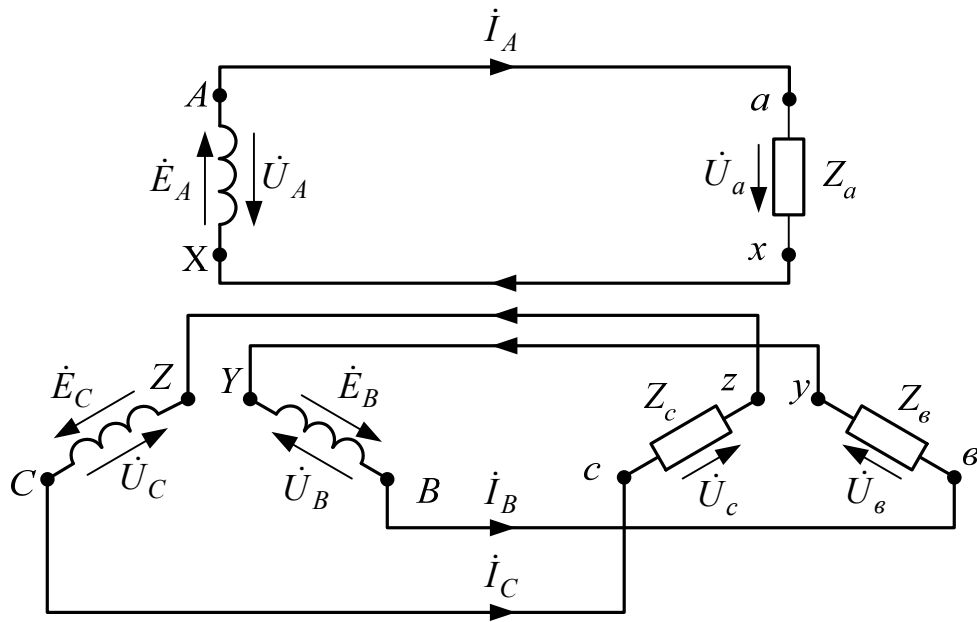


Рисунок 5.1 – Електрично незв’язана трифазна система

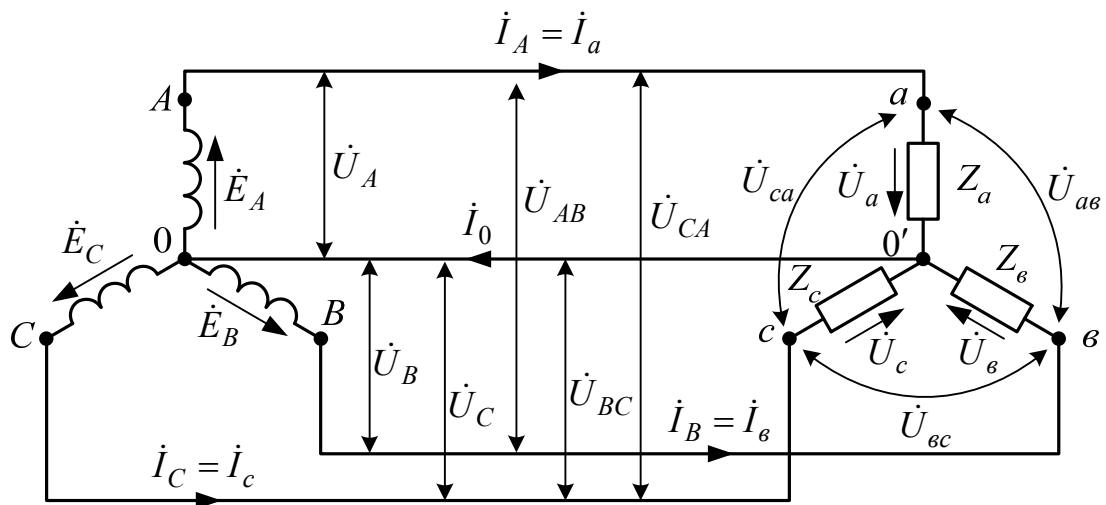


Рисунок 5.2 – З’єднання трифазної системи зіркою з нульовим проводом

В трифазних системах розрізняють фазні та лінійні параметри. Перші відносяться до фазних обмоток генератора або до фаз приймача, другі – до проводів лінії.

**Фазна напруга  $U_\phi$**  – напруга в генераторі між початком і кінцем фази його обмотки, на лінії – між нульовим і будь-яким лінійним проводом чотирьохпроводової системи, в приймачі – на окремому фазному приймачі. На рис. 5.2 фазними напругами є  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C, \dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ . Для симетричної



системи напруг генератора та споживачів їх векторне відображення показано на рис. 5.3, а), рис. 5.4.

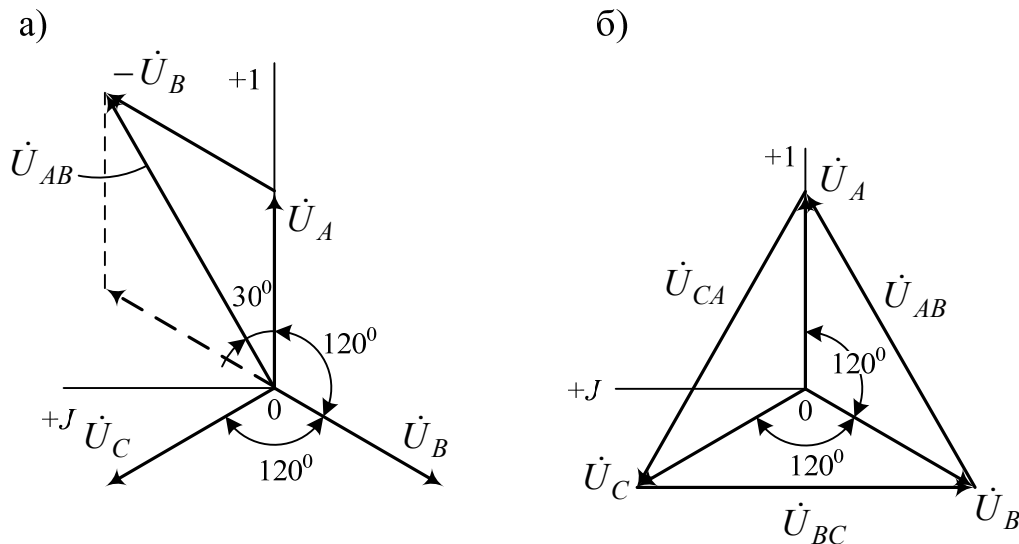


Рисунок 5.3 – Векторні діаграми напруг при з'єднанні генератора „зіркою”

**Лінійна напруга  $U_l$**  – напруга між кінцями будь-яких двох фаз генератора або приймача, а на лінії – між будь-якими двома лінійними проводами. На рис. 5.2 лінійними напругами є  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}, \dot{U}_{av}, \dot{U}_{vc}, \dot{U}_{ca}$  (рис. 5.3, б), рис. 5.4).

Співвідношення між лінійними та фазними напругами при підключенні генератора „зіркою” в загальному вигляді можуть бути записані такими виразами:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\tag{5.1}$$

Для споживачів, з'єднаних за схемою „зірка”, співвідношення (5.1) справедливі також, потрібно лише змінити регістр літер в індексі (замість великих літер потрібно поставити маленькі).

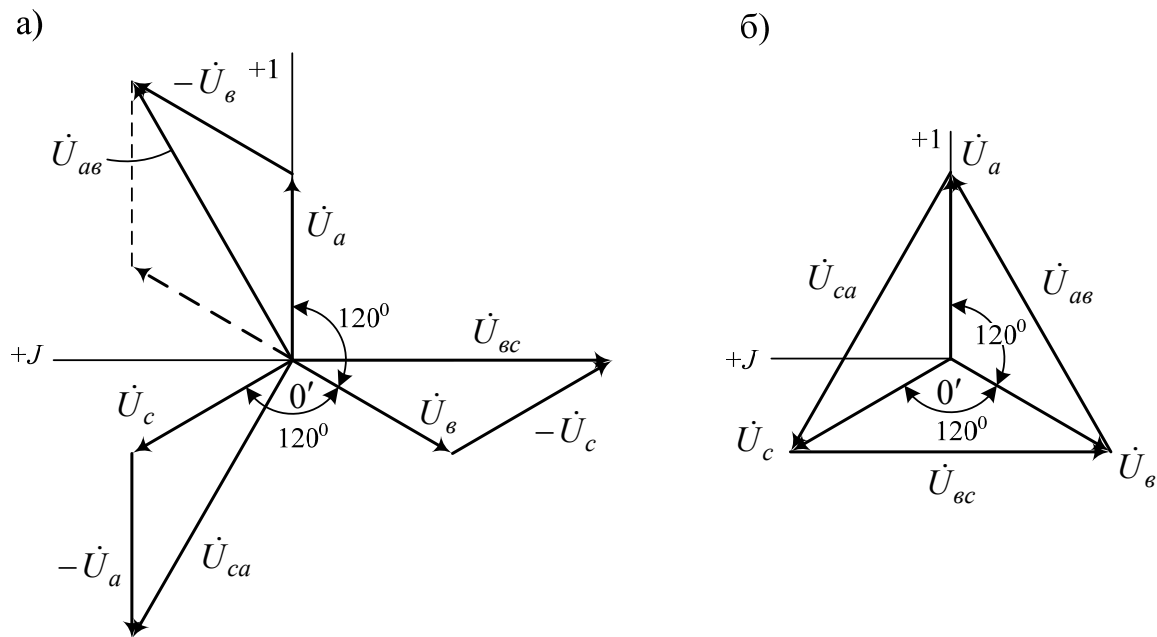


Рисунок 5.4 – Векторні діаграми напруг споживачів при з'єднанні їх „зіркою”

Співвідношення між лінійною та фазною напругою для трифазної симетричної системи, виходячи із рис. 5.3, а), можна записати у вигляді:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}. \quad (5.2)$$

**Фазний струм**  $I_{ф}$  – струм в фазі (генератора або споживача). Фазні струми, як і фазні напруги, позначаються за індексом своєї фази:  $I_A, I_B, I_C, I_a, I_b, I_c$  (рис. 5.2).

**Лінійний струм**  $I_{л}$  – струм в будь-якому лінійному проводі. Його позначення аналогічне до фазного струму.

При з'єднанні „зіркою” послідовно з фазою генератора вмикається відповідна фаза споживача (рис. 5.2). Тому виконується умова

$$I_{л} = I_{ф}. \quad (5.3)$$

**Струм нульового проводу**  $I_0$  – струм, що протікає в нульовому проводі. Він визначається за першим законом Кірхгофа:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (5.4)$$

Його можна визначити і графічним способом шляхом додавання векторів струмів кожної з фаз (рис. 5.5). При збільшенні несиметрії в навантаженні струм в нульовому проводі буде збільшуватися, а тому буде збільшуватися і несиметрія фазних напруг споживачів. При цьому точка  $0'$  на векторній діаграмі буде зміщуватися відносно точки  $0$  в ту чи іншу сторону залежно від навантаження (рис. 5.6). Різниця потенціалів між нульовими точками генератора  $0$  та споживача  $0'$  називається **напругою зсуву нейтралі**:

$$U_{00'} = \varphi_{0'} - \varphi_0, \quad (5.5)$$

де  $\varphi_{0'}$ ,  $\varphi_0$  – відповідно потенціали нульових точок споживача та генератора.

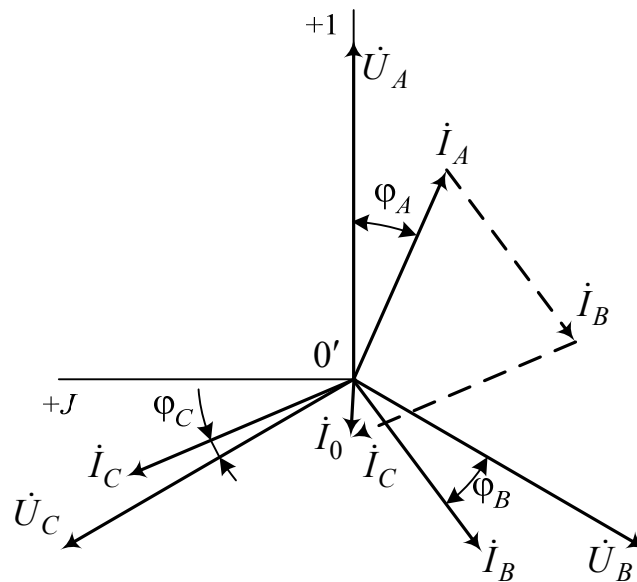


Рисунок 5.5 – Знаходження струму в нульовому проводі графічним способом

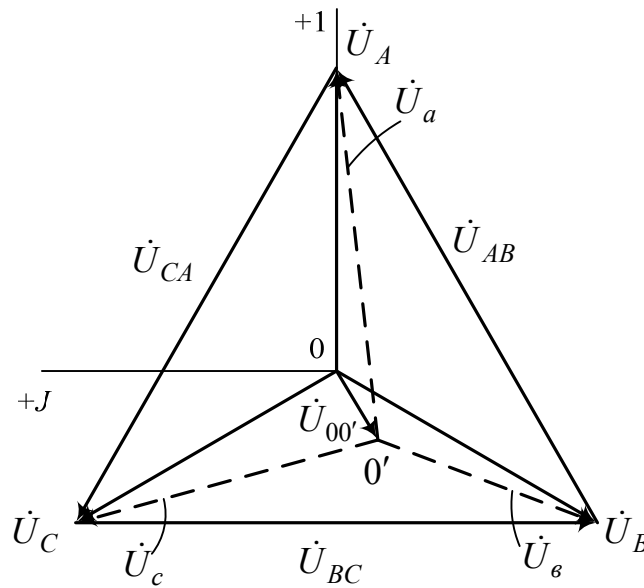


Рисунок 5.6 – Векторна діаграма несиметричної трифазної мережі, з'єднаної „зіркою”

Напругу зсуву нейтралі також можна визначити із виразу:

$$U_{00'} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}, \quad (5.6)$$

де  $Y_A, Y_B, Y_C$  – комплексні провідності фаз навантаження (з врахуванням опорів лінії);

$Y_0$  – комплексна провідність нульового проводу з комплексним опором  $Z_0$ :

$$Y_A = \frac{1}{Z_A}; \quad Y_B = \frac{1}{Z_B}; \quad Y_C = \frac{1}{Z_C}; \quad Y_0 = \frac{1}{Z_0}. \quad (5.7)$$

Для симетричного режиму навантаження напруга зсуву нейтралі рівна нулю, а тому і струм в нульовому проводі також буде рівним нулю (рис. 5.7).

Напругу зсуву нейтралі можна визначити і графічним методом. Для цього з вершин трикутника лінійних напруг  $a, b, c$  (рис. 5.8) роблять циркулем відмітки відповідно до фазних напруг  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ . Точка

перетину відміток дасть точку  $0'$ , сполучивши яку з точкою  $0$ , отримаємо вектор напруги зміщення нейтралі  $\dot{U}_{00'}$ .

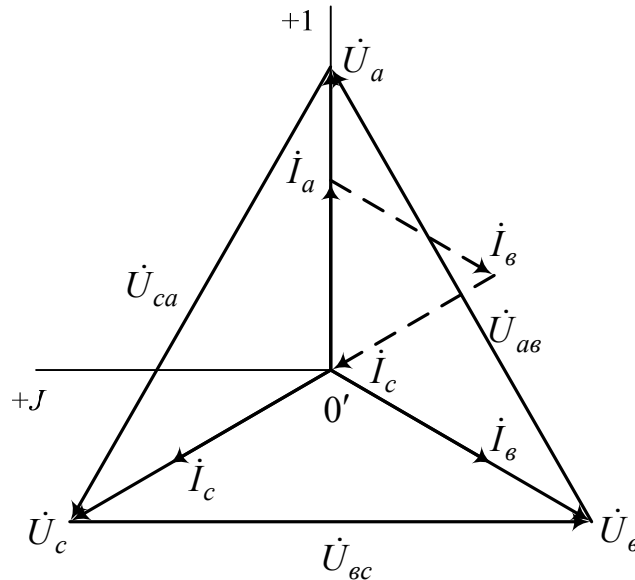


Рисунок 5.7 – Векторна діаграма трифазної симетричної мережі, з'єднаної „зіркою”

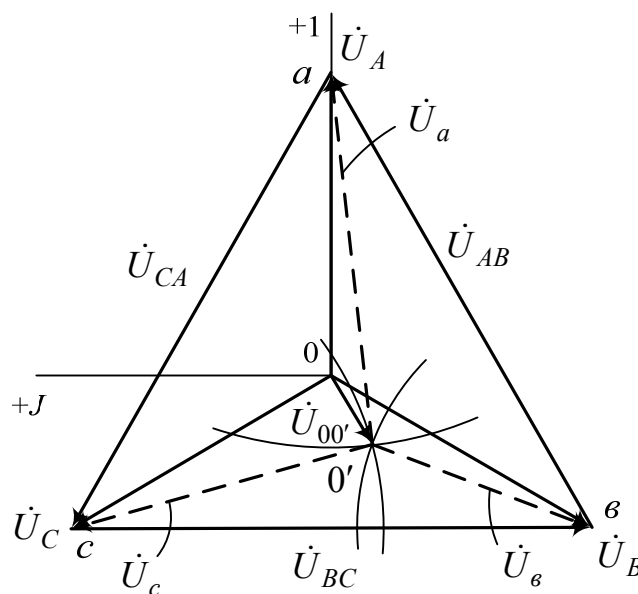


Рисунок 5.8 – До визначення напруги зсуву нейтралі графічним методом

Фазний струм можна визначити з виразу

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}}, \quad (5.6)$$

де  $Z_{\phi}$  – фазний опір.

В символічній формі фазний струм визначається як

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi} e^{j\varphi}}{Z_{\phi}}, \quad (5.7)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву фаз між напругою та струмом (рис. 5.5), який можна визначити за одним із наведених співвідношень:

$$\varphi = \arccos \frac{R_{\phi}}{Z_{\phi}}, \quad (5.8)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}},$$

де  $R_{\phi}$ ,  $X_{\phi}$  – відповідно активний та реактивний фазні опори.

Через напругу зсуву нейтралі струми в фазах визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{U}_A - \dot{U}_{00'}) \cdot Y_A; \\ \dot{I}_B &= (\dot{U}_B - \dot{U}_{00'}) \cdot Y_B; \\ \dot{I}_C &= (\dot{U}_C - \dot{U}_{00'}) \cdot Y_C; \\ \dot{I}_0 &= \dot{U}_{00'} \cdot Y_0. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Одним із випадків несиметричного навантаження в трифазній чотирипроводовій системі, з'єднаній „зіркою”, є обрив одного із фазних проводів. В цьому випадку напруга на інших фазах споживача залишається незмінною, незмінними в цьому випадку залишаються і струми. Змінюється лише поняття величини струму нульового проводу. В розглянутому випадку несиметричного навантаження при обриві фази  $A$

векторна діаграма буде мати вигляд, як зображено на рис. 5.9. При цьому струм нульового проводу  $\dot{I}_0 = \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

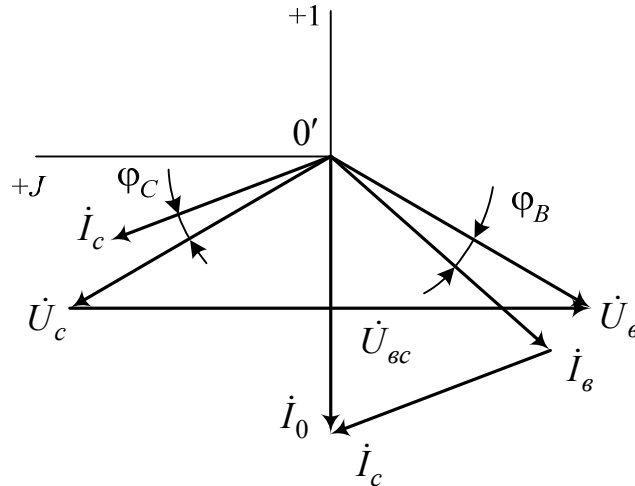


Рисунок 5.9 – Векторна діаграма трифазної мережі, з'єднаної „зіркою”, при обриві фази  $A$

Активну потужність трифазної мережі можна знайти як суму активних потужностей всіх трьох фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C, \quad (5.10)$$

де  $P_A, P_B, P_C$  – відповідно потужності фаз  $A, B, C$ .

При симетричному навантаженні вона визначається як

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos\varphi,$$

а при несиметричному навантаженні –

$$P = U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C. \quad (5.11)$$

Аналогічно визначається і реактивна потужність:

– при симетричному навантаженні:

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin\varphi = \sqrt{3}U_L I_L \sin\varphi; \quad (5.12)$$

– при несиметричному навантаженні:

$$Q = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C. \quad (5.13)$$

Повна потужність трифазної мережі визначається як

$$S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_l I_l \quad (5.14)$$

або ж як

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (5.15)$$

❶ **Приклад 5.1.** До чотирипроводової трифазної мережі з лінійною напругою  $U_l = 380$  В підключені „зіркою” три групи ламп розжарювання з номінальною напругою 220 В (рис. 5.10). Опори груп ламп, з’єднаних паралельно в кожній групі, відповідно становлять  $R_a = 11$  Ом,  $R_b = 20$  Ом,  $R_c = 22$  Ом. Визначити напруги й струми в усіх групах ламп при наявності нульового проводу і при його обриві. Опором проводів ліній знехтувати.

**Розв’язування.** При наявності нейтрального проводу і нерівномірному навантаженні фазні напруги системи практично можна вважати симетричними:

$$U_\phi = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220 \text{ (В)}.$$

Визначаємо струми в фазах:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{220}{11} = 20 \text{ (А)};$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{220}{20} = 11 \text{ (А)};$$



$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{220}{22} = 10 \text{ (A)}.$$

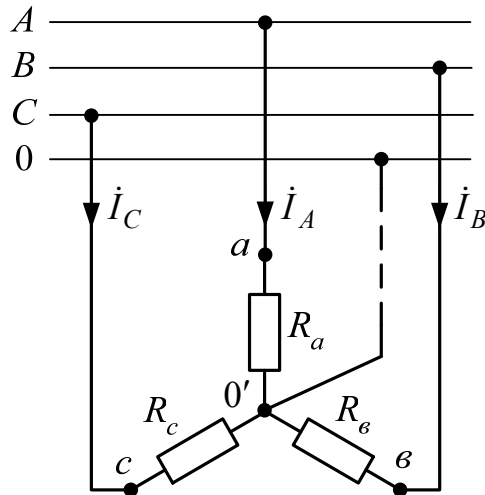


Рисунок 5.10 – Схема до прикладу 5.1

Знаходимо струм в нульовому проводі відповідно до (5.4):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(I_0) &= I_A + I_B \cos 120^\circ + I_C \cos 120^\circ = \\ &= 20 + 11 \cdot (-0,5) + 20 \cdot (-0,5) = 4,5 \text{ (A)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(I_0) &= 0 - I_B \sin 120^\circ + I_C \sin 120^\circ = \\ &= -11 \cdot 0,866 + 20 \cdot 0,866 = 7,794 \text{ (A)}; \end{aligned}$$

$$I_0 = \sqrt{[\operatorname{Re}(I_0)]^2 + [\operatorname{Im}(I_0)]^2} = \sqrt{4,5^2 + 7,794^2} = 9 \text{ (A)}.$$

Комплексні фазні напруги до обриву фаз:

$$\dot{U}_A = 220e^{j0} = 220 \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_B = 220e^{-j120^\circ} = -110 - j190,53 \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_C = 220e^{j120^\circ} = -110 + j190,53 \text{ (В)}.$$

Комплексні провідності фаз навантаження, відповідно, рівні

$$Y_A = \frac{1}{Z_A} = \frac{1}{11} = 0,091 \text{ (См)};$$

$$Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ (См)};$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} = \frac{1}{22} = 0,045 \text{ (См)}.$$

Після обриву нульового проводу системи  $Y_0 = 0$ , тому напруга зсуву нейтралі буде рівною

$$\begin{aligned} U_{00'} &= \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} = \\ &= \frac{220 \cdot 0,091 + (-110 - j190,53) \cdot 0,05 + (-110 + j190,53) \cdot 0,045}{0,091 + 0,05 + 0,045} = \\ &= \frac{9,57 - j0,0953}{0,186} = 51,45 - j5,124 = 51,7e^{j5,7^\circ} \text{ (В)}, \end{aligned}$$

а струми в фазах –

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= (\dot{U}_A - \dot{U}_{00'}) \cdot Y_A = [220 - (51,45 - j5,124)] \cdot 0,091 = \\ &= 15,34 + j0,47 = 15,35e^{j1,8^\circ} \text{ (А)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= (\dot{U}_B - \dot{U}_{00'}) \cdot Y_B = [-110 - j190,53 - (51,45 - j5,124)] \cdot 0,05 = \\ &= -8,07 - j9,27 = 12,29e^{j131^\circ} \text{ (А)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= (\dot{U}_C - \dot{U}_{00'}) \cdot Y_C = [-110 + j190,53 - (51,45 - j5,124)] \cdot 0,045 = \\ &= -7,27 + j8,8 = 11,41e^{j50,4^\circ} \text{ (А)}. \end{aligned}$$

Щоб переконатися у правильності розрахунків, потрібно додати всі три струми (результатом повинен бути нуль).

Фазні напруги несиметричного навантаження без нульового проводу:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{00'} = 220 - (51,45 - j5,124) =$$

$$168,55 + j5,124 = 168,6e^{j1,7^\circ} \text{ (В);}$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{00'} = -110 - j190,53 - (51,45 - j5,124) =$$

$$= -161,45 - j185,41 = 245,8e^{-j131^\circ} \text{ (В);}$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{00'} = -110 + j190,53 - (51,45 - j5,124) =$$

$$= -161,45 + j195,65 = 253,7e^{j129,5^\circ} \text{ (В).}$$

Векторна діаграма для даної системи подана на рис. 5.11.

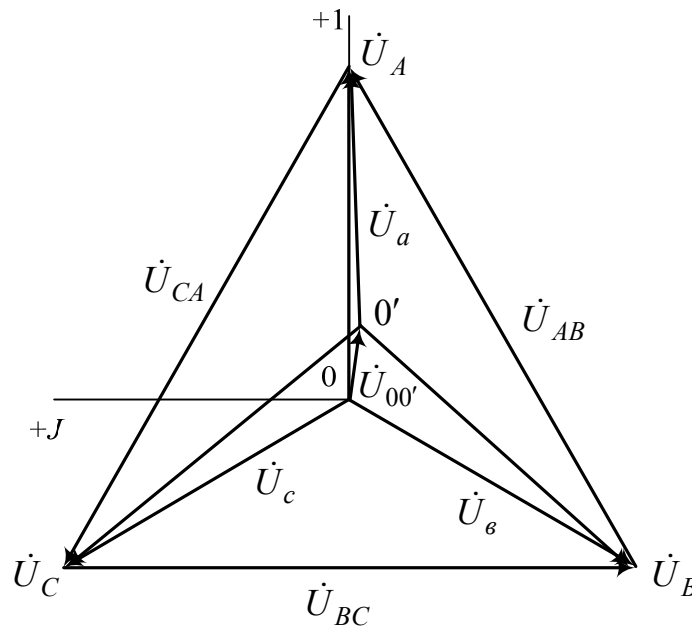


Рисунок 5.11 – Векторна діаграма до прикладу 5.1

Як видно з розрахунків та діаграми, обрив нульового проводу приводить до збільшення напруги на лампах фаз *B* і *C*, а лампи фази *A* будуть живитися напругою, меншою за номінальну.

## 5.2 Програма роботи

5.2.1 Ознайомитися з елементною базою та електричними вимірювальними приладами, які використовуються при проведенні дослідів.

5.2.2 Скласти схему, зображену на рис. 5.12.

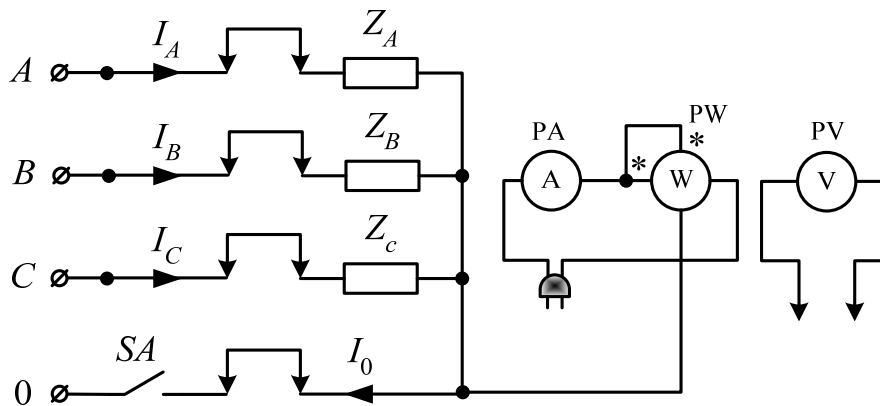


Рисунок 5.12 – Схема для проведення дослідів

5.2.3 Дослід симетричного навантаження провести при вмиканні в фази  $A$ ,  $B$ ,  $C$  резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Результати вимірювань занести до табл. 5.1 (в рядки „симетричний режим”).

5.2.4 Дослід несиметричного навантаження 1 провести при вмиканні в фазу  $A$  опору  $R_1$ , в фазу  $B$  – двох паралельно з’єднаних опорів  $R_2$  і  $R_4$ , а в фазу  $C$  – двох послідовно з’єднаних опорів  $R_3$  і  $R_5$ . Результати дослідів занести до табл. 5.1 (в рядки „несиметричний режим 1”).

*Примітка.* Опори  $R_1 - R_5$  набираються на панелі стенду.

5.2.5 Дослід несиметричного навантаження 2 провести при вмиканні в фазу  $A$  опору  $R_1$ , в фазу  $B$  – котушки індуктивності  $L$ , в фазу  $C$  – опору  $R_3$  та ємності  $C$ . Результати дослідів занести до табл. 5.1 (в рядки „несиметричний режим 2”).

5.2.6 Дослід обриву лінійного проводу провести при обриві лінійного проводу з несиметричним навантаженням 2. Результати дослідів занести до табл. 5.2 (в рядки „обрив лінійного проводу”).

5.2.7 За результатами дослідів зробити висновки.

Таблиця 5.1 – Експериментальні та розрахункові дані дослідження трифазної мережі, з'єднаної в „зірку”

Режим навантаження	Тип мережі	Результати вимірювань															Результати обчислень (з векторної діаграми)									
		$U_a$ В	$U_e$ В	$U_c$ В	$U_{ав}$ В	$U_{ес}$ В	$U_{са}$ В	$U_{00'}$ В	$I_a$ А	$I_e$ А	$I_c$ А	$I_0$ А	$P_a$ Вт	$P_e$ Вт	$P_c$ Вт	$R_a$ Ом	$X_a$ Ом	$R_e$ Ом	$X_e$ Ом	$R_c$ Ом	$X_c$ Ом	$I_0$ А	$U_{00'}$ В			
Симетричний режим	чотири-проводова																									
	три-проводова																									
Несиметричний режим 1	чотири-проводова																									
	три-проводова																									
Несиметричний режим 2	чотири-проводова																									
	три-проводова																									
Обрив лінійного проводу	чотири-проводова																									
	три-проводова																									

### 5.3 Питання для самоконтролю



1. Дати означення багатофазної системи та фази в багатофазній системі.
2. Дати означення трифазної системи та фази.
3. Яке з'єднання називається „зіркою” та які особливості такого з'єднання?
4. Як будується векторна діаграма для напруг і струмів при з'єднанні „зірка”?
5. Навести приклад графоаналітичного методу розрахунку трифазного чотирипроводового кола з нульовим проводом.
6. Яку роль відіграє нульовий провід в чотирипроводовій системі?
7. Як змінюється напруга на фазах споживача при обриві нульового проводу?
8. Що таке напруга зсуву нейтралі і як вона визначається?
9. Режими роботи системи при обриві лінійного проводу з нульовим і без нульового проводу.
10. Як вимірюються потужності в колах трифазного струму?

### 5.4 Задачі для самостійного розв'язування

5.4.1 Яка з наведених нижче систем ЕРС є симетричною?

Варіанти відповідей:

$$1) \begin{aligned} e_1 &= 127\sin 314t, & e_2 &= 127\sin(2 \cdot 314t), \\ e_3 &= 380\sin(100t + 120^\circ); \end{aligned}$$

$$2) \begin{aligned} e_1 &= 380\sin 100t, & e_2 &= 380\sin(100t - 120^\circ), \\ e_3 &= 220\sqrt{3}\sin(400t + 120^\circ); \end{aligned}$$

$$3) \begin{aligned} e_1 &= 220\sin 400t, & e_2 &= 220\sqrt{2}\sin(400t - 120^\circ), \\ e_3 &= 220\sqrt{3}\sin(400t + 120^\circ); \end{aligned}$$

$$4) e_1 = 40\sin 600t, \quad e_2 = 40\sqrt{2}\sin(600t - 240^\circ),$$

$$e_3 = \frac{40}{\sqrt{2}} \sin(600t + 120^\circ).$$

5.4.2 Вказати співвідношення між лінійними і фазними напругами та струмами симетричного трифазного споживача при з'єднанні „зіркою”.

Варіанти відповідей:

$$1) U_l = U_\phi, \quad I_l = \sqrt{3} I_\phi;$$

$$2) U_l = \sqrt{3} U_\phi, \quad I_l = I_\phi;$$

$$3) U_\phi = \sqrt{3} U_l, \quad I_\phi = I_l;$$

$$4) U_\phi = \sqrt{2} U_l, \quad I_\phi = \sqrt{2} I_l;$$

$$5) U_l = \sqrt{2} U_\phi, \quad I_l = \sqrt{2} I_\phi.$$

5.4.3 Симетричний трифазний приймач, з'єднаний в „зірку”, живиться від трифазної мережі з лінійною напругою  $U$ . Визначити лінійний струм, якщо опір фази приймача рівний  $Z$ .

Варіанти відповідей:

$$1) I = \frac{U}{Z}; \quad 2) I = \frac{\sqrt{3}U}{Z};$$

$$3) I = \frac{U}{\sqrt{3}Z}; \quad 4) I = 0;$$

5) інша відповідь.

5.4.4 В чотирипроводову трифазну мережу з лінійною напругою 0,4 кВ увімкнені „зіркою” три групи ламп розжарювання з номінальною напругою 220 В. Визначити:

а) фазні і лінійні струми в навантаженні;

б) струм в нульовому проводі;

в) потужність, що споживається з мережі.

В фазі  $A$  увімкнено 10 ламп, номінальна потужність кожної з яких становить 100 Вт, в фазі  $B$  – 51 лампа по 60 Вт, в фазі  $C$  – 20 ламп по 25 Вт.

Варіанти відповідей:

$$1) I_A = 4,78 \text{ A}, \quad I_B = 4,3 \text{ A}, \quad I_C = 2,39 \text{ A},$$

- |    |                         |                         |                         |
|----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|    | $I_0 = 2,19 \text{ A,}$ | $P = 2,65 \text{ кВт;}$ |                         |
| 2) | $I_A = 4,36 \text{ A,}$ | $I_B = 5,2 \text{ A,}$  | $I_C = 3,42 \text{ A,}$ |
|    | $I_0 = 1,8 \text{ A,}$  | $P = 2,02 \text{ кВт;}$ |                         |
| 3) | $I_A = 3,4 \text{ A,}$  | $I_B = 5,1 \text{ A,}$  | $I_C = 1,98 \text{ A,}$ |
|    | $I_0 = 2,42 \text{ A,}$ | $P = 2,95 \text{ кВт;}$ |                         |
| 4) | $I_A = 4,78 \text{ A,}$ | $I_B = 4,3 \text{ A,}$  | $I_C = 2,25 \text{ A,}$ |
|    | $I_0 = 1,91 \text{ A,}$ | $P = 2,4 \text{ кВт.}$  |                         |

### 5.5 Вправи для закріплення матеріалу

Промодельємо схему з прикладу 5.1 (рис. 5.10). В Electronics Workbench вона матиме вигляд рис. 5.13 (з нульовим проводом) та рис. 5.14 (без нульового проводу). Як бачимо результати моделювання збігаються із розрахунковими.

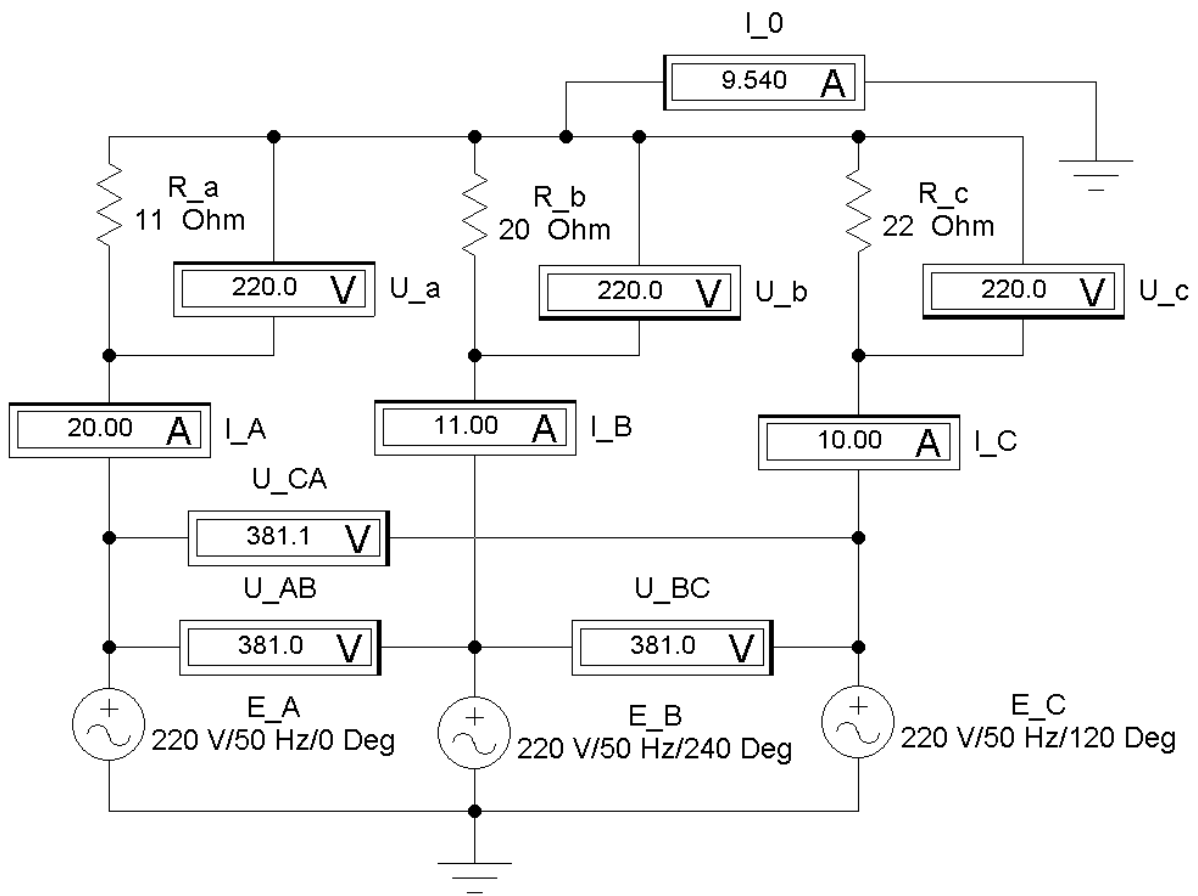


Рисунок 5.13 – Схема до прикладу 5.1 в Electronics Workbench з нульовим проводом



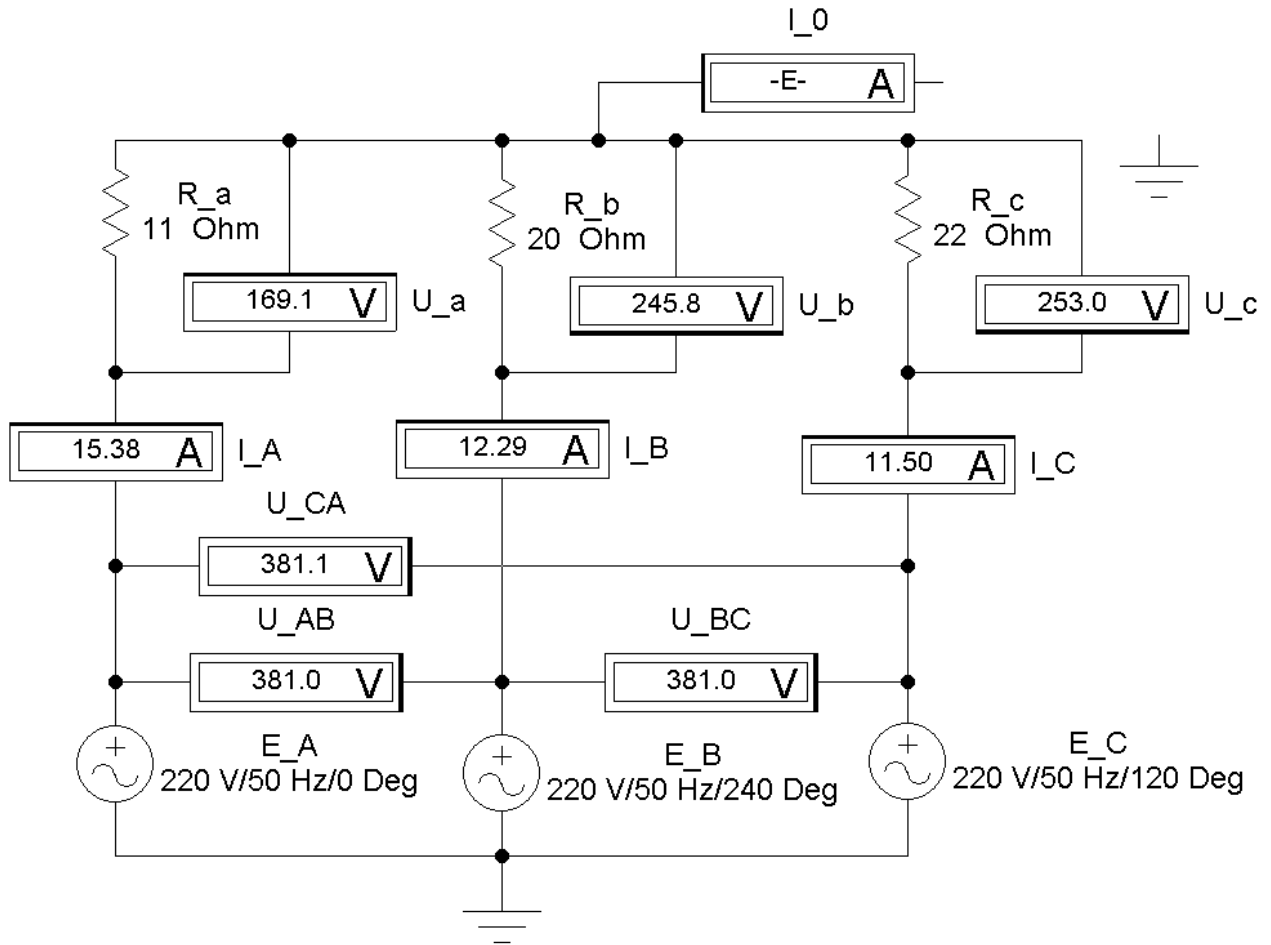


Рисунок 5.14 – Схема до прикладу 5.1 в Electronics Workbench  
без нульового проводу

При такому режимі струми визначатимуться співвідношеннями:

$$I_B = \frac{U_{\text{л}}}{R_b} = \frac{380}{20} = 19 \text{ (A)};$$

$$I_C = \frac{U_{\text{л}}}{R_c} = \frac{380}{22} = 17,3 \text{ (A)};$$

$$\begin{aligned} I_A &= \sqrt{(I_B \cos 60^\circ - I_C \cos 60^\circ)^2 + (I_B \sin 60^\circ + I_C \sin 60^\circ)^2} = \\ &= \sqrt{(19 \cdot 0,5 - 17,3 \cdot 0,5)^2 + (19 \cdot 0,866 + 17,3 \cdot 0,866)^2} = 31,5 \text{ (A)}. \end{aligned}$$

Дослідимо схему без нульового проводу при короткому замиканні в фазі А.

Такі струми є неприпустимими для даного навантаження, тому всі лампи швидко згорять із-за того, що напруги на них значно перевищують номінальні значення.

Перевірити розрахунки можна за допомогою схеми, зображеної на рис. 5.15.

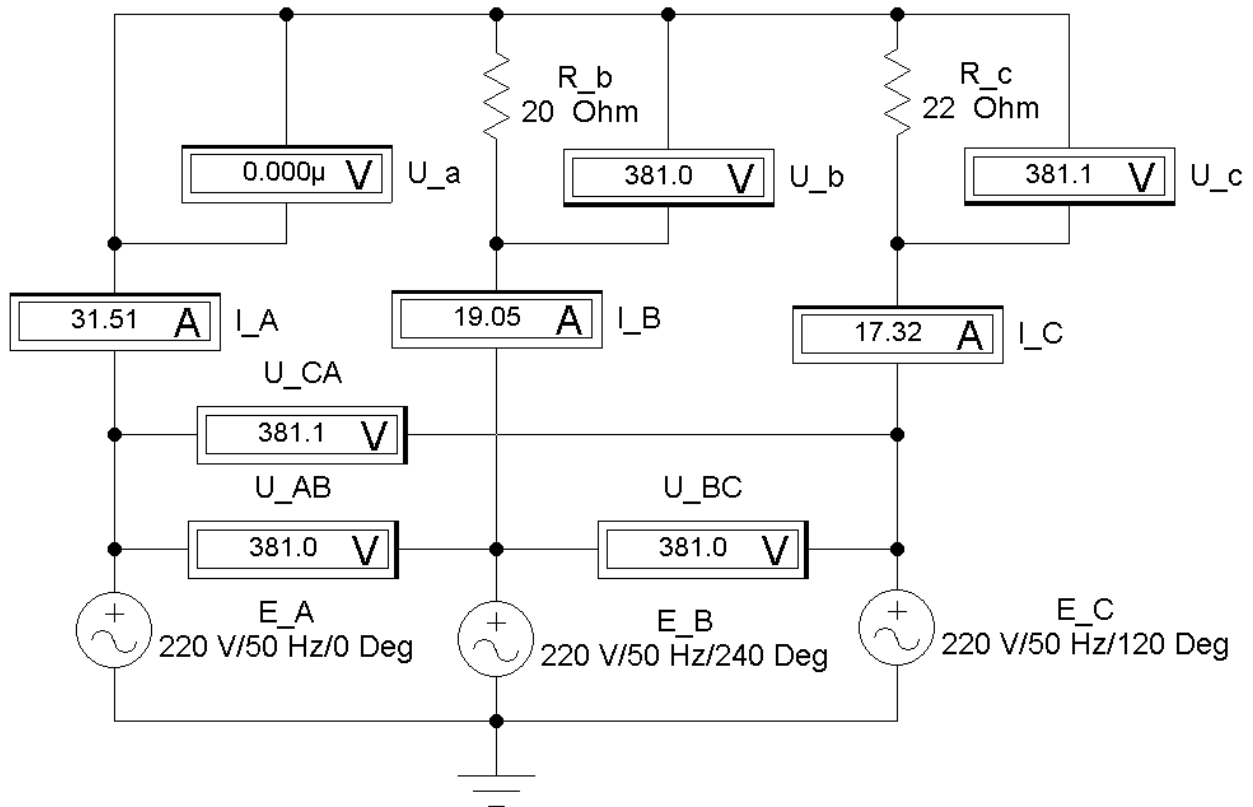


Рисунок 5.15 – Схема до прикладу 5.1 в Electronics Workbench без нульового проводу при короткому замиканні в фазі *A*

Дослідимо цю ж схему (без нульового проводу) при обриві проводу фази *A*. В цьому випадку трифазна схема перетворюється в однофазну:

$$I_B = I_C = \frac{U_l}{R_b + R_c} = \frac{380}{20 + 22} = 9,05 \text{ (A)};$$

$$U_b = R_b I_b = 20 \cdot 9,05 = 181 \text{ (B)};$$

$$U_c = R_c I_c = 22 \cdot 9,05 = 199,1 \text{ (B)};$$

$$U_a = \sqrt{\left(\frac{U_l}{2} - U_e\right)^2 + (U_l \cos 30^\circ)^2} = \sqrt{\left(\frac{380}{2} - 181\right)^2 + (380 \cdot 0,866)^2} = 329 \text{ (В)}.$$

В цьому випадку лампи в фазі *C* згорять. Результати моделювання наведені на рис. 5.16.

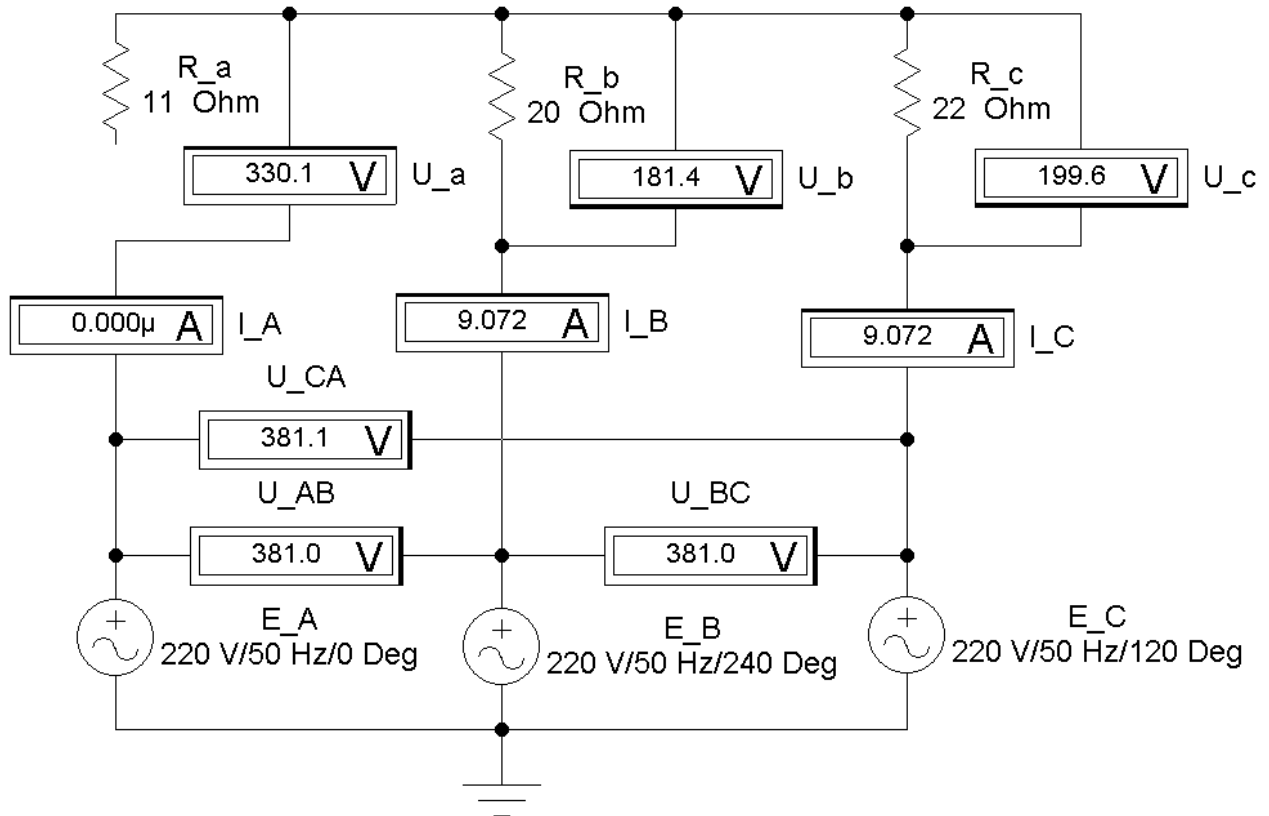


Рисунок 5.16 – Схема до прикладу 5.1 в Electronics Workbench без нульового проводу при обриві фази *A*

## Лабораторна робота №6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ПРИ З'ЄДНАННІ СПОЖИВАЧІВ ЗА СХЕМОЮ „ТРИКУТНИК”

📁 **Мета роботи** Дослідити режими роботи трифазної системи електрозабезпечення з симетричним, несиметричним навантаженням, обривом фази споживача та лінійного проводу. Набути навичок вимірювання параметрів трифазної системи і побудови векторних діаграм.

#### 6.1 Основні теоретичні положення

##### 6.1.1 Загальні відомості

В трифазних системах змінного струму крім схеми з'єднання „зірка” широкого застосування дістала схема з'єднання „трикутником”. При такому з'єднанні (рис. 6.1) також є по три фазних і по три лінійних напруги та струму. Їх визначення таке ж саме, як і при з'єднанні „зіркою”.

При з'єднанні „трикутником” фазні напруги, опори і струми позначаються індексом з двома буквами, що вказують на провід або фазу, до якого вони відносяться.

Із даної схеми (рис. 6.1) видно, що кожна фаза навантаження підключена до двох лінійних проводів. Тому незалежно від величини і характеру опору навантаження кожна фазна напруга при з'єднанні „трикутником” дорівнює, відповідно, лінійній напрузі:

$$U_{\phi} = U_{л}. \quad (6.1)$$

Відповідно до першого закону Кірхгофа вирази для визначення лінійних струмів схеми, з'єднаної в трикутник (рис. 6.1), в комплексній формі запишуться таким чином:

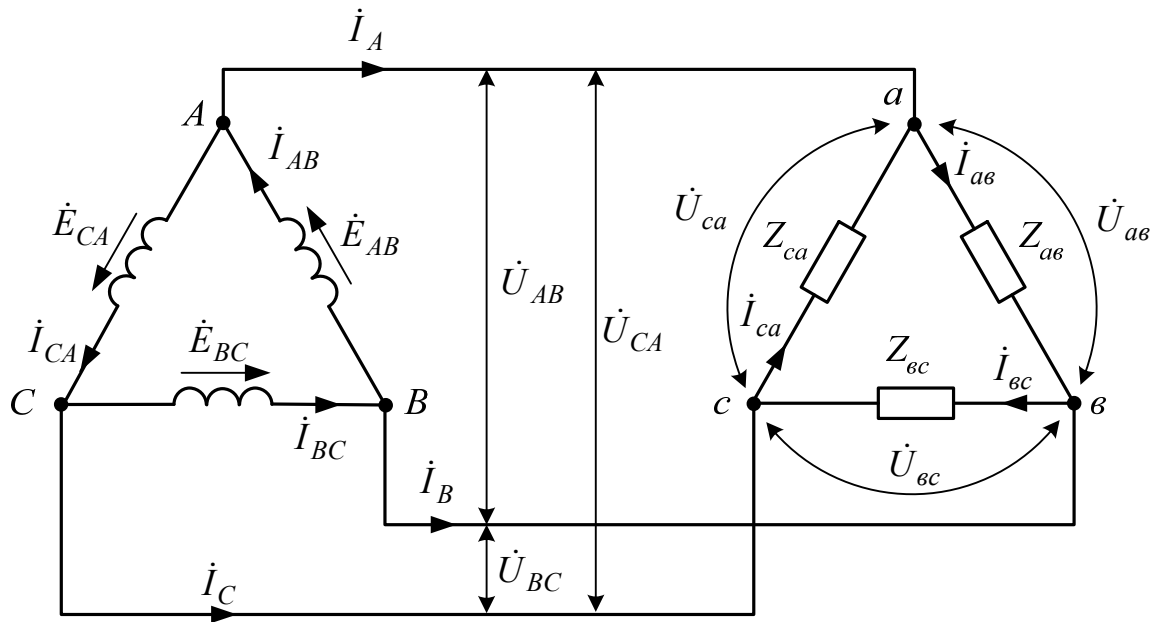


Рисунок 6.1 – Схема трифазного кола при з'єднанні „трикутником” генератора і приймачів

$$\begin{aligned}
 \dot{I}_A &= \dot{I}_{av} - \dot{I}_{ca}; \\
 \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}; \\
 \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.
 \end{aligned}
 \tag{6.2}$$

Проаналізувавши (6.2), можна зробити висновок, що при з'єднанні в „трикутник” сума комплексних лінійних струмів завжди рівна нулю, тобто

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.
 \tag{6.3}$$

Якщо не враховувати опір проводів мережі, то напругу навантаження слід вважати рівною напрузі джерела (генератора), а саму трифазну систему – симетричною системою напруг. Виходячи із схеми з'єднання навантаження (рис. 6.1) та рівняння лінійних і фазних напруг (6.1) можна зробити висновок, що з'єднання в „трикутник” доцільно застосовувати тоді, коли кожна фаза трифазного навантаження або однофазні приймачі розраховані на лінійну напругу мережі. Розрахунок трифазних мереж при

такому з'єднанні проводиться аналогічно розрахункам кіл, з'єднаних за схемою „зірка”.

Розглянемо порядок розрахунку кіл, з'єднаних в „трикутник”, при симетричній системі напруг в мережі для випадків:

- а) симетричного навантаження;
- б) несиметричного навантаження;
- в) несиметричного режиму при обриві фази навантаження;
- г) несиметричного режиму при обриві лінійного проводу.

### 6.1.2 Симетричне навантаження

Нагадаємо, що симетричному навантаженню в трифазній системі повинна відповідати умова: навантаження фаз повинні бути однакові як за величиною, так і за характером ( $Z_{av} = Z_{bc} = Z_{ca}$ ).

Розглянемо симетричне активно-індуктивне навантаження (рис. 6.2).

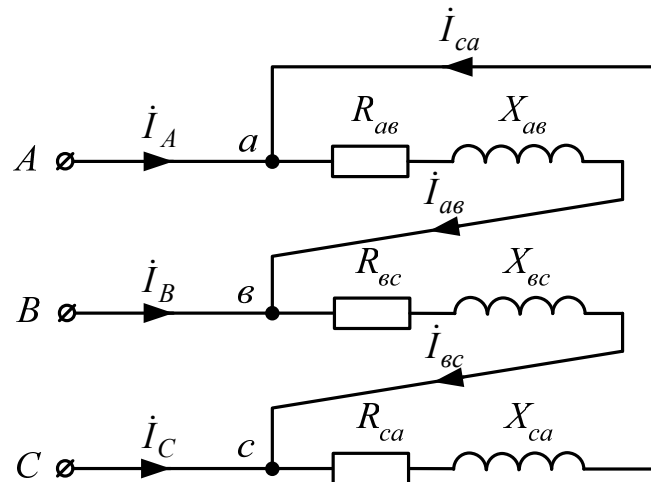


Рисунок 6.2 – Схема трифазного кола із симетричним активно-індуктивним навантаженням, з'єданого „трикутником”

Оскільки навантаження симетричне, то справедливі рівності:

$$\begin{cases} R_{av} = R_{bc} = R_{ca} = R_{\phi}; \\ X_{av} = X_{bc} = X_{ca} = X_{\phi}. \end{cases} \quad (6.4)$$

Повний фазний опір можна визначити як

$$Z_{\phi} = \sqrt{R_{\phi}^2 + X_{\phi}^2}, \quad (6.5)$$

який в комплексній формі буде мати вигляд

$$Z_{\phi} = Z_{\phi} e^{j\varphi_{\phi}}, \quad (6.6)$$

де кут зсуву фаз

$$\varphi_{\phi} = \arctg \frac{X_{\phi}}{R_{\phi}}. \quad (6.7)$$

Фазні напруги в символічній формі запису мають вигляд:

$$\begin{cases} \dot{U}_{av} = U_{\phi}; \\ \dot{U}_{bc} = U_{\phi} e^{-j120^{\circ}}; \\ \dot{U}_{ca} = U_{\phi} e^{j120^{\circ}}. \end{cases} \quad (6.8)$$

За таких умов фазні струми можна визначити із таких співвідношень:

$$\dot{I}_{av} = \frac{\dot{U}_{av}}{Z_{\phi}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{\phi}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{\phi}}. \quad (6.9)$$

Тоді лінійні струми можна визначати з виразів (6.2).

Векторну діаграму для даного типу навантаження можна побудувати на „зірці” фазних напруг (рис. 6.3) або „трикутнику” лінійних напруг (рис. 6.4).

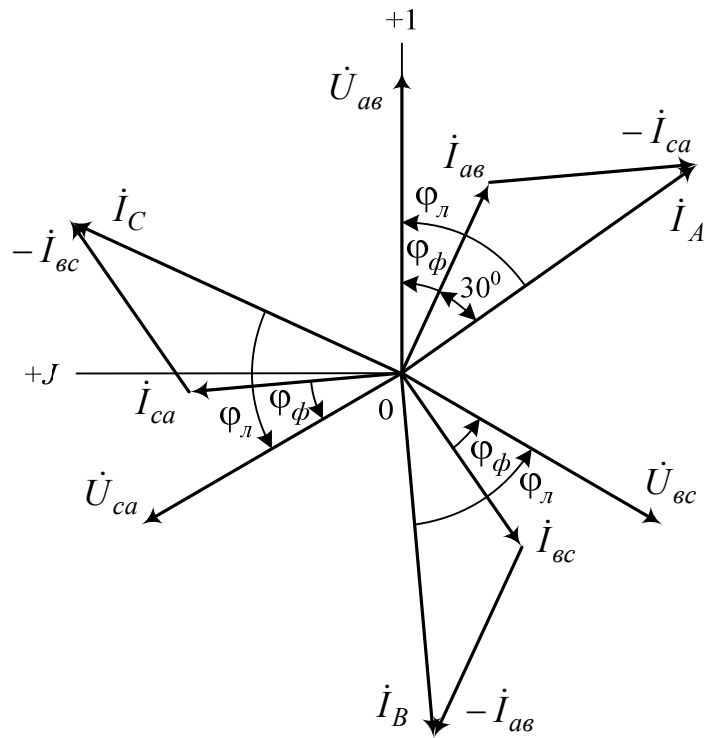


Рисунок 6.3 – Побудова векторної діаграми симетричної трифазної мережі при активно-індуктивному навантаженні на „зірці” фазних напруг

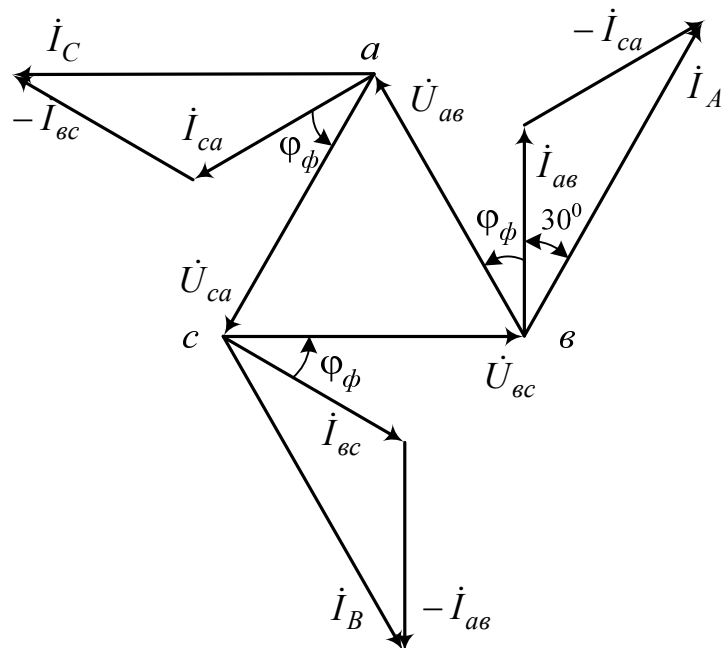


Рисунок 6.4 – Побудова векторної діаграми симетричної трифазної мережі при активно-індуктивному навантаженні на „трикутнику” лінійних напруг



З рис. 6.3 та рис. 6.4 випливає, що лінійний струм  $I_L = 2I_\phi \cos 30^\circ$ , тобто при симетричному навантаженні

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi. \quad (6.10)$$

В силу рівності напруг, струмів та кутів зсуву фаз активна  $P_\phi$ , реактивна  $Q_\phi$  та повна  $S_\phi$  потужності для однієї фази визначаються за формулами:

$$\begin{cases} P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = I_\phi^2 R_\phi; \\ Q_\phi = U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = I_\phi^2 X_\phi; \\ S_\phi = U_\phi I_\phi = I_\phi^2 Z_\phi = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2}. \end{cases} \quad (6.11)$$

Зрозуміло, що

$$\begin{cases} P_\phi = P_{ав} = P_{вс} = P_{са}; \\ Q_\phi = Q_{ав} = Q_{вс} = Q_{са}. \end{cases} \quad (6.12)$$

Таким чином потужності кола:

$$P = 3P_\phi; \quad Q = 3Q_\phi, \quad (6.13)$$

а повна потужність –

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3\sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2} = 3S_\phi = 3U_\phi I_\phi. \quad (6.14)$$

При симетричному навантаженні розрахунок потужностей можна проводити і через лінійні напруги й струми:

$$\begin{cases} P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi_\phi; \\ Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi_\phi; \\ S = \sqrt{3}U_L I_L. \end{cases} \quad (6.15)$$

### 6.1.3 Несиметричне навантаження

При несиметричному навантаженні в загальному випадку опори всіх фаз різні як за величиною, так і за характером:  $Z_{av} \neq Z_{bc} \neq Z_{ca}$ .

Тому в загальному випадку при несиметричному навантаженні фазні струми, кути зсуву фаз і фазні потужності будуть також різні.

Для електричної системи з несиметричним навантаженням, з'єднаним за схемою „трикутника” (рис. 6.5), розрахунок фазних струмів проводять за формулами:

$$\dot{I}_{av} = \frac{\dot{U}_{av}}{Z_{av}}; \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}}, \quad (6.16)$$

а лінійних – за формулами (6.2).

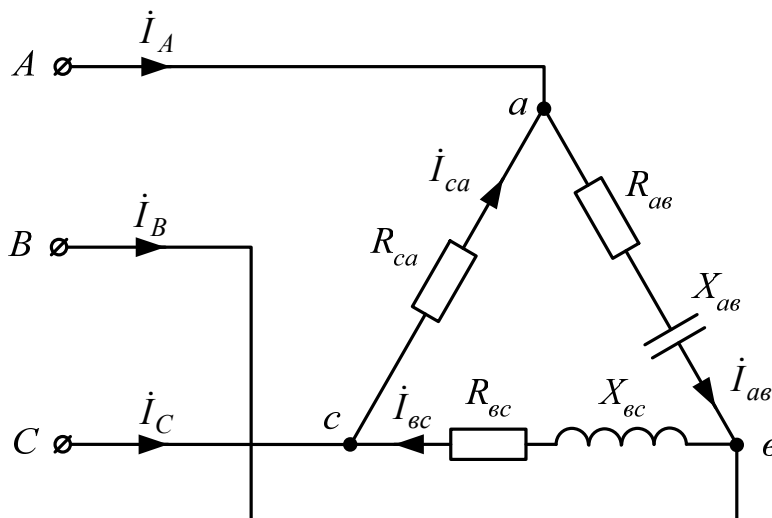


Рисунок 6.5 – Схема трифазного кола із несиметричним навантаженням, з'єданого „трикутником”

Векторні діаграми для наведеної схеми (рис. 6.5) показані на рис. 6.6 (на „зірці” фазних напруг) та рис. 6.7 (на „трикутнику” лінійних напруг).

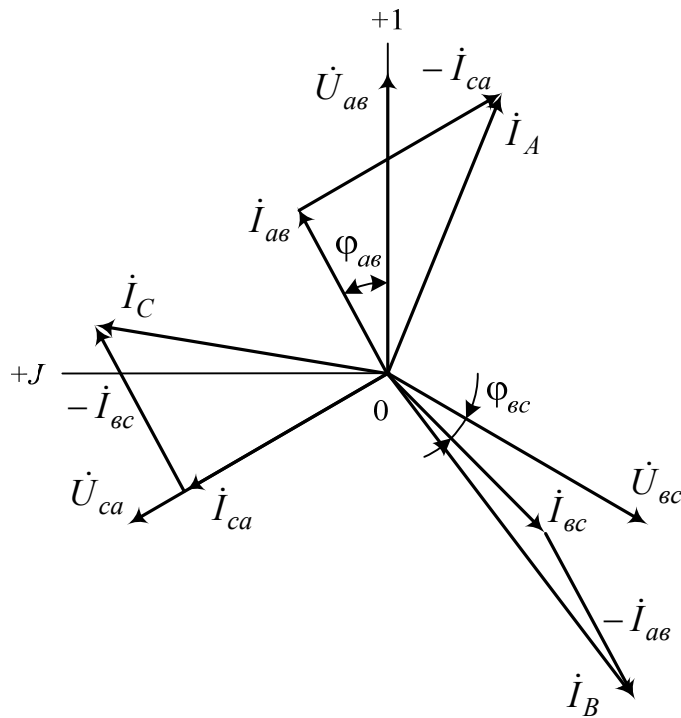


Рисунок 6.6 – Побудова векторної діаграми несиметричної трифазної мережі на „зірці” фазних напруг

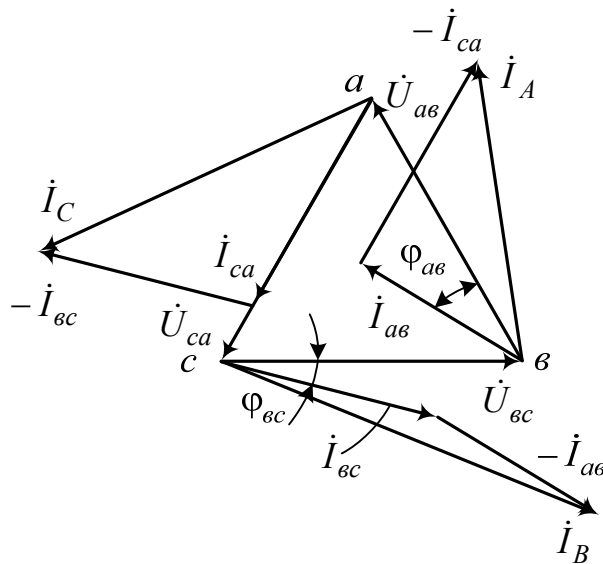


Рисунок 6.7 – Побудова векторної діаграми несиметричної трифазної мережі на „трикутнику” лінійних напруг

Потужності при несиметричному навантаженні визначаються для кожної фази окремо. Наприклад, для фази *ав* вони запишуться у вигляді:

$$\begin{cases} P_{ав} = U_{ав} I_{ав} \cos \varphi_{ав} = I_{ав}^2 R_{ав}; \\ Q_{ав} = U_{ав} I_{ав} \sin \varphi_{ав} = I_{ав}^2 X_{ав}; \\ S_{ав} = U_{ав} I_{ав} = I_{ав}^2 Z_{ав} = \sqrt{P_{ав}^2 + Q_{ав}^2}. \end{cases} \quad (6.17)$$

Повна потужність кола у комплексній формі має вигляд:

$$S_{ав} = \dot{U}_{ав} \dot{I}_{ав} = S_{ав} \cos \varphi_{ав} + j S_{ав} \sin \varphi_{ав}. \quad (6.18)$$

Дійсна частина комплексу фазної потужності називається активною потужністю фази, а уявна – реактивною. У виразі (6.18) дійсна частина –  $S_{ав} \cos \varphi_{ав}$ , а уявна –  $j S_{ав} \sin \varphi_{ав}$ .

Загальна активна та реактивна потужності кола відповідно записуються у вигляді:

$$P = P_{ав} + P_{вс} + P_{са}, \quad (6.19)$$

$$Q = Q_{ав} + Q_{вс} + Q_{са}. \quad (6.20)$$

Для схеми, що розглядається (рис. 6.5), реактивна потужність фази *са* рівна нулю, тобто  $Q_{са} = 0$ .

Тоді повна потужність кола:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (6.21)$$

#### 6.1.4 Обрив фази навантаження

Розглянемо випадок обриву фази для схеми, наведеної на рис. 6.8.

Для даного випадку фазні струми визначаються співвідношеннями:

$$\dot{I}_{ав} = 0; \quad \dot{I}_{вс} = \frac{\dot{U}_{вс}}{Z_{вс}}; \quad \dot{I}_{са} = \frac{\dot{U}_{са}}{Z_{са}}, \quad (6.22)$$

а лінійні струми –

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_{са}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{вс}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{са} - \dot{I}_{вс}. \quad (6.23)$$

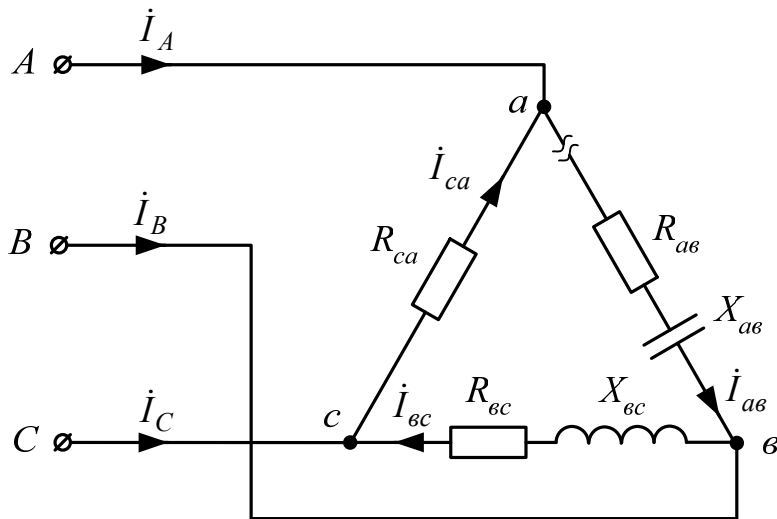


Рисунок 6.8 – Схема трифазного кола при обриві фази  $av$

Векторні діаграми, побудовані на „зірці” та „трикутнику” фазних напруг для схеми рис. 6.8 наведені на рис. 6.9. та рис. 6.10, відповідно.

Потужності для даного кола визначаються аналогічно як і для несиметричного режиму роботи, що розглядався в пункті 6.1.3.

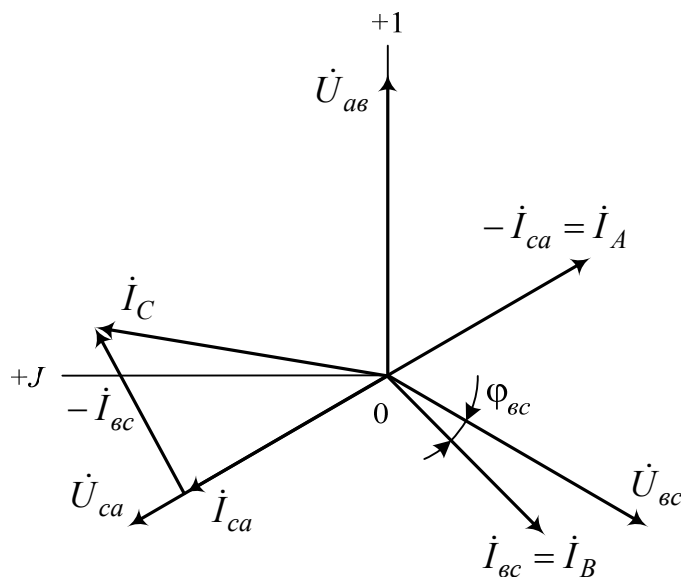


Рисунок 6.9 – Побудова векторної діаграми трифазної мережі при обриві фази на „зірці” фазних напруг

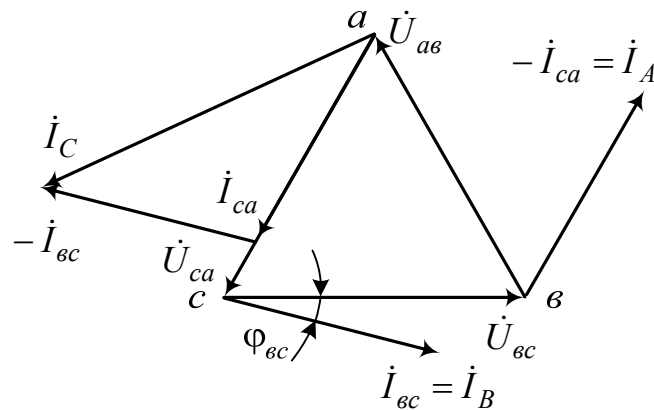


Рисунок 6.10 – Побудова векторної діаграми трифазної мережі при обриві фази на „трикутнику” фазних напруг

### 6.1.5 Обрив лінійного проводу

Розглянемо випадок обриву лінійного проводу для схеми, зображеної на рис. 6.11. Дану схему можна подати у вигляді схеми з паралельним з’єднанням елементів (рис. 6.12).

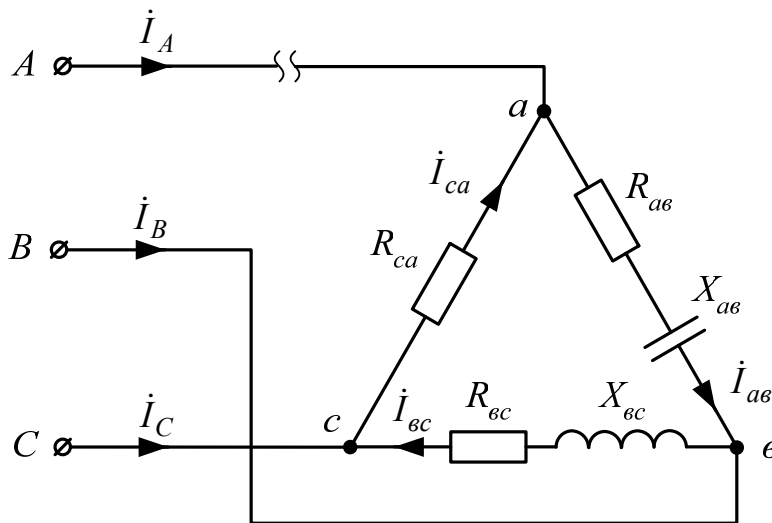


Рисунок 6.11 – Схема трифазного кола при обриві лінійного проводу

Фазні струми в цьому випадку можуть бути визначені з виразів:

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}}; \quad \dot{I}_{ca} = \dot{I}_{av} = -\frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{ca} + Z_{av}}, \quad (6.24)$$

а лінійні струми –

$$\dot{I}_A = 0; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_C = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ac}. \quad (6.25)$$

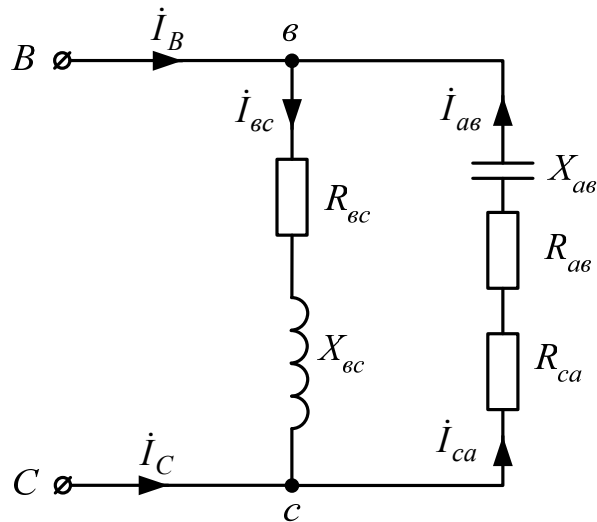


Рисунок 6.12 – Перетворена схема трифазного кола при обриві лінійного проводу

Векторна діаграма в цьому випадку будується як для електричного кола з паралельним з'єднанням елементів. Потужності в колі визначаються аналогічно попереднім двом випадкам.

❶ **Приклад 6.1.** До чотирипроводової трифазної мережі з фазною напругою  $U_\phi = 127$  В підключені трикутником три групи ламп розжарювання (рис. 6.13) з номінальною напругою 220 В: між проводами  $A$  і  $B$  – 25 шт. потужністю по 100 Вт кожна,  $B$  і  $C$  – 10 шт. по 75 Вт,  $C$  і  $A$  – 25 шт. по 40 Вт. Визначити фазні й лінійні струми, а також потужність навантаження [3]:

- в номінальному режимі;
- при обриві лінійного проводу  $C$ ;
- відключення фази  $ab$ , фаз  $bc$  і  $ca$ .

Для всіх режимів побудувати векторні діаграми.

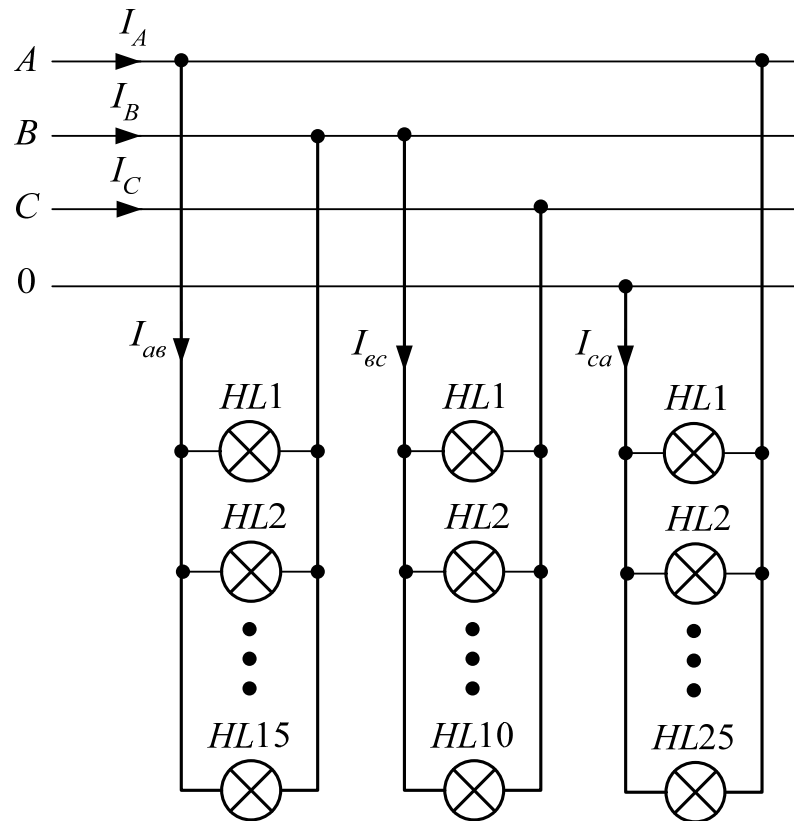


Рисунок 6.13 – Схема трифазної мережі до прикладу 6.1

*Розв'язування.*

а) номінальний режим. В цьому режимі на всіх лампах буде лінійна напруга

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi} = 1,73 \cdot 127 = 220 \text{ (В)},$$

а фазні струми –

$$I_{ав} = \frac{P_{ав}}{U_{ав}} = \frac{100 \cdot 15}{220} = 6,82 \text{ (А)};$$

$$I_{вс} = \frac{P_{вс}}{U_{вс}} = \frac{75 \cdot 10}{220} = 3,4 \text{ (А)};$$

$$I_{са} = \frac{P_{са}}{U_{са}} = \frac{40 \cdot 25}{220} = 4,55 \text{ (А)}$$



з врахуванням того, що  $\varphi_\phi = 0$ .

Лінійні струми можна знайти з векторної діаграми (рис. 6.14) через їх проекції на осі комплексної площини.

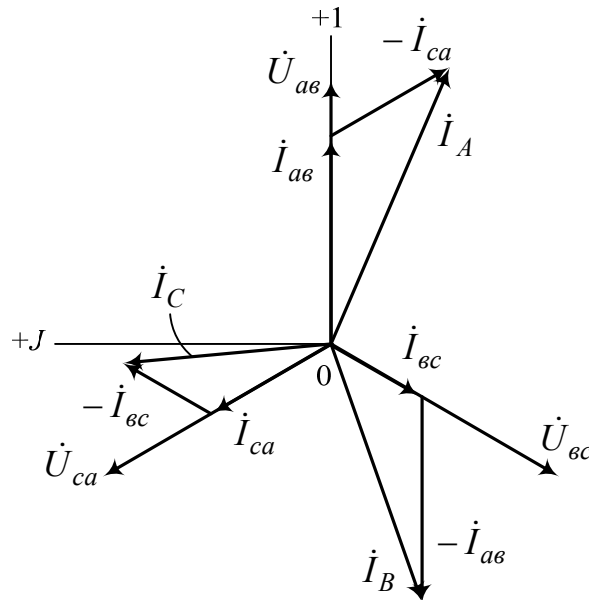


Рисунок 6.14 – Векторна діаграма до прикладу 6.1 для номінального режиму

Наприклад,

$$I_A = \sqrt{[\operatorname{Re}(I_A)]^2 + [\operatorname{Im}(I_A)]^2} = \sqrt{9,095^2 + 3,93^2} = 9,93 \text{ (A)},$$

де

$$\operatorname{Re}(I_A) = I_{av} + I_{ca} \cdot \cos 60^\circ = 6,82 + 4,55 \cdot 0,5 = 9,095 \text{ (A)};$$

$$\operatorname{Im}(I_A) = 0 - I_{ca} \cdot \cos 30^\circ = -4,55 \cdot 0,865 = -3,93 \text{ (A)};$$

$$I_A = 9,095 - j3,93 = 9,93^{-j23,4^\circ}.$$

$$\text{Кут зсуву } \varphi_{lA} = \arccos(9,095 / 9,93) = -23,4^\circ.$$

Інші струми та  $\varphi_l$  в результаті аналогічних розрахунків мають такі числові значення:

$$I_B = 9 \text{ A}, \quad \varphi_{lB} = 180^\circ + 18,4^\circ = 198,4^\circ;$$

$$I_C = 6,9 \text{ A}, \quad \varphi_{lC} = 90^\circ + 4,45^\circ = 94,45^\circ.$$

Активна потужність кола:

$$P = P_{av} + P_{bc} + P_{ca} = 1500 + 750 + 1000 = 3250 \text{ (Вт)}.$$

б) обрив лінійного проводу  $C$ . В цьому режимі трифазне коло перетворюється в однофазне (рис. 6.15, а).

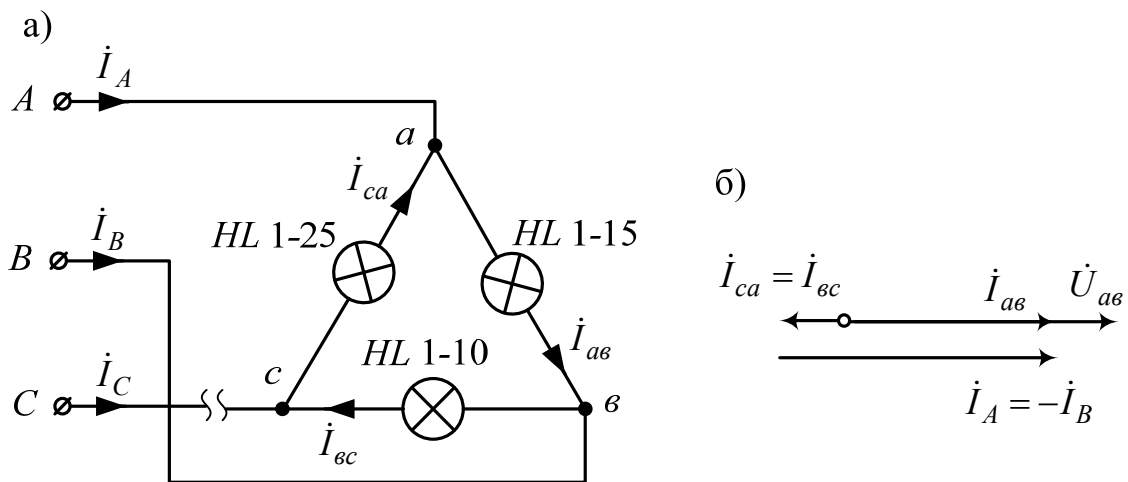


Рисунок 6.15 – Схема та векторна діаграма до прикладу 6.1 для обриву лінійного проводу  $C$

Фазні струми:

$$I_{av} = \frac{P_{av}}{U_{av}} = \frac{100 \cdot 15}{220} = 6,82 \text{ (A)};$$

$$I_{bc} = I_{ca} = \frac{U_{av}}{R_{bc} + R_{ca}} = \frac{220}{64,7 + 48,4} = 1,94 \text{ (A)},$$

де

$$R_{bc} = \frac{U_{л}^2}{P_{bc}} = 64,7 \text{ (Ом)}; \quad R_{ca} = \frac{U_{л}^2}{P_{ca}} = 48,4 \text{ (Ом)}.$$

Лінійні струми (рис. 6.15, б):

$$I_C = 0;$$

$$I_A = -I_B = I_{av} + I_{bc} = 6,82 + 1,94 = 8,76 \text{ (A)}.$$

Напруги

$$U_{bc} = R_{bc} I_{bc} = 64,7 \cdot 1,94 = 126 \text{ (В)};$$

$$U_{ca} = R_{ca} I_{ca} = 48,4 \cdot 1,94 = 94 \text{ (В)}.$$

Потужність ламп:

$$\begin{aligned} P &= P_{av} + P_{bc} + P_{ca} = P_{av} + U_{bc} I_{bc} + U_{ca} I_{ca} = \\ &= 1500 + 245 + 182,5 = 1927,5 \text{ (Вт)}. \end{aligned}$$

в) відключення фази *ав* (рис. 6.16). На лампах фаз *bc* і *ca* буде напруга 220 В. А тому

$$I_{av} = 0; \quad I_B = I_{bc} = 3,4 \text{ А}; \quad I_A = I_{ca} = 4,55 \text{ А}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}$$

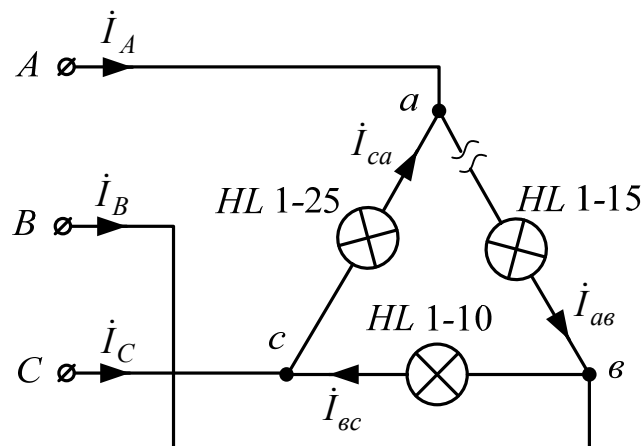


Рисунок 6.16 – Схема та векторна діаграма до прикладу 6.1 для відключення фази *ав*

і визначаються графічно за діаграмою на рис. 6.14 як і для нормального режиму роботи:  $I_C = 6,9 \text{ А}$ ;  $\varphi_{lC} = -94,45^\circ$ .

Потужність ламп:

$$P = P_{bc} + P_{ca} = 750 + 1000 = 1750 \text{ (Вт)}.$$

При відключенні фаз *bc* і *ca* (рис. 6.17) трифазна система перетворюється в однофазне коло:

струм  $I_A = I_{av} = I_B = 6,82 \text{ А}$ ;

потужність  $P = P_{av} = 1500 \text{ Вт}$ .

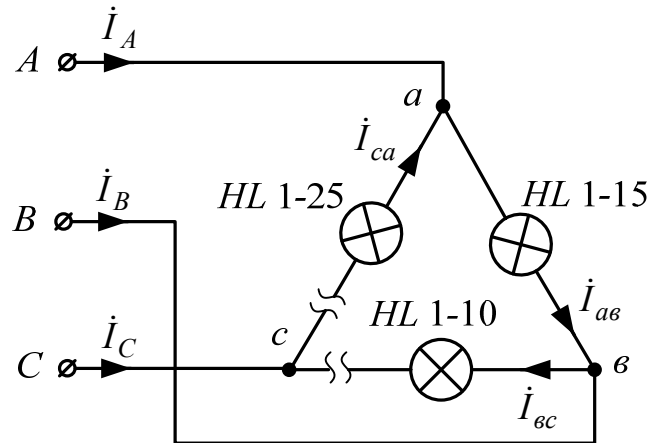


Рисунок 6.17 – Схема до прикладу 6.1 для відключення фаз *bc* і *ca*

Векторні діаграми кола при відключенні однієї або двох фаз отримуються з рис. 6.14, якщо забрати відсутні струми (рис. 6.18).

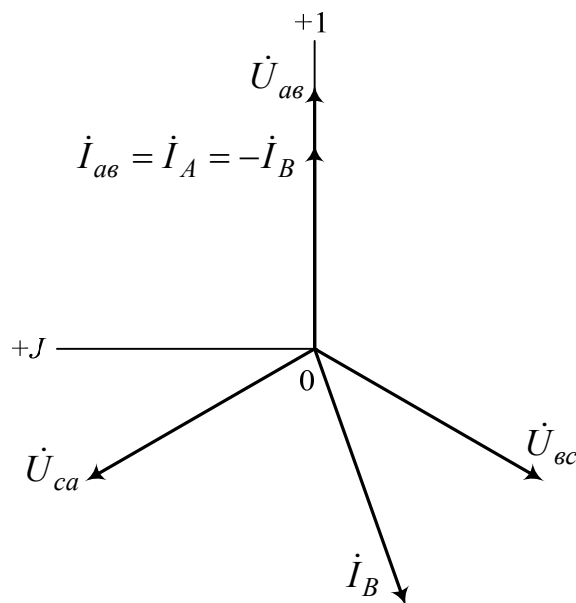


Рисунок 6.18 – Векторна діаграма до прикладу 6.1 для відключення фаз *bc* і *ca*

## 6.2 Програма роботи

6.2.1 Скласти електричне коло згідно зі схемою (рис. 6.18).

Примітки:

1. При вимірюванні потужності в фазах  $av$  і  $ca$  кінець обмотки напруги  $U$  ватметра  $PW$  під'єднати до клемми  $b$ .
2. При вимірюванні потужності в фазі  $bc$  кінець обмотки напруги  $U$  ватметра  $PW$  під'єднати до клемми  $a$ .

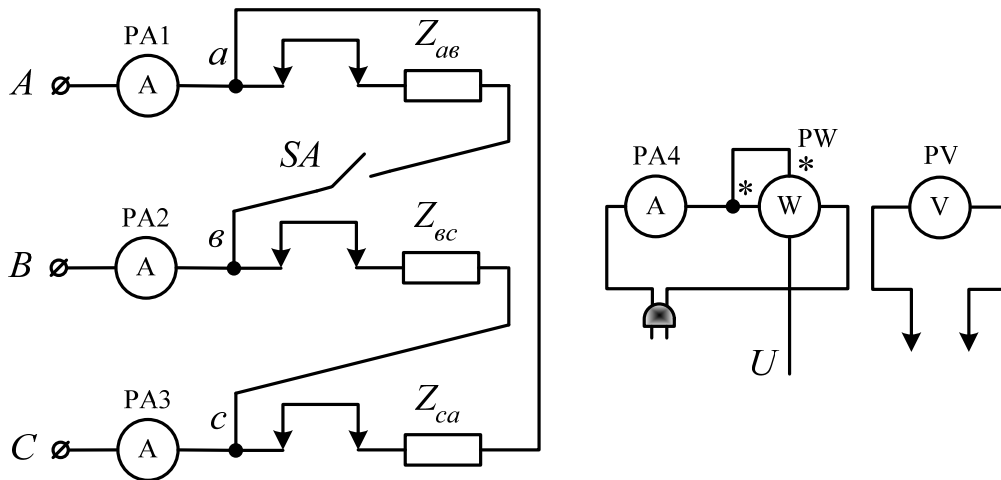


Рисунок 6.18 – Схема для проведення дослідів

6.2.2 Скласти електричну схему з симетричним навантаженням  $Z_{av} = Z_{bc} = Z_{ca}$ ;  $Z_{av} = R_1$ ,  $Z_{bc} = R_2$ ,  $Z_{ca} = R_3$ . Вимикач  $SA$  повинен бути включеним.

6.2.3 Провести вимірювання фазних  $I_{av}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$  та лінійних  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  струмів, фазних напруг  $U_{av}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  та фазних потужностей  $P_{av}$ ,  $P_{bc}$ ,  $P_{ca}$ . Результати досліду записати до табл. 6.1, режим „а”.

6.2.3 Скласти схему з несиметричним навантаженням, для чого опір  $Z_{bc}$  замінити реальною котушкою з індуктивністю  $L$ , а опір  $Z_{ca}$  – на послідовне з'єднання опору  $R_4$  і конденсаторної батареї  $C$ . Результати досліду занести до табл. 6.1, режим „б”.

6.2.4 При несиметричному режимі дослідити роботу трифазної системи при обриві однієї із фаз навантаження. Для цього розімкнути вимикач  $SA$ . Результати досліду занести до табл. 6.1, режим „в”.

Таблиця 6.1 – Експериментальні та розрахункові дані дослідження трифазної мережі, з'єднаної в „трикутник”

Режим навантаження	Виміряно										Розраховано								
	$I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}, A$	$I_A, A$	$I_B, A$	$I_C, A$	$U_{AB}, B$	$U_{BC}, B$	$U_{CA}, B$	$P_{AB}, Вт$	$P_{BC}, Вт$	$P_{CA}, Вт$	$P, Вт$	$\cos\varphi_{AB}$	$\cos\varphi_{BC}$	$\cos\varphi_{CA}$	$R_{AB}, Ом$	$R_{BC}, Ом$	$R_{CA}, Ом$	$X_{BC}, Ом$	$X_{CA}, Ом$
а) симетричний																			
б) несиметричний																			
в) обрив фази																			
г) обрив лін. проводу																			

6.2.5 При несиметричному навантаженні дослідити роботу трифазної системи з обривом лінійного проводу. Для цього вимикач SA замкнути, а будь-який із лінійних проводів відключити від джерела. Результати досліджу занести до табл. 6.1, режим „г”.

6.2.6 За даними вимірювань розрахувати активні та реактивні опори в фазах, сумарну активну й реактивну потужності для всіх режимів.

6.2.7 Використовуючи дані вимірювань побудувати векторні діаграми для всіх випадків дослідження.

6.2.8 За результатами дослідів зробити висновки.

### 6.3 Питання для самоконтролю



1. Яке з'єднання споживачів називається „трикутником”?
2. Яке є співвідношення між лінійними і фазними напругами, лінійними і фазними струмами при симетричному та несиметричному навантаженні, з'єднаному „трикутником”?
3. Побудова векторних діаграм при симетричному і несиметричному навантаженні. Навести приклад.
4. Побудова векторних діаграм при несиметричному навантаженні та обриві фази й лінійного проводу. Навести приклад.
5. Потужності в електричному колі при з'єднанні навантаження в „трикутник” з симетричним і несиметричним навантаженням та способи їх вимірювання.
6. На що впливає обрив лінійного проводу трифазної трипроводової лінії, що живить навантаження, з'єднаної в „трикутник”?
7. На що впливає обрив фазного проводу трифазної трипроводової лінії при з'єднанні навантаження в „трикутник”?
8. Назвати переваги й недоліки трифазного кола при з'єднанні навантаження за схемою „трикутника”.

### 6.4 Задачі для самостійного розв'язування

6.4.1 В якому співвідношенні знаходяться покази ватметрів в колі (рис. 6.19), якщо  $R = X$ ?

Варіанти відповідей:

- 1)  $P_1 = P_2$ ;                      2)  $P_1 < P_2$ ;                      3)  $P_1 > P_2$ .

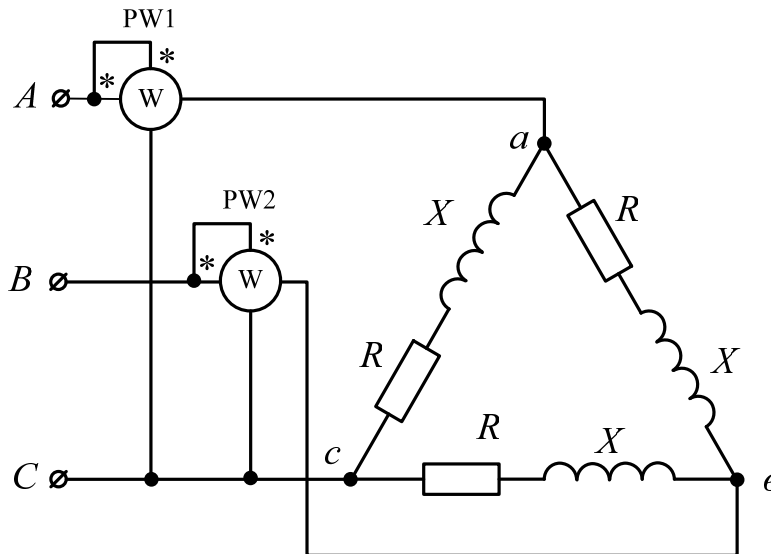


Рисунок 6.19 – Схема до задачі 6.4.1

6.4.2 Як зміняться лінійні і фазні струми при вимиканні вимикача  $SA$  (рис. 6.20, а)?

6.4.3 Визначити опори  $R_{ca}$  і  $X_{ca}$  в колі (рис. 6.20, б), якщо фазні струми  $I_{ab} = 8$  А,  $I_{bc} = 6$  А,  $I_{ca} = 10$  А;  $R_{ab} = 5$  Ом;  $R_{bc} = 10$  Ом. Активна потужність навантаження  $P = 2680$  Вт; реактивна потужність фази  $Q_{ca} = 1600$  ВАр.

6.4.4 В якій із векторних діаграм (рис. 6.21, б-г) для кола, зображеного на рис. 6.21, а) допущена помилка?

6.4.5 Як зміняться струми в колі (рис. 6.22, а), якщо перегорить запобіжник НУ1?

6.4.6 Визначити опори фаз симетричного трифазного споживача, з'єднаного „трикутником” (рис. 6.22, б), якщо відомі покази приладів:  $I = 3,4$  А;  $U = 220$  В.



Варіанти відповідей:

- 1) 90 Ом; 2) 65 Ом; 3) 112 Ом; 4) 130 Ом; 5) 54 Ом.

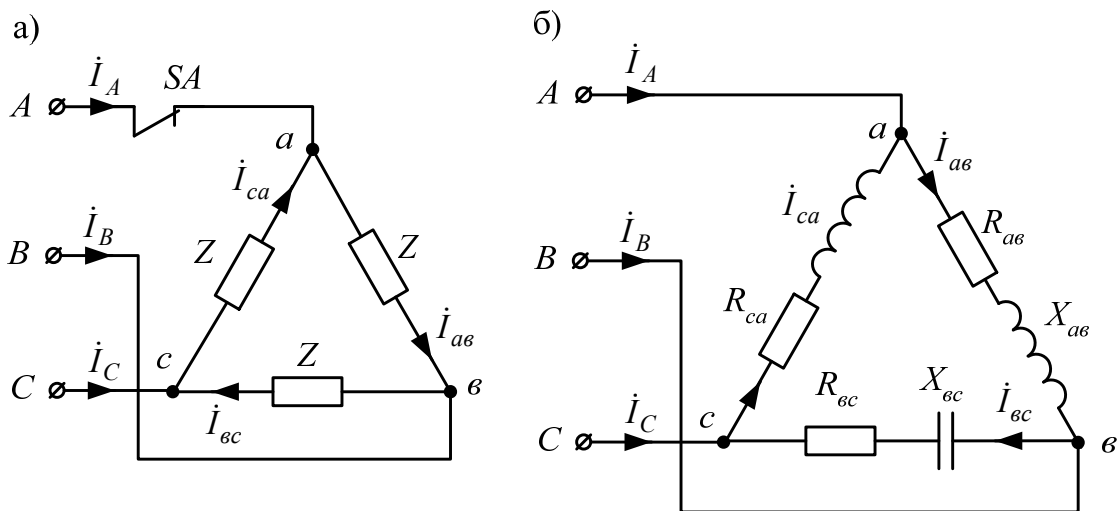


Рисунок 6.20 – Схема до задачі 6.4.2

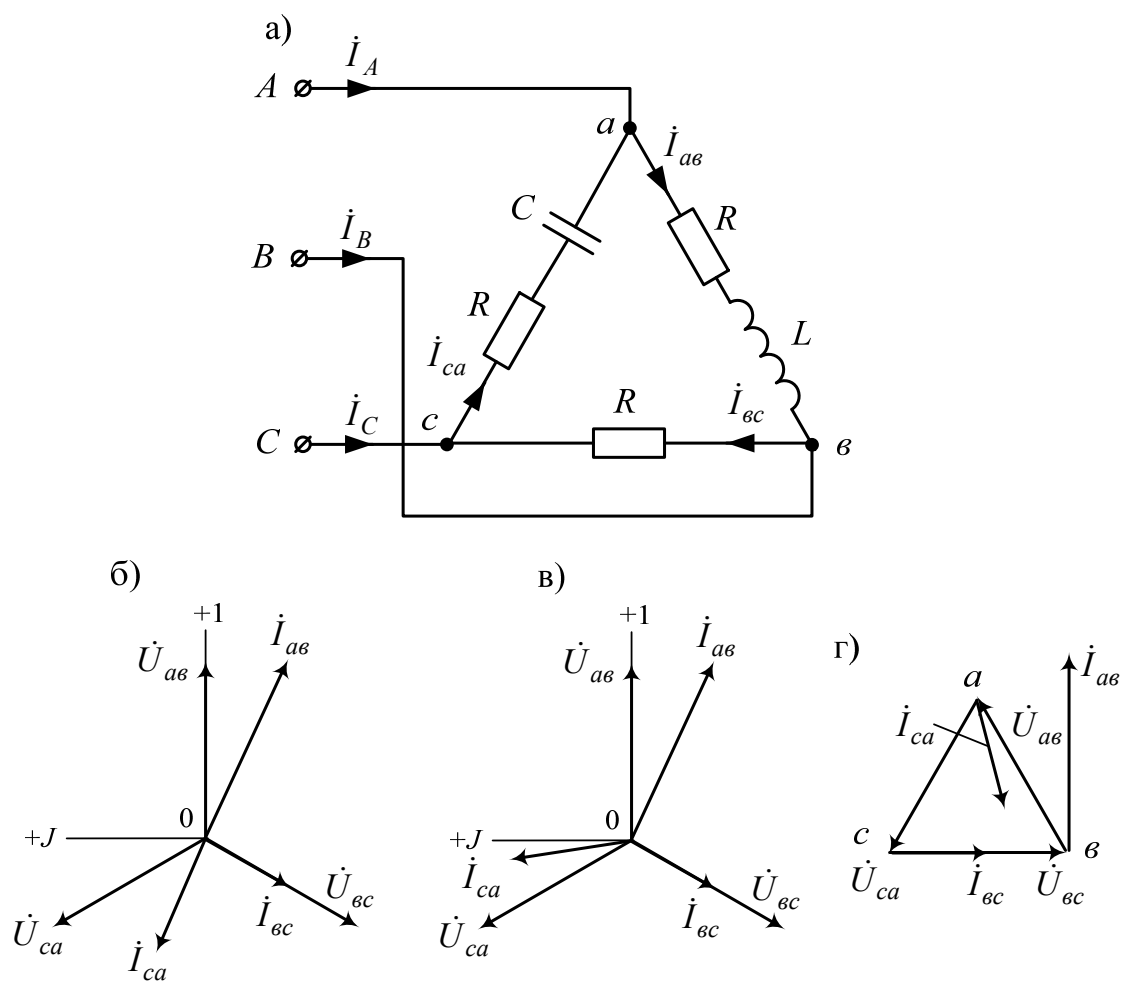


Рисунок 6.21 – Схема та векторні діаграми до задачі 6.4.4

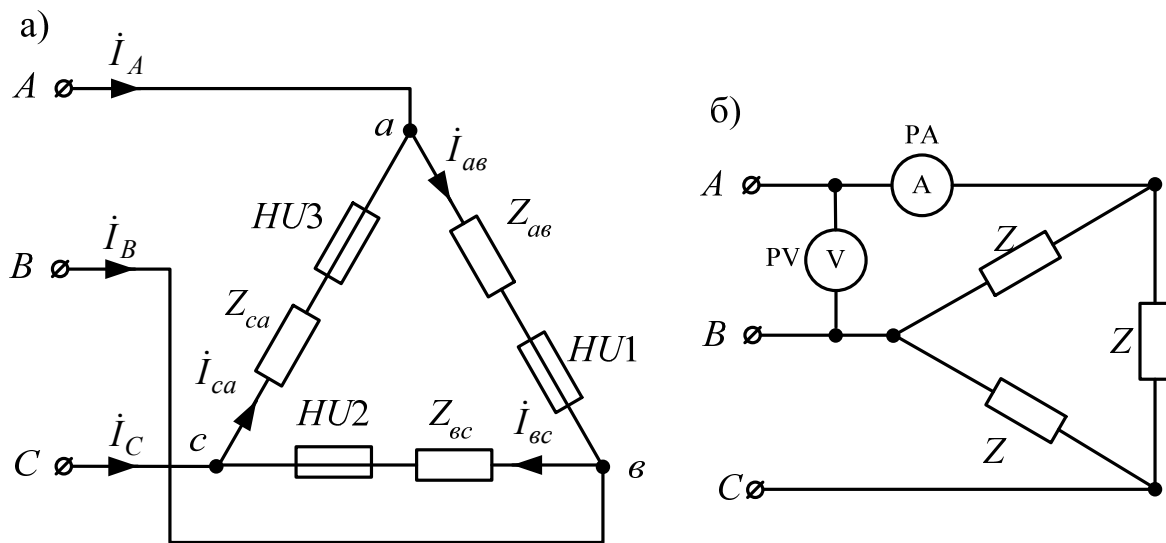


Рисунок 6.22 – Схеми до задач 6.4.5 (а) та 6.4.6 (б)

6.4.7 Три групи ламп включені у симетричну мережу з напругою 220 В (рис. 6.23). Визначити покази амперметрів PA1, PA2, PA3, якщо потужність кожної групи ламп відповідно дорівнює:  $P_{AB} = 320$  Вт,  $P_{BC} = 660$  Вт,  $P_{CA} = 760$  Вт.

Варіанти відповідей:

- |                    |                 |                 |
|--------------------|-----------------|-----------------|
| 1) $I_A = 3$ А,    | $I_B = 1,45$ А, | $I_C = 3,46$ А; |
| 2) $I_A = 1,45$ А, | $I_B = 3$ А,    | $I_C = 3,46$ А; |
| 3) $I_A = 4,17$ А, | $I_B = 3,94$ А, | $I_C = 5,43$ А; |
| 4) $I_A = 2,01$ А, | $I_B = 1,55$ А, | $I_C = 0,46$ А; |
| 5) $I_A = 4,91$ А, | $I_B = 4,45$ А, | $I_C = 6,46$ А. |

6.4.8 Для схеми (рис. 6.23) визначити напругу на кожній групі ламп і покази амперметрів при перегорянні запобіжника лінії A.

Варіанти відповідей:

- |                      |                   |                   |                       |
|----------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| 1) $U_{AB} = 65$ В,  | $U_{CA} = 155$ В, | $U_{BC} = 220$ В, | $I_B = I_C = 4,02$ А; |
| 2) $U_{AB} = 155$ В, | $U_{CA} = 65$ В,  | $U_{BC} = 220$ В, | $I_B = I_C = 4,02$ А; |
| 3) $U_{AB} = 110$ В, | $U_{CA} = 110$ В, | $U_{BC} = 220$ В, | $I_B = I_C = 2,01$ А; |
| 4) $U_{AB} = 220$ В, | $U_{CA} = 220$ В, | $U_{BC} = 220$ В, | $I_B = I_C = 1,98$ А; |
| 5) $U_{AB} = 130$ В, | $U_{CA} = 90$ В,  | $U_{BC} = 220$ В, | $I_B = I_C = 1,45$ А. |

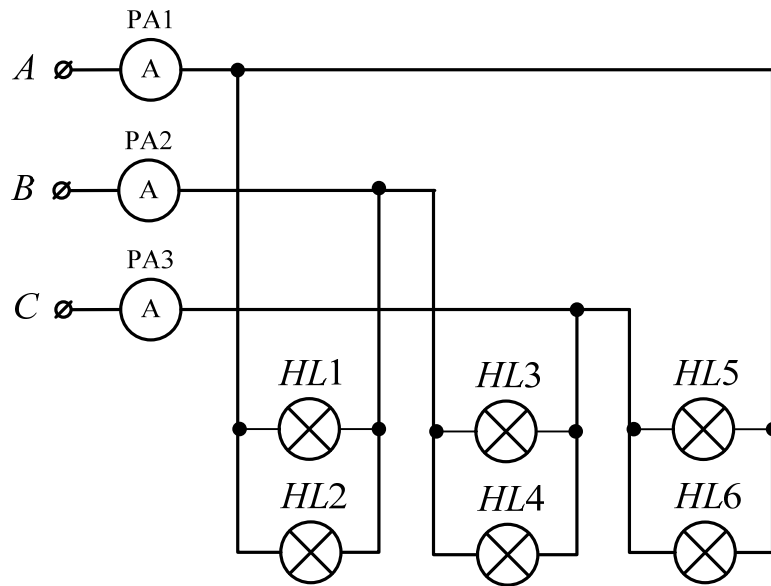


Рисунок 6.23 – Схема до задачі 6.4.7

6.4.9 Симетричний трифазний споживач з опорами фаз  $R = 18 \text{ Ом}$  та  $X = 21 \text{ Ом}$  (рис. 6.24), з'єднаний „трикутником”, підключений до джерела за допомогою провідників з опорами  $R_{np} = 0,5 \text{ Ом}$  та  $X_{np} = 1,5 \text{ Ом}$  до симетричної системи лінійних напруг  $420 \text{ В}$ . Визначити покази амперметра електромагнітної системи та вольтметра, ввімкнених відповідно до схеми.

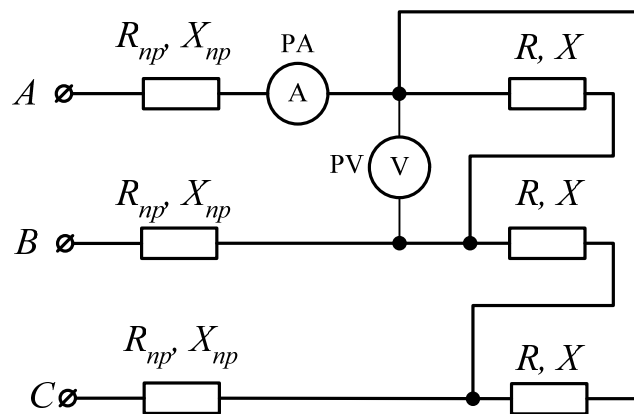


Рисунок 6.24 – Схема до задачі 6.4.8

6.4.10 Симетричний трифазний активно-індуктивний споживач, включений „трикутником” на лінійну напругу  $500 \text{ В}$ , споживає

потужність 68 кВт. Знайти параметри споживача ( $R$ ,  $L$ ), якщо при частоті 50 Гц струм у лінії дорівнює 112 А.

Варіанти відповідей:

1)  $R = 5,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 17,4 \text{ мГ}$ .

2)  $R = 16,35 \text{ Ом}$ ,  $L = 51 \text{ мГ}$ ;

3)  $R = 9,45 \text{ Ом}$ ,  $L = 29,5 \text{ мГ}$ ;

4)  $R = 7,63 \text{ Ом}$ ,  $L = 12,2 \text{ мГ}$ ;

5)  $R = 15,26 \text{ Ом}$ ,  $L = 24,4 \text{ мГ}$ .

### 6.5 Вправи для закріплення матеріалу

Змоделюємо схему з прикладу 6.1 (рис. 6.13). Для цього знайдемо еквівалентні опори навантаження в кожній з фаз за формулою:

$$R = \frac{U^2}{P}.$$

В результаті розрахунків отримаємо:  $R_{ав} = 32,267 \text{ Ом}$ ;  $R_{вс} = 64,533 \text{ Ом}$ ;  $R_{са} = 48,4 \text{ Ом}$ .

В Electronics Workbench для номінального режиму схема, що розглядається, матиме вигляд як на рис. 6.25, для обриву лінійного проводу  $C$  – рис. 6.26, для відключення фази  $ав$  – рис. 6.27.

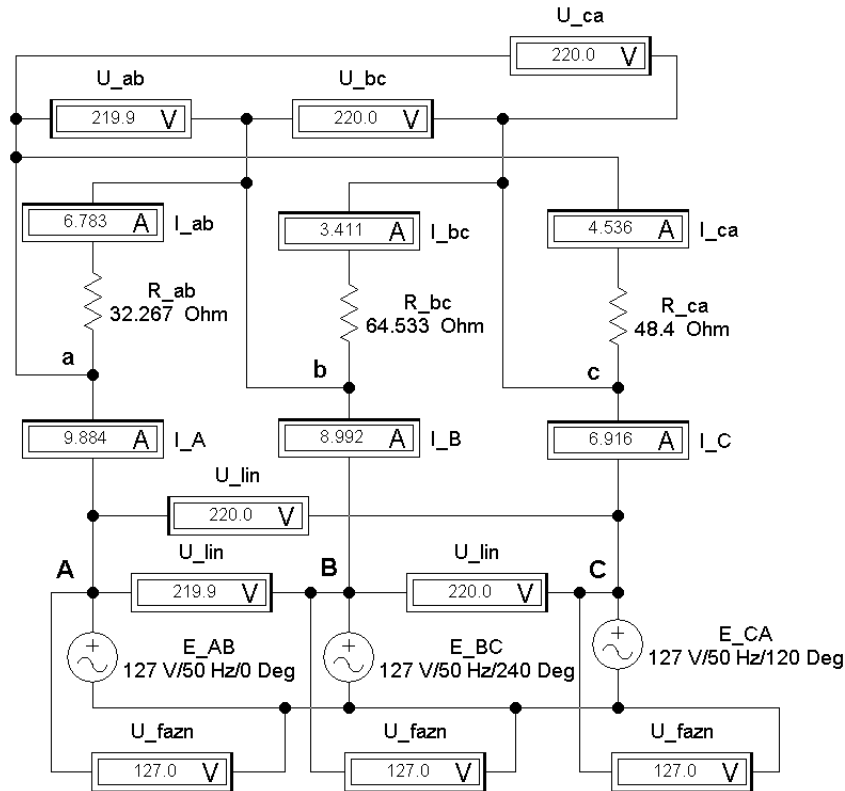


Рисунок 6.25 – Схема рис. 6.13 в Electronics Workbench для номінального режиму

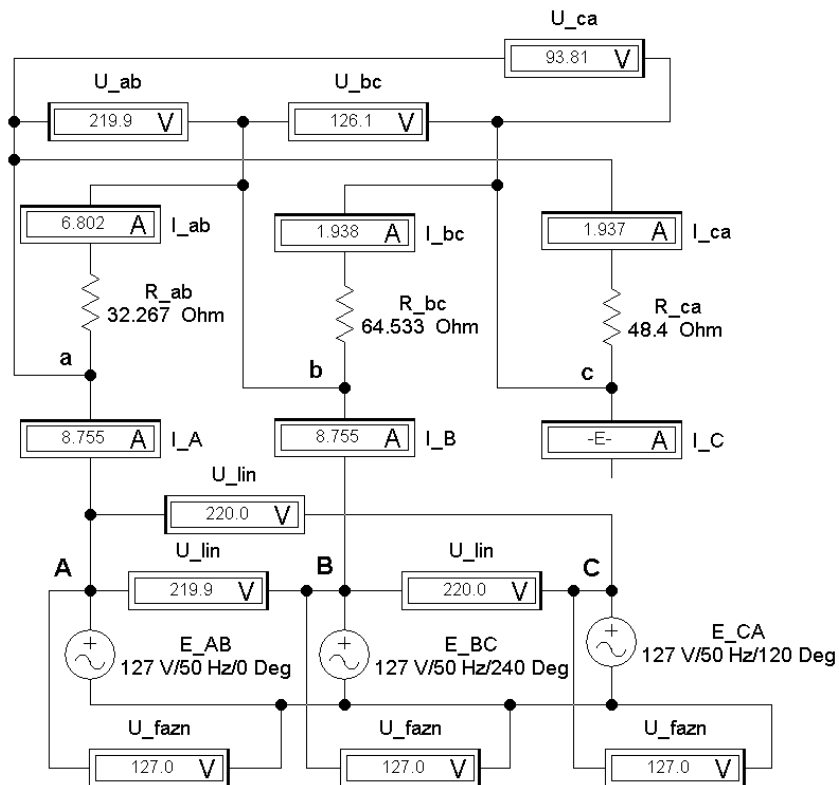


Рисунок 6.26 – Схема рис. 6.13 в Electronics Workbench для обриву проводу C

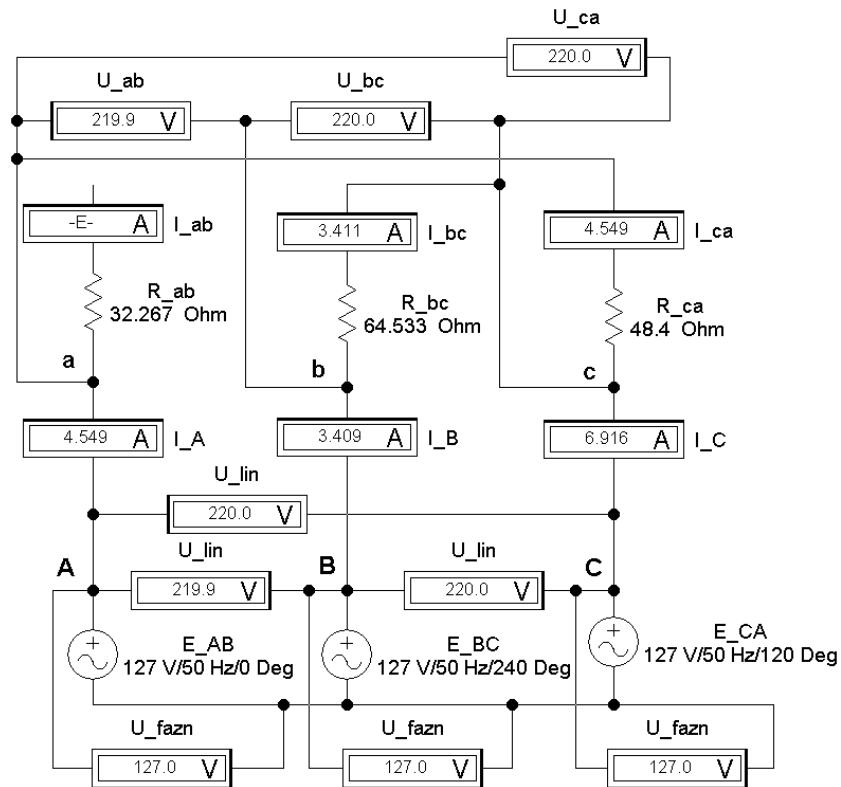


Рисунок 6.27 – Схема рис. 6.13 в Electronics Workbench при відключенні фази *ав*

## Лабораторна робота №7

### ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

📁 **Мета роботи** Ознайомитися з основними теоретичними положеннями про перехідні процеси в лінійних електричних колах; дослідити вплив змін параметрів електричного кола на характер перехідних процесів, що протікають у ньому; порівняти експериментальні дані з аналітичними розрахунками перехідних процесів.

#### 7.1 Основні теоретичні положення

*Перехідними процесами* називаються електромагнітні процеси, що виникають в електричному колі при переході від одного усталеного режиму до іншого [3].

В колах, що містять лише резистивні елементи, перехідні процеси не виникають – в них стаціонарний режим роботи встановлюється миттєво. Тому такі процеси виникають лише в колах з індуктивними котушками та конденсаторами при вмиканні або вимиканні електричного кола, зміні величини напруги, прикладеної до його затискачів, а також при зміні параметрів електричного кола, яка зумовлюється коротким замиканням окремих його елементів або іншими комутаційними змінами.

Наявність перехідних процесів пояснюється інерційністю індуктивних та ємнісних елементів (зміна в них енергії магнітного та електричного полів не може відбуватися миттєво). Зв'язок електричного поля з напругою  $u_C$  між пластинами конденсатора ємністю  $C$  і магнітного поля з струмом  $i_L$ , що проходить в обмотці з індуктивністю  $L$ , показує, що при виникненні перехідного процесу напруга на ємності й струм в індуктивності можуть змінюватися тільки неперервно без стрибків.

Незважаючи на те, що тривалість перехідних процесів, яку визначають числовими значеннями параметрів електричного кола, здебільшого

невелика (порядку часток секунди), вивчення їх необхідне, бо вони часто супроводжуються значним збільшенням напруг і струмів порівняно з усталеним режимом. Знання законів протікання перехідних процесів необхідне для розв'язування багатьох питань, пов'язаних з роботою електричних кіл зв'язку, автоматики й телемеханіки, а також радіотехнічних пристроїв, де діють неперіодичні напруги і перехідні процеси є природним, нормальним режимом роботи таких кіл.

Тривалість перехідного процесу значною мірою залежить від значення активного опору кола, в якому електрична енергія перетворюється в теплоту, що розсіюється в навколишньому середовищі.

### 7.1.1 Закони комутації

*Комутація* – включення або відключення джерела живлення, зміна параметрів кола  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , що викликають перехідні процеси.

Тривалість процесів накопичення енергії магнітного поля в індуктивній котушці

$$W_m = \frac{Li^2}{2} \quad (7.1)$$

і енергії електричного поля в конденсаторі

$$W_e = \frac{Cu^2}{2}, \quad (7.2)$$

в результаті яких збільшенню струму  $i$  в котушці перешкоджає ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L \frac{di}{dt}, \quad (7.3)$$

а заряду конденсатора (збільшення напруги  $u$ ) – поле електричних зарядів, що в ньому акумулюються, дозволяє сформулювати два закони комутації.



*Перший закон комутації.* У вітці, що містить індуктивну котушку, струм не може змінюватися стрибкоподібно, в перший момент перехідного процесу він зберігає попереднє значення:

$$i_{L(0-)} = i_{L(0+)} \quad (7.4)$$

*Другий закон комутації.* Напруга на конденсаторі не може змінюватися стрибкоподібно, в перший момент перехідного процесу вона зберігає значення, яке було до перехідного процесу:

$$u_{C(0-)} = u_{C(0+)} \quad (7.5)$$

З цих законів витікає, що функції зміни струму  $i_L$  та напруги  $u_C$  є неперервними.

Вивчення перехідних процесів у лінійних електричних колах із зосередженими параметрами зводиться до складання системи диференціальних рівнянь на основі законів Кірхгофа для миттєвих значень напруг і струмів, що діють в даному електричному колі, та їх розв'язування. Наприклад, шукану функцію струму можна записати як суму усталеної  $i_y$  та вільної  $i_e$  складових:

$$i(t) = i_y + i_e(t) \quad (7.6)$$

Процедура розв'язування рівнянь супроводжується ідентифікацією постійних інтегрування, виходячи з початкових умов процесу за допомогою законів комутації.

Розглянемо перехідні процеси в колах першого порядку з постійною напругою.

## 7.1.2 Перехідні процеси в колі з резистивним та індуктивним елементами

### 7.1.2.1 Підключення електричного кола з $R$ , $L$ елементами до джерела живлення

Для електричного кола (рис. 7.1, а) справедливе рівняння, що відповідає другому закону Кірхгофа:

$$iR + L \frac{di}{dt} = U. \quad (7.7)$$

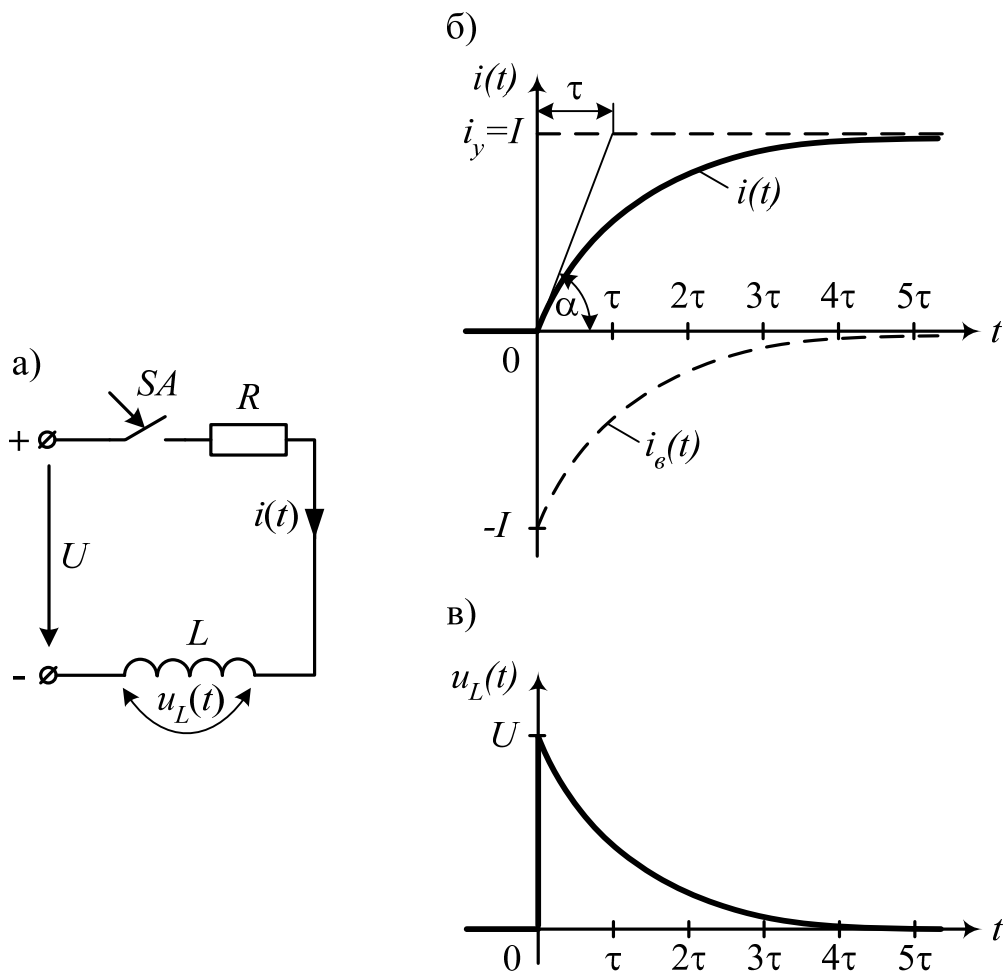


Рисунок 7.1 – Схема (а) підключення електричного кола з  $R$ ,  $L$  елементами до джерела живлення з постійною напругою та графіки перехідних процесів струму (б) й напруги (в)

Враховуючи, що в колі постійної напруги індуктивність поводить як закоротка, то ustalена складова  $i_y$  для кола рис. 7.1 запишеться у вигляді:

$$i_y = \frac{U}{R}. \quad (7.8)$$

Вільну складову  $i_v$  будемо шукати у вигляді

$$i_v(t) = Ae^{pt}, \quad (7.9)$$

де  $A$  – постійна інтегрування;

$p$  – корінь характеристичного рівняння

$$R + pL = 0, \quad (7.10)$$

записаного для (7.7). В результаті отримаємо

$$p = -\frac{R}{L}. \quad (7.11)$$

Постійну інтегрування  $A$  знайдемо з початкових умов, що відповідають першому закону комутації:

$$\begin{aligned} t &= 0; \\ i_{L(0-)} &= i_{L(0+)} = 0, \end{aligned} \quad (7.12)$$

з врахуванням яких рівняння (7.6) для  $t = 0+$  (в перший момент після подачі живлення на схему) набуде вигляду:

$$i_{(0+)} = Ae^{p \cdot 0} + \frac{U}{R} = 0, \quad (7.13)$$

звідки постійна інтегрування

$$A = -\frac{U}{R}. \quad (7.14)$$

Тому вільна складова

$$i_e = -\frac{U}{R} e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (7.16)$$

Підставивши числове значення усталеної складової (7.8) та функцію вільної складової (7.16) в рівняння (7.6), отримуємо закон зміни струму:

$$i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (7.15)$$

де  $\tau$  – постійна часу електричного кола з індуктивністю:

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (7.16)$$

Таким чином, при вмиканні кола з елементами  $R$  та  $L$  до джерела з напругою  $U$  струм в колі під час перехідного процесу наближається до свого усталеного значення  $i_y = I = U/R = \text{const}$  за експоненціальним законом (рис. 7.1, б). Постійна часу  $\tau$  відповідає проміжку часу, за який вільна складова зменшується в  $e$  раз. Практично перехідний процес триває  $4 \div 5\tau$ .

Постійну часу можна знайти і графічно. Для цього потрібно провести дотичну до графіка  $i(t)$  та визначити її кут нахилу  $\alpha$  до осі часу:

$$\tau = \frac{I}{\text{arctg}\alpha}. \quad (7.17)$$

Аналогічним чином можна записати закон зміни напруги на індуктивності  $L$  при перехідному процесі. Для цього другий закон Кірхгофа для даного кола потрібно записати у вигляді

$$iR + u_L = U, \quad (7.18)$$

струм –

$$i = \frac{1}{L} \int u_L dt. \quad (7.19)$$

З врахуванням (7.19) характеристичне рівняння для (7.18) матиме вигляд:

$$\frac{R}{L} + p = 0, \quad (7.20)$$

з якого витікає, що корінь  $p$  відповідає значенню (7.11).

Постійна інтегрування  $B$  вільної складової

$$u_{eL}(t) = Be^{pt} \quad (7.21)$$

визначається, виходячи з умови для  $t = 0+$  (в перший момент після комутації) та  $u_{L(0+)} = U: B = U$ .

З врахуванням того, що усталене значення  $u_{yL} = 0$ , а вільна складова  $u_{eL} = U$ , закон зміни напруги на індуктивності матиме вигляд:

$$u_L(t) = Ue^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7.22)$$

графічна інтерпретація якого показана на рис. 7.1, в).

### 7.1.2.2 Відключення електричного кола з $R, L$ елементами

Відключення індуктивної котушки від джерела постійного струму може супроводжуватися значними перенапругами (підвищенням напруги) на окремих ділянках кола. Для уникнення цього явища при відключенні від джерела котушки шунтуються розрядними резисторами  $R_p$  (рис. 7.2, а) або напівпровідниковим діодом.

Рівняння другого закону Кірхгофа для даного кола:

$$L \frac{di}{dt} + R_e i = 0, \quad (7.23)$$

де  $R_e$  – еквівалентний опір контуру ( $R_e = R + R_p$ ).

Рівняння перехідного процесу для струму має вигляд:

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau_1}}, \quad (7.24)$$

де  $U$  – напруга джерела перед відключенням кола;

$\tau_1$  – постійна часу кола:

$$\tau_1 = \frac{L}{R_e}. \quad (7.25)$$

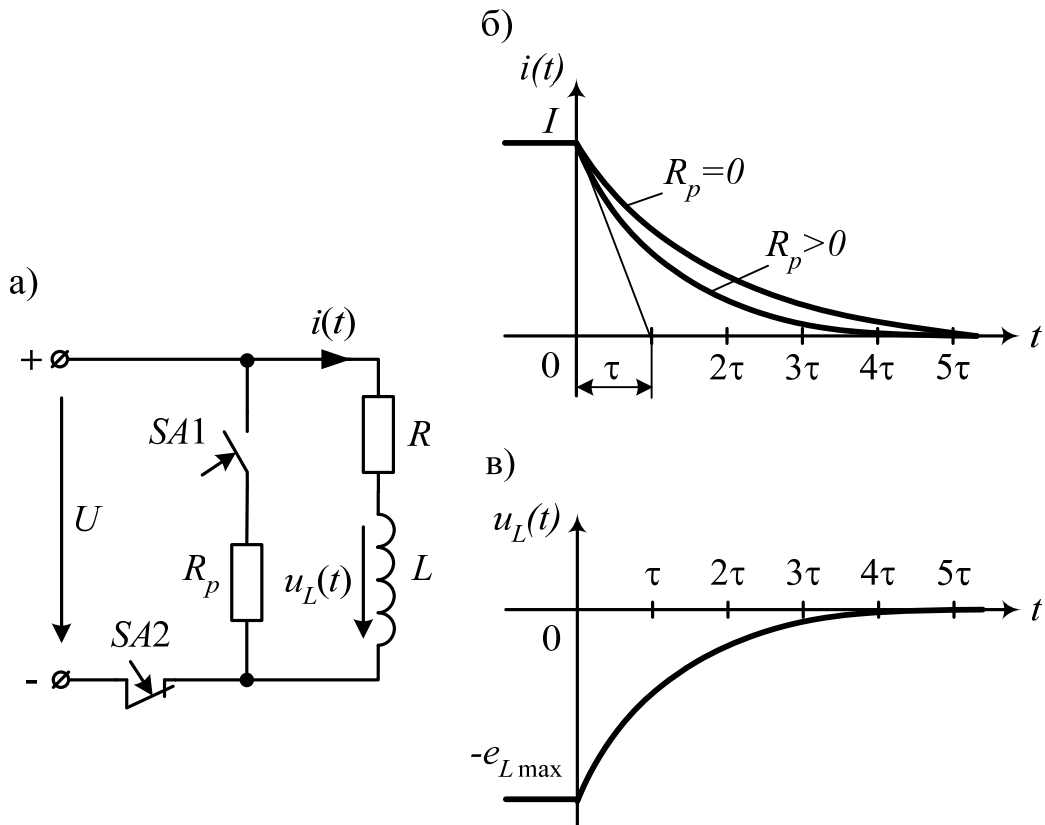


Рисунок 7.2 – Схема (а) відключення електричного кола з  $R, L$  елементами від джерела живлення з постійною напругою та графіки перехідних процесів струму (б) й напруги (в)

З рівняння (7.24) випливає, що при відключенні кола з індуктивною котушкою і замиканням її на розрядний резистор

- 1) струм в ній під час перехідного процесу зменшується від початкового значення  $I = U/R$  до нуля за експоненціальним законом (рис. 7.2, б);
- 2) збільшуючи опір  $R_p$ , можна зменшити постійну часу  $\tau_1$ , тобто зменшити тривалість перехідного процесу (рис. 7.2, б).

Підставивши отримане значення струму (7.24) в рівняння ЕРС (7.3) та взявши похідну, отримаємо рівняння, що описує ЕРС самоіндукції в котушці:

$$e_L = \left(1 + \frac{R_p}{R}\right) U e^{-\frac{t}{\tau_1}}, \quad (7.26)$$

тобто при відключенні кола з індуктивною котушкою і її замиканні на розрядний резистор в початковий момент  $t = 0$  ЕРС миттєво збільшується від нуля до максимального значення

$$e_{L \max} = \left(1 + \frac{R_p}{R}\right) U, \quad (7.27)$$

а потім спадає до нуля, як показано на рис. 7.2, в).

### **7.1.3 Перехідні процеси в колі з резистивним та ємнісним елементами**

#### **7.1.3.1 Підключення електричного кола з $R$ , $C$ елементами до джерела живлення**

На пластинах конденсатора  $C$ , включеного послідовно з резистором  $R$  в коло постійного струму з напругою  $U$  (рис. 7.3, а) будуть накопичуватися електричні заряди, тобто конденсатор буде заряджатися до величини  $u_C = U$  (вмикається лише перемикач  $SA1$ ).

Виходячи із рівності струму, що протікає через конденсатор,

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \quad (7.28)$$

і другого закону Кірхгофа

$$i_C R + u_C = U \quad (7.29)$$

отримаємо диференціальне рівняння

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U, \quad (7.30)$$

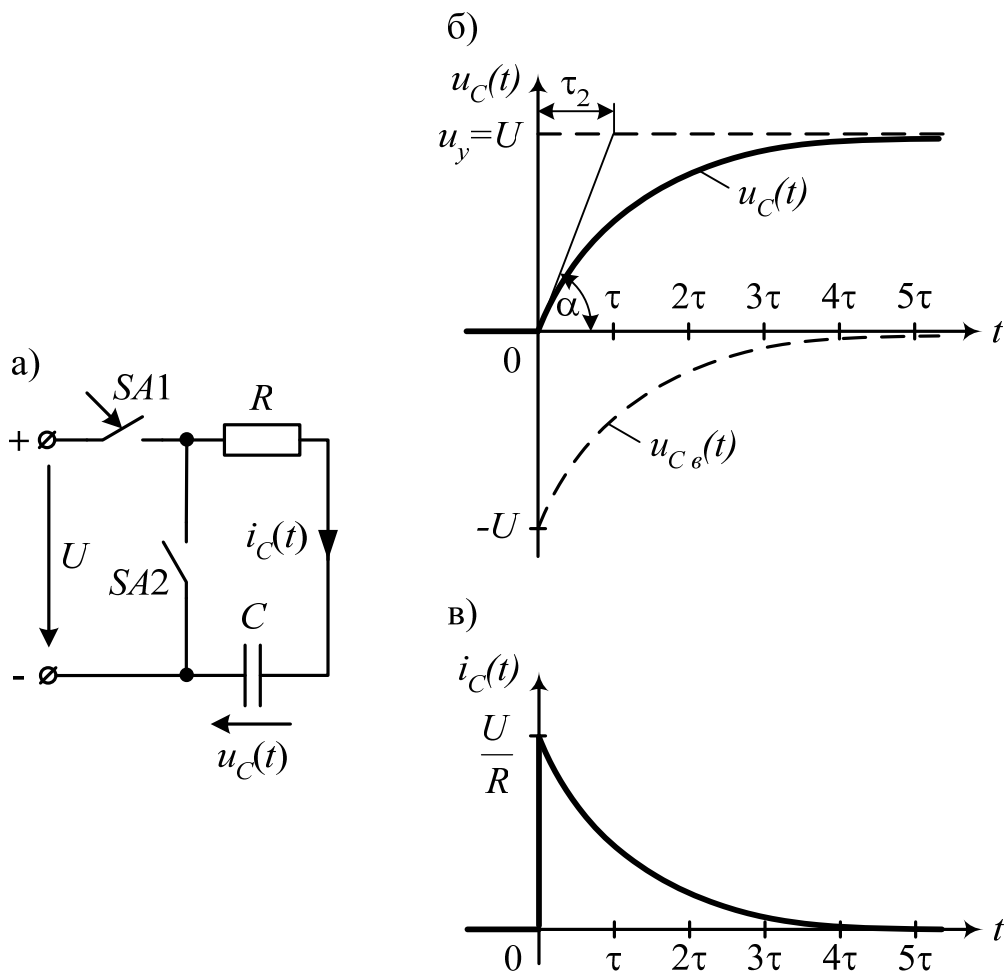


Рисунок 7.3 –Схема (а) підключення електричного кола з  $R$ ,  $C$  елементами до джерела живлення з постійною напругою та графіки перехідних процесів напруги на конденсаторі (б) й струму його заряду (в)



після інтегрування якого знаходимо рівняння перехідного процесу за напругою:

$$u_C(t) = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right), \quad (7.31)$$

де  $\tau_2$  – постійна часу кола з ємністю

$$\tau_2 = RC. \quad (7.32)$$

В рівнянні (7.31) усталена та вільна складові, відповідно, дорівнюють

$$\begin{cases} u_{C y} = U = \text{const}; \\ u_{C \theta}(t) = -U e^{-\frac{t}{\tau_2}}. \end{cases} \quad (7.33)$$

Аналіз рівняння (7.31) показує, що напруга конденсатора  $u_C$  стає рівною напрузі джерела  $U$  лише при  $t \rightarrow \infty$  (рис. 7.3, б). Процес заряджання конденсатора можна вважати закінченим при  $t = (4 \div 5)\tau_2$ . Постійна часу  $\tau_2$  знаходиться графічно, аналогічно до знаходження  $\tau$ .

Рівняння перехідного процесу струму заряджання конденсатора

$$i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (7.34)$$

яке графічно зображене на рис. 7.3, в), можна отримати, якщо в рівняння (7.29) підставити напругу (7.31).

Потрібно пам'ятати, що після відключення конденсатора від джерела він зберігає заряди і деякий час може бути джерелом енергії.

### 7.1.3.2 Розряд конденсатора на резистор

Такий процес можна реалізувати, якщо перемикач  $SA1$  буде знаходитися в розімкненому стані, а перемикач  $SA2$  замкнути (рис. 7.3, а).

Оскільки струм розряду має від'ємний знак

$$i_C = -C \frac{du_C}{dt}, \quad (7.35)$$

або в іншій формі –

$$i_C = \frac{u_C}{R}, \quad (7.36)$$

диференціальне рівняння даного процесу матиме вигляд:

$$-C \frac{du_C}{dt} = \frac{u_C}{R}. \quad (7.37)$$

В результаті інтегрування рівняння (7.37) напруга на конденсаторі описуватиметься законом

$$u_C(t) = U e^{-\frac{t}{\tau^2}}, \quad (7.38)$$

а розрядний струм –

$$i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau^2}}, \quad (7.39)$$

з яких випливає, що розрядний струм і напруга конденсатора при розряджанні зменшуються за експоненціальним законом.

- ① **Приклад 7.1.** Для електричного кола (рис. 7.4), що містить реальну індуктивну котушку з  $R_k = 10$  Ом та  $L_k = 1$  Гн, і живиться від джерела постійної напруги  $U = 100$  В, визначити значення опору розрядного резистора  $R_p$ , яким необхідно зашунтувати котушку, щоб при відключенні її від джерела максимальна напруга  $U_{k \max}$  на ній не перевищувала 300 В.

Розв'язання. Початкові умови для струму, що протікає в колі:

$$i_{\kappa(0-)} = i_{\kappa(0+)} = \frac{U}{R_{\kappa}} = \frac{100}{10} = 10 \text{ (A)}.$$

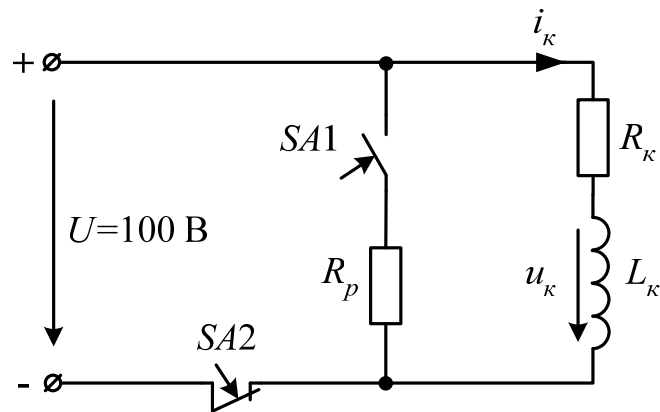


Рисунок 7.4 – Схема до прикладу 7.1

Другий закон Кірхгофа для даного кола має вигляд:

$$U = i_{\kappa} R_{\kappa} + L \frac{di_{\kappa}}{dt} = i_{\kappa} R_p.$$

В перший момент після комутації

$$u_{\kappa(0+)} = R_p i_{\kappa(0+)},$$

звідки знаходимо значення необхідного розрядного резистора:

$$R_p = \frac{u_{\kappa(0+)}}{i_{\kappa(0+)}} = \frac{U_{\kappa \max}}{i_{\kappa(0+)}} = \frac{300}{10} = 30 \text{ (Ом)}.$$

Експериментальне дослідження перехідних процесів зручно проводити з використанням електронного осцилографа та живлення електричних кіл від генератора з періодичними прямокутними імпульсами напруги тривалістю  $t_1$  (рис. 7.5, а), що перевищує час протікання перехідного процесу. Наприклад, для послідовно увімкнених  $R$  та  $L$  протягом періоду  $T$  за час  $t_1$  на екрані осцилографа (рис. 7.5, б) можна спостерігати криву зміни струму ( $i_1$ ), що відповідає процесу вмикання електричного кола на

напругу  $U = \text{const}$ , а за час  $t_2$  – коли прикладена напруга  $U = 0$ , а індуктивність замикається на розрядний резистор ( $i_2$ ). Періодична повторюваність перехідних процесів, зумовлена живленням електричного кола від генератора з періодичними прямокутними імпульсами напруги, забезпечує нерухомість зображення відповідних кривих перехідних напруг і струму на екрані осцилографа, якщо їх частота кратна частоті коливань горизонтальної розгортки осцилографа.

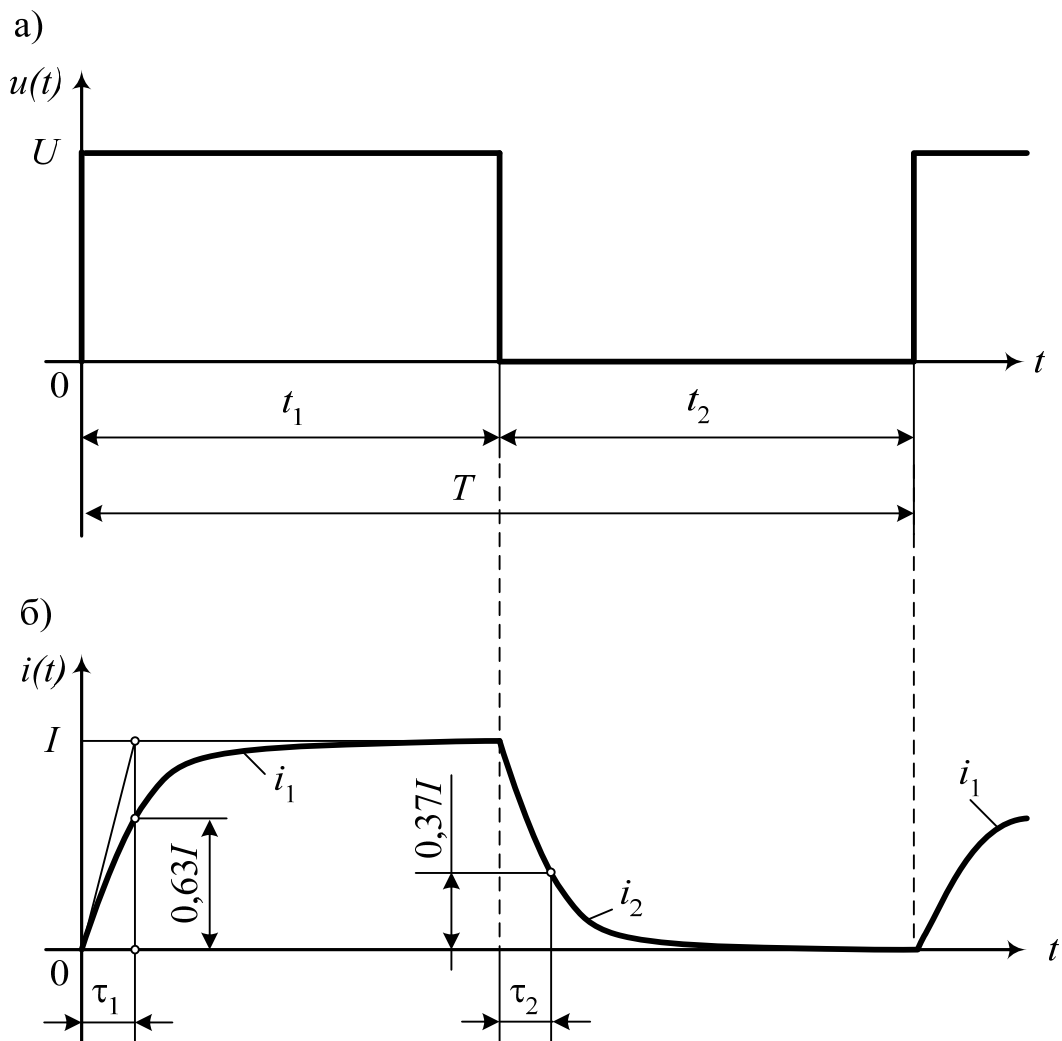


Рисунок 7.5 – Графіки зміни напруги (а), що видає генератор прямокутних імпульсів, та струму в колі з послідовно увімкненими  $R$  та  $L$  елементами

При графічному способі визначення сталих часу для уточнення проведення дотичних до кривих із зростаючим значенням напруги чи

струму слід відмічати ординату, що дорівнює 0,63 усталеного значення відповідної величини, а для кривих із спадним значенням напруги чи струму – ординату, що становить 0,37 усталеного значення цієї величини до виникнення перехідного процесу (рис. 7.5, б).

## 7.2 Програма роботи

7.2.1 Ознайомитись з електровимірювальними приладами та апаратурою, записати їх паспортні дані.

7.2.2 Зібрати схему згідно з рис. 7.6. Числові значення опору  $R$  (Ом) і ємності  $C$  (мкФ) задаються викладачем індивідуально для кожної бригади.

7.2.3 Вимикачі  $SA1$ ,  $SA2$  виставити в положення „вимкнено” і подати напругу живлення  $U$  на потенціометр  $RP$ , за допомогою якого встановити вихідну напругу, вказану викладачем.

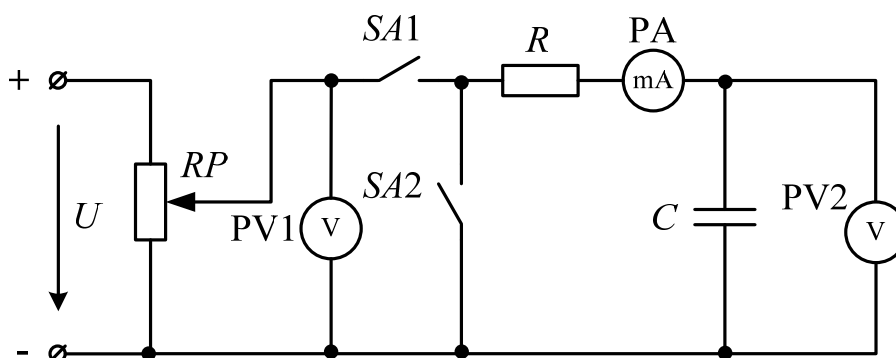


Рисунок 7.6 – Схема для проведення дослідів

7.2.4 Замкнути вимикач  $SA1$  ( $SA2$  – розімкнутий) і провести вимірювання перехідних процесів напруг і струму заряджання конденсатора. Результати вимірювань занести до табл. 7.1.

7.2.5 Розімкнути вимикач  $SA1$ , а вимикач  $SA2$  – замкнути. Провести вимірювання перехідних процесів напруг і струму розряджання конденсатора. Результати вимірювань занести до табл. 7.1.

7.2.6 За результатами вимірювань, занесених до табл. 7.1, для всіх перехідних процесів побудувати графіки  $u_C = f(t)$  та  $i = f(t)$ .

7.2.7 Для всіх дослідів визначити за даними табл. 7.1 графічним способом сталі часу.

7.2.8 Аналітично обчислити значення струмів і напруг для одного із дослідів (за вказанням викладача). Порівняти результати розрахунків і вимірювання.

7.2.9 Зробити висновки про характер змін струмів і напруг у різних колах та про величину сталих часу.

Таблиця 7.1 – Експериментальні дані перехідних процесів

Перехідні процеси	$t, \text{с}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Вмикання $R$ і $C$	$U_C, \text{В}$									
	$I, \text{мА}$									
Розрядження $C$ на $R$	$U_C, \text{В}$									
	$I, \text{мА}$									

### 7.3 Питання для самоконтролю



1. Дати означення перехідним процесам в електричних колах.
2. Дати означення та пояснення першого закону комутації.
3. Дати означення та пояснення другого закону комутації.
4. Від чого залежить величина сталої часу електричного кола, що містить індуктивність?
5. Побудувати графік змінення струму при відключенні індуктивності від джерела та шунтування резистором.
6. Від чого залежить величина сталої часу електричного кола, що містить ємність?
7. Яка є залежність між сталою часу і тривалістю перехідного процесу?
8. Чим визначають величину струму в момент вмикання електричного кола, що містить послідовно з'єднані опір та ємність?

9. За яких умов виникають аперіодичний і коливальний розряди конденсатора?
10. Чим визначають величину періоду коливань струму при заряджанні та розряджанні конденсатора?

### 7.4 Задачі для самостійного розв’язування

7.4.1 Котушка з параметрами  $R$  і  $L$  включається в коло постійного струму (рис. 7.7, а), до затискачів якого прикладена постійна напруга  $U$ . Вказати аналітичний вираз, який встановлює закон зміни струму  $i(t)$ , що протікає в котушці після включення вимикача  $SA$ .

Варіанти відповідей:

- |   |  |
|---|--|
| 1) $i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{L}} \right);$  | 2) $i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 + e^{-\frac{t}{L/R}} \right);$ |
| 3) $i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{R}} \right);$  | 4) $i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 + e^{-\frac{t}{R}} \right);$   |
| 5) $i(t) = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{L}} \right);$ | 6) інша відповідь.   |

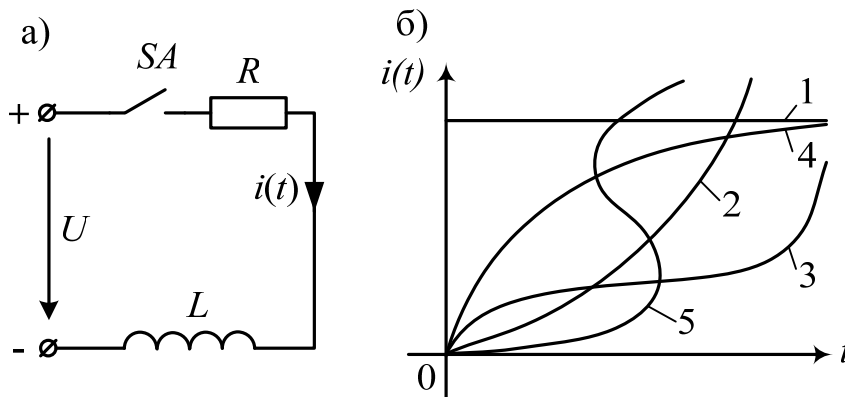


Рисунок 7.7 – Схема (а) до задач 7.4.1 – 7.4.3 та графік зміни струму (б) до задачі 7.4.4

7.4.2 Котушка, яка характеризується опором  $R = 10$  Ом та індуктивністю  $L = 1$  Гн, включається в коло постійного струму (рис. 7.7, а) з  $U = 100$  В. Визначити постійну часу  $\tau$  та час  $t_0$ , за який в колі встановиться стаціонарний режим.

Варіанти відповідей:

- |                                    |                                     |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1) $\tau = 1$ с, $t_0 = 4$ с;      | 2) $\tau = 0,01$ с, $t_0 = 0,05$ с; |
| 3) $\tau = 0,1$ с; $t_0 = 0,45$ с; | 4) $\tau = 10$ с; $t_0 = 50$ с;     |
| 5) $\tau = 11$ с; $t_0 = 44$ с;    | 6) інша відповідь.                  |

7.4.3 Котушка, яка характеризується опором  $R = 10$  Ом та індуктивністю  $L = 1$  Гн, включається в коло постійного струму (рис. 7.7, а). До затискачів кола прикладена постійна напруга  $U = 100$  В. Визначити значення  $i(t)$ , що протікатиме в котушці через проміжок часу  $t = 0,1$  с після увімкнення вимикача  $SA$ .

Варіанти відповідей:

- |                 |                    |
|-----------------|--------------------|
| 1) $I = 5,2$ А; | 2) $I = 6,3$ А;    |
| 3) $I = 7$ А;   | 4) $I = 7,5$ А;    |
| 5) $I = 8$ А;   | 6) інша відповідь. |

7.4.4 Котушка з параметрами  $R$  і  $L$  включена в електричне коло (рис. 7.7, а), на затискачах якого діє постійна напруга  $U$ . Вказати на рис. 7.7, б) графік зміни струму  $i(t)$ , що протікає в котушці після замикання вимикача  $SA$ .

7.4.5 Котушка з параметрами  $R$  і  $L$  вимикачем  $SA1$  включається в коло постійного струму через резистор  $R_1$  (рис. 7.8, а). До затискачів кола прикладена постійна напруга  $U$ . Через проміжок часу  $t_0 = (4 \div 5)\tau$  в колі встановлюється стаціонарний режим. Потім вимикачем  $SA1$  котушка відключається від кола і одночасно вимикачем  $SA2$  замикається накоротко. Вказати аналітичний вираз, який описує закон зміни струму, що протікає в котушці після її відключення та вказати відповідний йому графік з рис. 7.8, б).



Варіанти відповідей:

$$1) i(t) = \frac{U}{R_1 + R} e^{-\frac{t}{L/R_1}};$$

$$2) i(t) = \frac{U}{R_1 + R} e^{-\frac{t}{L/(R_1+R)}};$$

$$3) i(t) = \frac{U}{R_1} e^{-\frac{(R_1+R)}{L}t};$$

$$4) i(t) = \frac{U}{R_1 + R} e^{-\frac{t}{L/R}};$$

$$5) i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{(R_1+R)}{L}t};$$

б) інша відповідь.

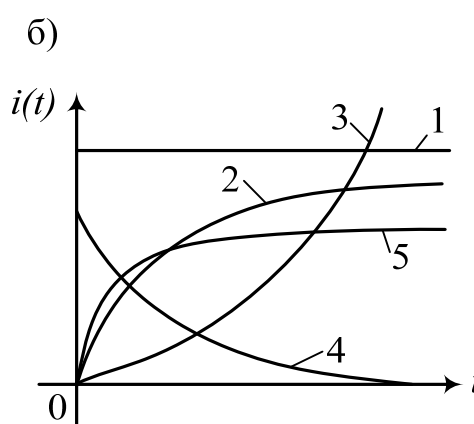
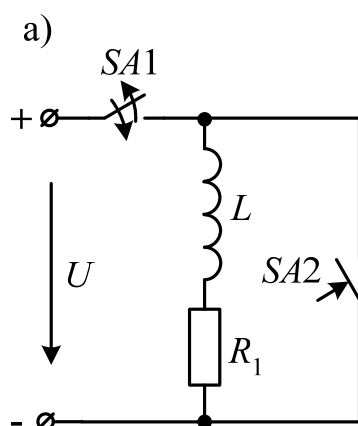


Рисунок 7.8 – Схема (а) та графіки (б) зміни струму до задачі 7.4.5

7.4.6 Конденсатор ємністю  $C$ , з'єднаний послідовно з резистором опором  $R$ , включений в коло постійного струму, до затискачів якого прикладена постійна напруга  $U$  (рис. 7.9, а). Вказати аналітичний вираз, який описує закон зміни напруги на конденсаторі  $u_C(t)$  та її графік після включення вимикача  $SA$  (рис. 7.9, б).

Варіанти відповідей:

$$1) u_C(t) = U \left( 1 + e^{-\frac{t}{RC}} \right);$$

$$2) u_C(t) = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{R}} \right);$$

$$3) u_C(t) = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{C}} \right);$$

$$4) u_C(t) = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right);$$

$$5) u_C(t) = U \left( 1 - e^{-\frac{t}{C}} \right);$$

б) інша відповідь.

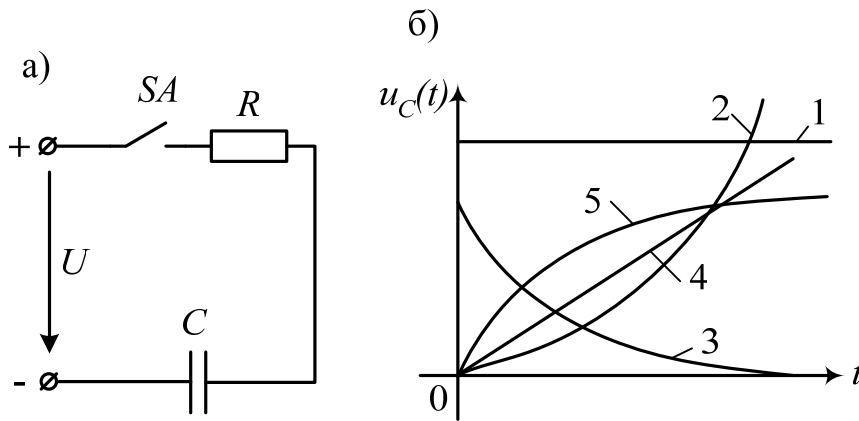


Рисунок 7.9 – Схема (а) та графіки (б) зміни струму до задачі 7.4.6

7.4.7 Конденсатор ємністю  $C$ , з'єднаний послідовно з резистором  $R$ , включений в коло постійного струму з напругою  $U$  на затискачах (рис. 7.9, а). Вказати аналітичний вираз, який описує закон зміни струму заряду конденсатора  $i_C(t)$  та його графік (рис. 7.10) після замикання вимикача  $SA$ .

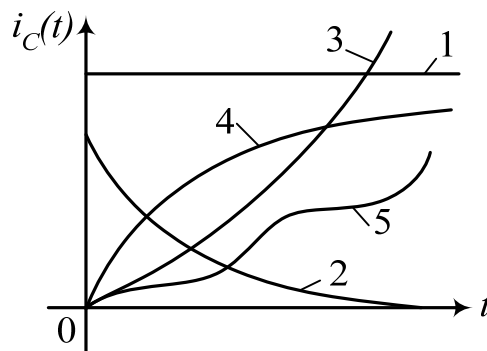


Рисунок 7.10 – Графіки зміни струму до задачі 7.4.7

Варіанти відповідей:

$$1) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$2) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$3) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$4) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{C}};$$

$$5) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{Rt}{C}};$$

б) інша відповідь.

7.4.8 Конденсатор ємністю  $C$ , заряджений до напруги  $U$ , розряджається на резистор опором  $R$  (рис. 7.11, а). Вказати аналітичний вираз, який описує закон зміни напруги на конденсаторі  $u_C(t)$  та його графік (рис. 7.11, б) після включення перемикача  $SA$ .

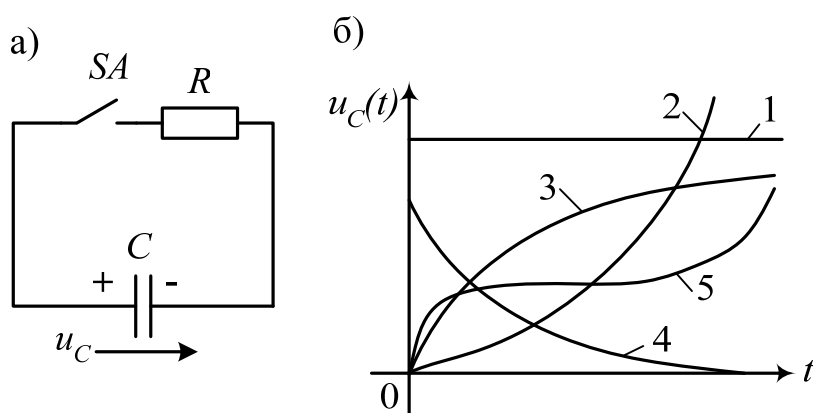


Рисунок 7.11 – Схема (а) та графіки (б) зміни напруги до задачі 7.4.8

Варіанти відповідей:

$$1) u_C(t) = U e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$2) u_C(t) = U e^{\frac{t}{RC}};$$

$$3) u_C(t) = U e^{-\frac{Rt}{C}};$$

$$4) u_C(t) = U e^{-\frac{Ct}{R}};$$

$$5) u_C(t) = U e^{\frac{Rt}{C}};$$

б) інша відповідь.

7.4.9 Конденсатор ємністю  $C$ , заряджений до напруги  $U$ , розряджається на резистор опором  $R$  (рис. 7.11, а). Вказати аналітичний вираз, який описує закон зміни струму на конденсаторі  $i_C(t)$ , а також графік зміни струму (рис. 7.11, б) після замикання вимикача  $SA$ .

Варіанти відповідей:

$$1) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{\frac{t}{RC}};$$

$$2) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{\frac{Rt}{C}};$$

$$3) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{\frac{Ct}{R}};$$

$$4) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}};$$

$$5) i_C(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{RC}{t}};$$

6) інша відповідь.

### 7.5 Вправи для закріплення матеріалу

Розглянемо перехідний процес, що протікає в схемі при вмиканні активного опору  $R = 30$  Ом та індуктивності  $L = 30$  Гн на постійну напругу  $U = 1$  В (рис. 7.12). Для цього скористаємося реле часу  $SA$  (так в Electronics Workbench називається перемикач із програмованим часом перемикання), для якого задамо за допомогою діалогового вікна (рис. 7.13) такі параметри:  $TON = 1$  с (час вмикання нормально розімкненого контакту після початку моделювання),  $TOFF = 0$  с (час вимикання – повернення контакту в початкове положення; цей час відраховується від моменту початку моделювання).

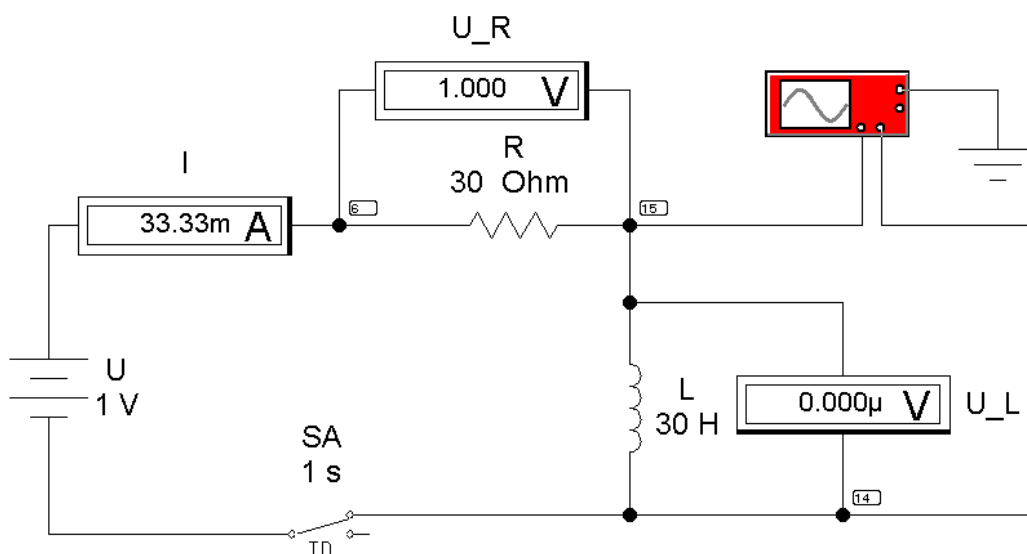


Рисунок 7.12 – Схема для дослідження перехідних процесів в Electronics Workbench

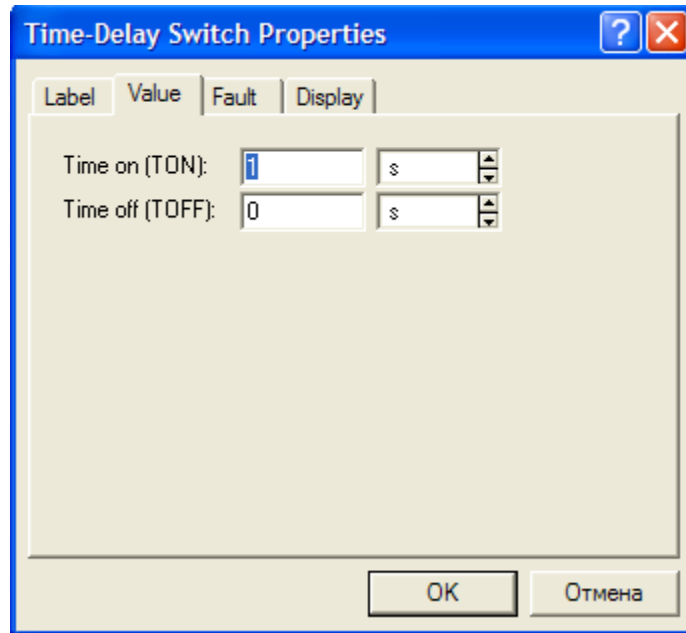


Рисунок 7.13 – Вікно установлення параметрів реле часу

Досліджувати перехідні процеси в Electronics Workbench можна двома способами: за допомогою осцилографа Oscilloscope та за допомогою вбудованої функції Transient..., яка для цього в принципі й призначена. Покажемо обидва способи.

На рис. 7.12 вже показано яким чином потрібно підключити до схеми осцилограф для поставленої мети. При цьому він буде показувати осцилограми напруг для двох точок ( в даному випадку це точки 15 – по каналу А (Channel A, A trace) та 14 – по каналу В (Channel B, B trace).

Для того, щоб на схемі були видні точки з'єднання, необхідно виконати такі дії: підвести курсор до точки з'єднання, натиснути праву кнопку миші та відкрити опцію Component Properties..., що приведе до появи вікна (рис. 7.14), в якому під міткою Node ID показано номер точки з'єднання (в даному випадку – це 15). Для того, щоб вона була висвітлена на екрані, необхідно відмітити опцію Display node label та вибрати колір, яким хочете, щоб вказана точка з'єднання та всі лінії, що належать даному з'єднанню, виділялись.

Осцилограми для обох каналів зображені на рис. 7.15, з якого видно, що перехідний процес починається при  $t = 1$  с (як і було передбачено).

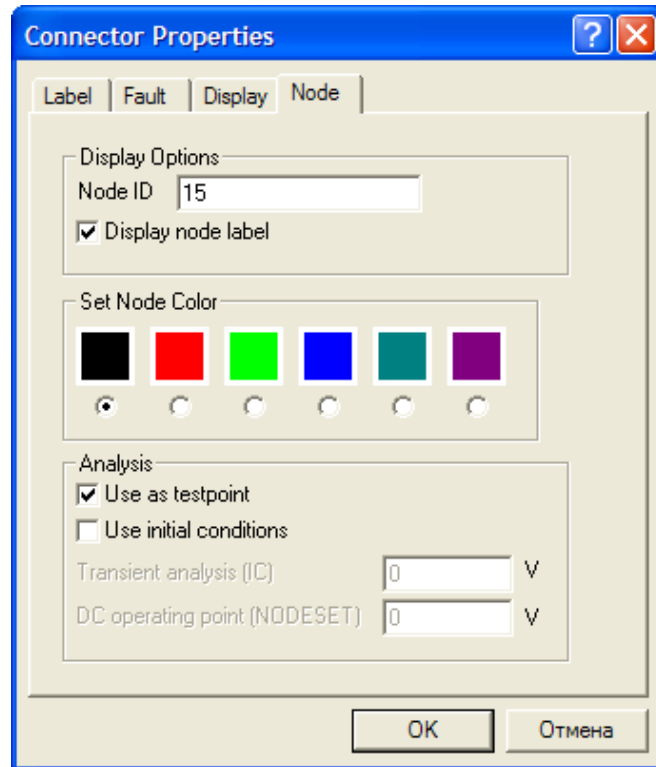


Рисунок 7.14 – Вікно установлення точки з'єднання

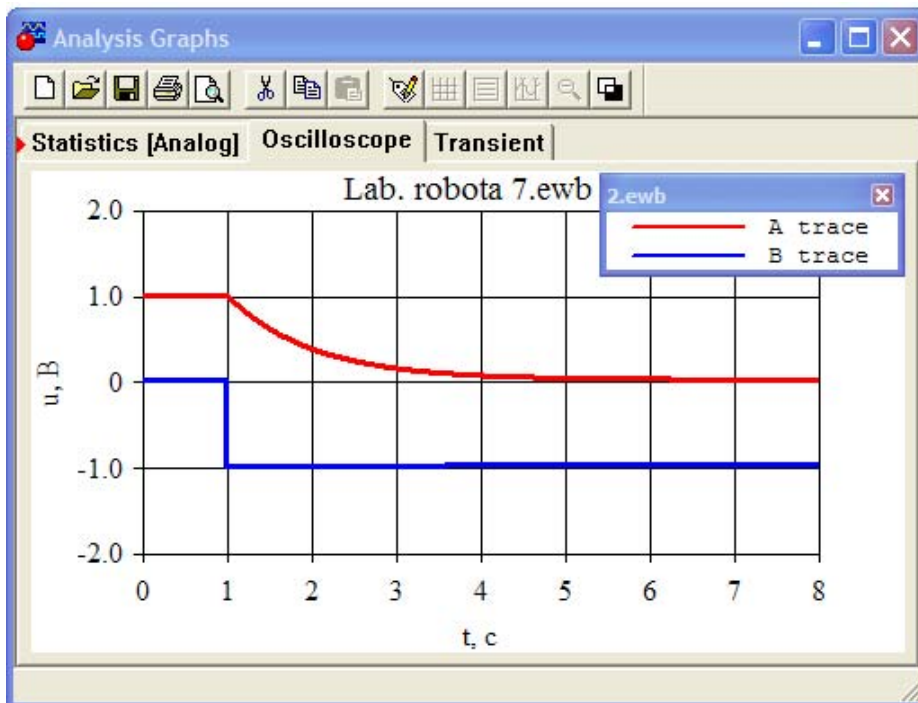


Рисунок 7.15 – Результат моделювання перехідного процесу схеми, зображеної на рис. 7.12, за допомогою осцилографа

Осцилограми показують, що до початку комутації до точки з'єднання резистора  $R$  з індуктивністю  $L$  (точка 15) прикладений позитивний потенціал, рівний напрузі джерела живлення  $U$ , а до точки 14 (точка з'єднання індуктивності  $L$  з реле часу  $SA$ ) – нульовий потенціал, що відповідає схемі.

В перший момент комутації ( $t = 1$  с) до точки 14 відразу прикладається від'ємний потенціал, рівний напрузі джерела живлення  $U$ , а на індуктивності  $L$  напруга за експоненціальним законом спадає до нульового значення (через те, що на постійному струмі індуктивність веде себе як замкнутість). Перехідний процес можна вважати завершеним при  $t = 5$  с. На рис. 7.12 покази вимірювальних приладів зафіксовано після закінчення перехідного процесу.

Для другого способу дослідження перехідних процесів за допомогою вбудованої функції Transient..., яка викликається з меню Analysis (рис. 7.16), необхідно встановити параметри для моделювання:

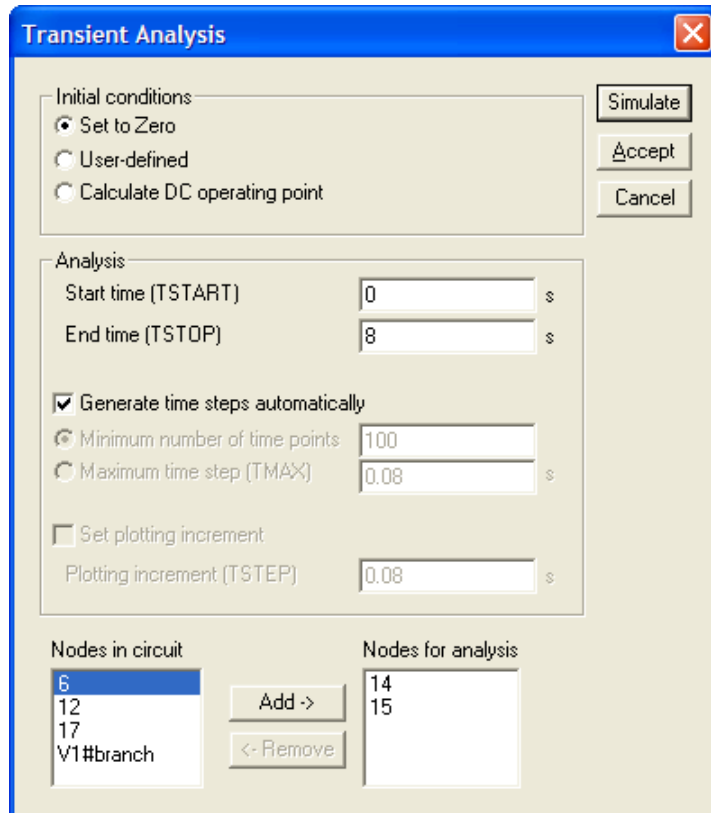


Рисунок 7.16 – Діалогове вікно для задання режимів моделювання перехідних процесів

- Initial conditions – задання початкових умов моделювання (Set to Zero –установлення в нульове положення контрольно-вимірювальних приладів перед початком моделювання; User-defined – управління процесом моделювання здійснюється користувачем; Calculate DC operating point – виконання розрахунку режиму за постійним струмом);

- Analysis – задання параметрів моделювання (TSTART – час початку аналізування перехідних процесів; TSTOP – час закінчення аналізування; Generate time steps automatically – розрахунок перехідних процесів із змінним кроком, що вибирається автоматично залежно від допустимої відносної похибки, що задається у вікні меню Analysis> Analysis Options...);

- Nodes for analysis – необхідні точки для моделювання (функція Nodes in circuit показує наявність всіх можливих точок з'єднань схеми, що моделюється).

В результаті натискання кнопки Simulate (рис. 7.16) автоматично з'являється вікно Analysis Graphs, в якому і зображено графік перехідного процесу (рис. 7.17).

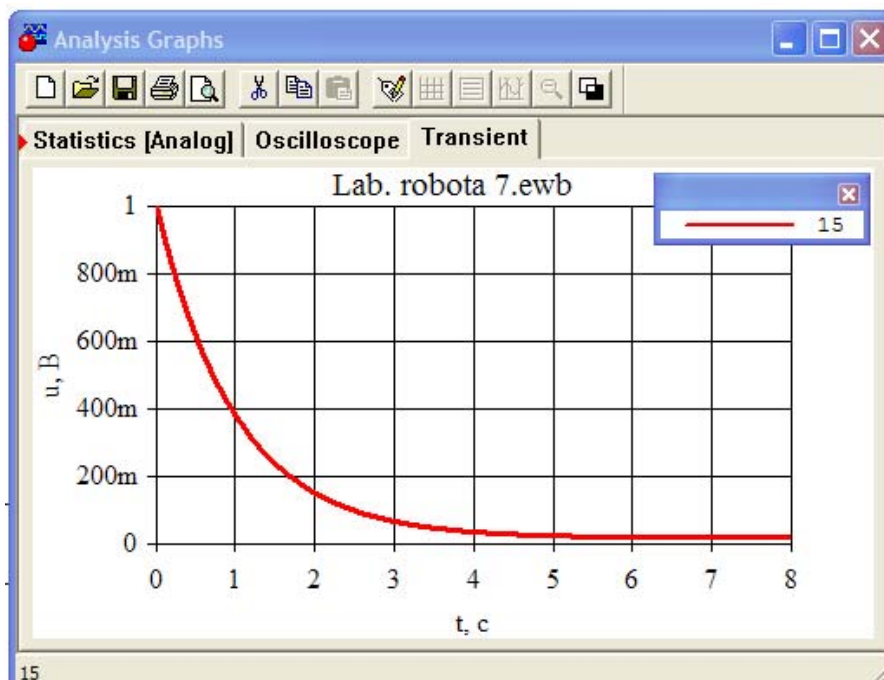


Рисунок 7.17 – Результат моделювання перехідного процесу схеми (рис. 7.12) за допомогою функції Transient...



---

**Література**

1. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. – М.: «Солон-Р», 2000. – 506 с.
2. Шабатура Ю.В., Присяжнюк В.В. Комп'ютерне моделювання електронних схем. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 142 с.
3. Трегуб А.П. Электротехника / Под ред. Э.В. Кузнецова. – К.: Вища школа, Головное изд-во, 1987. – 600 с.
4. Иванов А.А. Электротехника. Лабораторные работы. Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа. Головное изд-во, 1982. – 343 с.
5. Кисаримов Р.А. Настройка электрооборудования. Справочник. – М.: ИП РадиоСофт, 2004. – 352 с.
6. Баланівський С.М. Загальна електротехніка. – Львів, 2003.
7. Паначевний Д.І. Курс електротехніки. – Харків: ХАІ, 1999. – 88 с.
8. Мурзін В.К. Загальна електротехніка. – Полтава, Кременчук, 2001. – 323 с.
9. Паначевний Д.І., Звергун Ю.С. Загальна електротехніка. Теорія і практика. – К.: Каравела, 2003. – 438 с.
10. Борисов Ю.М., Клепатов В.М., Зорин Ю.М. Электротехника. – М.: Высшая школа, 1985. – 552 с.
11. Иванов А.О. Лабораторні роботи з електротехніки. – К.: Вища школа, 1980. – 329 с.
12. Березина Т.С., Гусев Н.Г., Масленников В.В. Задачник по общей электротехники с основами электроники. – М.: Высшая школа, 1991. – 380 с.
13. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1987. – 286 с.
14. Загальна електротехніка. Збірник програмованих задач / За ред. В.Б. Гайдаки. – К.: Вища школа, 1976. – 192 с.

## Додаток А

### Зразок оформлення титульного аркуша звіту з лабораторної роботи

Міністерство освіти та науки України  
Вінницький національний технічний університет

Інститут \_\_\_\_\_  
(назва інституту)

Факультет \_\_\_\_\_  
(назва факультету)

Кафедра \_\_\_\_\_  
(назва кафедри)

Лабораторна робота №1  
Дослідження розгалуженого лінійного кола постійного струму

Виконали: ст. гр. \_\_\_\_\_  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б. студента)

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б. студента)

\_\_\_\_\_  
(П.І.Б. студента)

Перевірив: \_\_\_\_\_  
(посада, П.І.Б. викладача)

**Додаток Б**  
**Одиниці міжнародної системи (SI)**

Таблиця Б.1 – Одиниці міжнародної системи

Найменування величини	Одиниця		
	Назва	Позначення	
		Українське	Міжнародне
<i>Основні одиниці</i>			
Довжина	метр	м	m
Маса	кілограм	кг	kg
Час	секунда	с	s
Сила електричного струму	ампер	А	A
Термодинамічна температура	кельвін	К	K
Кількість речовини	моль	моль	mol
Сила світла	кандела	кд	cd
<i>Додаткові одиниці</i>			
Плоский кут	радіан	рад	rad
Тілесний кут	стерадіан	ср	sr
<i>Похідні одиниці електричних і магнітних величин</i>			
Густина електричного струму	ампер на квадратний метр	А/м <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>
Кількість електрики, електричний заряд	кулон	Кл	C
Поверхнева густина електричного заряду	кулон на квадратний метр	Кл/м <sup>2</sup>	C/m <sup>2</sup>
Електрична напруга, електричний потенціал, різниця електричних потенціалів, ЕРС	вольт	В	V
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	V/m

Найменування величини	Одиниця		
	Назва	Позначення	
		Українське	Міжнародне
Електрична ємність	фарад	Ф	F
Абсолютна діелектрична проникність	фарад на метр	Ф/м	F/m
Електричний опір	ом	Ом	$\Omega$
Питомий електричний опір	ом-метр	Ом·м	$\Omega \cdot m$
Електрична провідність	сименс	См	S
Питома електрична провідність	сименс на метр	См/м	S/m
Магнітний потік	вебер	Вб	Wb
Магнітна індукція	тесла	Тл	T
Індуктивність, взаємна індуктивність	генрі	Гн	H
Абсолютна магнітна проникність, магнітна стала	генрі на метр	Гн/м	H/T
Намагніченість, напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	A/m
Магніторушійна сила	ампер	А	A
Магнітний опір	ампер на вебер	А/Вб	A/Wb
Магнітна провідність	вебер на ампер	Вб/А	Wb/A
Електромагнітна енергія	джоуль	Дж	J
Активна потужність	ват	Вт	W
Реактивна потужність	вар	вар	var
Повна потужність	вольт-ампер	В·А	V·A

## Додаток В

### Позначення елементів електричних схем

Таблиця В.1 – Буквені коди найбільш поширених видів елементів (ГОСТ 2.710-81)

Елементи	Код
Пристрій. Загальне позначення	<i>A</i>
Перетворювачі неелектричних величин в електричні (крім генераторів і джерел живлення; аналогові і багато розрядні перетворювачі; сенсори для показу або вимірювання:	<i>B</i>
гучномовець	<i>BA</i>
магнітострикційний елемент	<i>BB</i>
детектор іонізуючих випромінювань	<i>BD</i>
сельсин-приймач	<i>BE</i>
телефон (капсуль)	<i>BF</i>
сельсин-сенсор	<i>BC</i>
тепловий сенсор	<i>BK</i>
фотоелемент	<i>BL</i>
мікрофон	<i>BM</i>
сенсор тиску	<i>BP</i>
п'єзоелемент	<i>BQ</i>
сенсор частоти обертання (тахогенератор)	<i>BR</i>
сенсор швидкості	<i>BV</i>
Конденсатори	<i>C</i>
Схеми інтегральні, мікрозборки:	<i>D</i>
схема інтегральна аналогова	<i>DA</i>
схема інтегральна цифрова, логічний елемент	<i>DD</i>
пристрій зберігання інформації	<i>DS</i>
пристрій затримки	<i>DT</i>

Продовження табл. В.1

Елементи	Код
Елементи різні:	<i>E</i>
нагрівальний елемент	<i>EK</i>
лампа освітлювальна	<i>EL</i>
піропатрон	<i>ET</i>
Розрядники, запобіжники, пристрої захисту:	<i>F</i>
дискретний елемент захисту за струмом миттєвої дії	<i>FA</i>
дискретний елемент захисту за струмом інерційної дії	<i>FP</i>
запобіжник плавкий	<i>FU</i>
дискретний елемент захисту за напругою, розрядник	<i>FV</i>
Генератори, джерела живлення:	<i>G</i>
батарея	<i>GB</i>
Пристрої індикаційні і сигнальні:	<i>H</i>
прилад звукової сигналізації	<i>HA</i>
індикатор символічний	<i>HG</i>
прилад світлової сигналізації	<i>HL</i>
Реле, контактори, пускачі:	<i>K</i>
реле струмове	<i>KA</i>
реле вказівне	<i>KH</i>
реле електротеплове	<i>KK</i>
контактор, магнітний пускач	<i>KM</i>
реле часу	<i>KT</i>
реле напруги	<i>KV</i>
Котушки індуктивності, дроселі, реактори	<i>L</i>
Двигуни	<i>M</i>

Продовження табл. В.1

Елементи	Код
Прилади вимірювальні:	<i>P</i>
амперметр	<i>PA</i>
лічильник імпульсів	<i>PC</i>
частотомір	<i>PF</i>
лічильник активної енергії	<i>PI</i>
лічильник реактивної енергії	<i>PK</i>
омметр	<i>PR</i>
Реєструвальний прилад:	<i>PS</i>
годинник; вимірювач часу, дії	<i>PT</i>
вольтметр	<i>PV</i>
ваттметр	<i>PW</i>
Вимикачі і роз'єднувачі в силових колах:	<i>Q</i>
вимикач автоматичний	<i>QF</i>
короткозамикач	<i>QK</i>
роз'єднувач	<i>QS</i>
Резистори:	<i>R</i>
терморезистор	<i>RK</i>
потенціометр	<i>RP</i>
шунт вимірювальний	<i>RS</i>
варистор	<i>RU</i>
Пристрої комунікаційні в колах управління, сигналізації і вимірювальних:	<i>S</i>
вимикач або перемикач	<i>SA</i>
вимикач кнопковий	<i>SB</i>
вимикач автоматичний	<i>SF</i>

Продовження табл. В.1

Елементи	Код
вимикач, що спрацьовує від різних впливів:	
рівня	<i>SL</i>
тиску	<i>SP</i>
положення (шляховий)	<i>SQ</i>
частоти обертання	<i>SR</i>
температури	<i>SK</i>
Трансформатори, автотрансформатори:	<i>T</i>
трансформатор струму	<i>TA</i>
трансформатор напруги	<i>TV</i>
Пристрої зв'язку. Перетворювачі неелектричних величин в електричні:	
модулятор	<i>U</i>
демодулятор	<i>UY</i>
дискримінатор	<i>UR</i>
перетворювач частоти, інвертор, генератор частоти, випрямляч	<i>UI</i>
Прилади електровакуумні і напівпровідникові	<i>V</i>
діод, стабілітрон	<i>VD</i>
прилад електровакуумний	<i>VL</i>
транзистор	<i>VT</i>
тиристор	<i>VS</i>
Лінії і елементи СВЧ. Антени:	<i>W</i>
відгалужувач	<i>WE</i>
короткозамикач	<i>WK</i>
вентиль	<i>WS</i>
трансформатор, фазообертач	<i>WT</i>
антена	<i>WA</i>



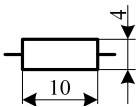

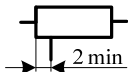

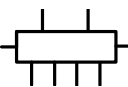
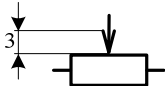
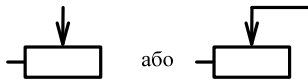
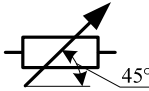
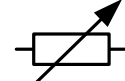
Продовження табл. В.1

Елементи	Код
З'єднання контактні:	<i>X</i>
струмознімач, контакт ковзний	<i>XA</i>
штир	<i>XP</i>
гніздо	<i>XS</i>
з'єднання розбірне	<i>XT</i>
з'єднувач високочастотний	<i>XW</i>
Пристрої механічні з електромагнітними приводами:	<i>Y</i>
електромагніт	<i>YA</i>
гальмо з електромагнітним приводом	<i>YB</i>
муфта з електромагнітним приводом	<i>YC</i>
електромагнітний патрон або плита	<i>YH</i>
Пристрої кінцеві, фільтри, обмежувачі	<i>Z</i>
обмежувач	<i>ZL</i>
фільтр кварцовий	<i>ZQ</i>

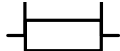
## Додаток Д

### Графічні позначення елементів

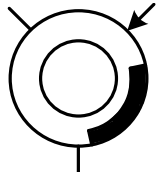
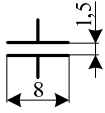

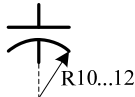
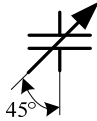

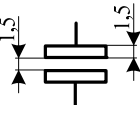
Таблиця Д.1 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 728-74

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Резистор постійний	
2	Резистор постійний з додатковими відводами: 1) одним симетричним 2) одним несиметричним 3) з двома <i>Примітка:</i> якщо резистор має більше двох додаткових відводів, то допускається збільшувати довгу сторону	   
3	Резистор змінний <i>Примітка:</i> 1) стрілка позначає рухомий контакт 2) вивід, який не використовується, дозволяється не зображати 3) для змінного резистора в реостатному ввімкненні допускається використовувати таке позначення: а) загальне позначення б) з нелінійним регулюванням	   

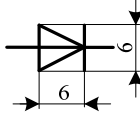

Продовження табл. Д.1

№ ел.	Опис	Графічне позначення
4	Резистор змінний з декількома рухомими контактами:  1) механічно не зв'язаними  2) механічно зв'язаними	
5	Шунт вимірювальний	
6	Терморезистор прямого підігріву	
7	Резистор підстроювальний <i>Примітка:</i> 1) вивід, який не використовується, дозволяється не зображати 2) для підстроювального резистора в реостатному включенні допускається використовувати таке позначення	
8	Потенціометр функціональний	
9	Потенціометр функціональний кільцевий замкнутий однообмотковий з одним рухомим контактом і двома відводами	
10	Потенціометр функціональний кільцевий замкнутий однообмотковий з ізолюваною ділянкою	

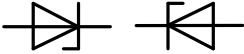

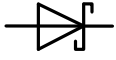
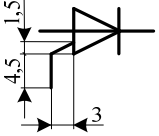
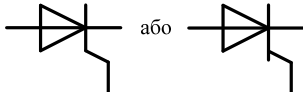

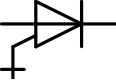
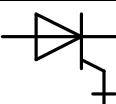

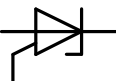
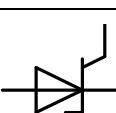
Продовження табл. Д.1

№ ел.	Опис	Графічне позначення
11	Потенціометр функціональний кільцевий замкнутий однообмотковий з короткозамкнутою ділянкою	
12	Конденсатор постійної ємності <i>Примітка:</i>	
	1) для того щоб вказати полярність конденсатора використовують позначення	
	2) якщо необхідно вказати рухому обкладку, то її потрібно зображати в вигляді дуги	
13	Конденсатор змінної ємності	
14	Конденсатор електролітичний поляризований	
15	Конденсатор електролітичний неполяризований	

Таблиця Д.2 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.730-73

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Діод	
2	Тунельний діод	

Продовження табл. Д.2

№ ел.	Опис	Графічне позначення
3	Стабілітрон:	
	1) односторонній	
	2) двосторонній	
4	Діод Шоткі	
5	Тиристор тріодний, який запирається в зворотному напрямку:	
	1) з управлінням за анодом	
	2) з управлінням за катодом	
6	Тиристор тріодний вимикний, який запирається в зворотному напрямку:	
	1) загальне позначення	
	2) з управлінням за анодом	
	3) з управлінням за катодом	
7	Тиристор тріодний, який проводить в зворотному напрямку:	
	1) загальне позначення	
	2) з управлінням за анодом	
	3) з управлінням за катодом	

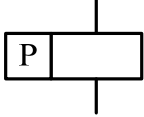
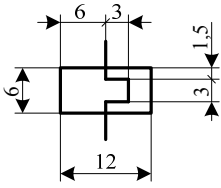
Продовження табл. Д.2

№ ел.	Опис	Графічне позначення
8	Транзистор р-п-р <i>Примітка:</i> Допускається позначення транзисторів зображати в дзеркальному відображенні	
9	Транзистор n-p-n	
10	Емітер транзистора	
11	Транзистор польовий	
12	Транзистор польовий з ізолюваним затвором	
13	Фоторезистор:	
	1) загальне позначення	
2) диференційний		
14	Фотодіод	
15	Фототиристор	
16	Фототранзистор (р-п-р та n-p-n, відповідно)	
		

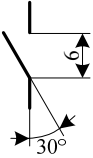

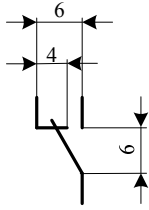

Таблиця Д.3 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.756-76

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Котушка електромагнітного пристрою <i>Примітка:</i>	
	виводи котушки дозволяється зображати з однієї сторони прямокутника	
2	Котушка електромеханічного пристрою трифазного струму	
3	Котушка електромеханічного пристрою з додатковим графічним полем <i>Примітка:</i>	
	в додатковому полі вказують уточнювальні дані електромеханічного пристрою, напр., електромагніт змінного струму	
4	Котушка електромеханічного пристрою з зазначенням виду обмотки:	
	1) обмотка струму	
	2) обмотка напруги	
	3) обмотка максимального струму	
	4) обмотка мінімальної напруги	

Продовження табл. Д.3

№ ел.	Опис	Графічне позначення
5	Котушка поляризованого електромеханічного пристрою	
6	Сприймальна частина електротеплового реле	

Таблиця Д.4 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.755-87

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Контакт комутаційного пристрою, що замикається	
2	Контакт комутаційного пристрою, що розмикається	
3	Контакт комутаційного пристрою, що переключає	
4	Контакт комутаційного пристрою, що переключає, з нейтральним центральним положенням	



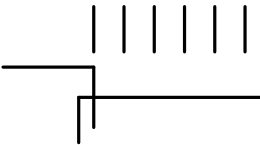
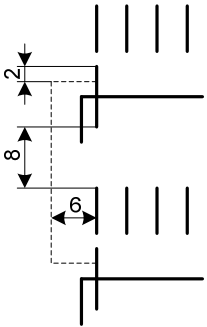
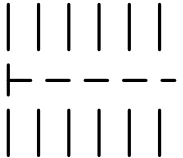
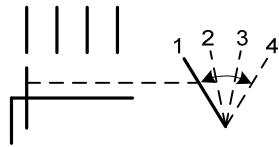
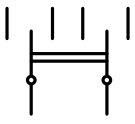
Продовження табл. Д.4

№ ел.	Опис	Графічне позначення
5	Контакт комутаційного пристрою, що переключає без розмикання кола	
6	Контакт, який замикається з витримкою часу при спрацьовуванні	
7	Контакт, який замикається з витримкою часу при поверненні	
8	Контакт, який замикається з витримкою часу при спрацьовуванні і поверненні	
9	Контакт, який розмикається з витримкою часу при спрацьовуванні	
10	Контакт, який розмикається з витримкою часу при поверненні	
11	Контакт, який розмикається з витримкою часу при спрацьовуванні і поверненні	
12	Вимикач кнопковий нажимний з контактом, що замикається	
13	Вимикач кнопковий нажимний з контактом, що розмикається	
14	Контакт контактного з'єднання розбірного з'єднання	

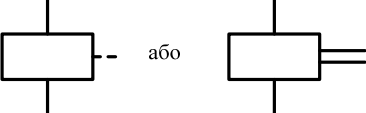
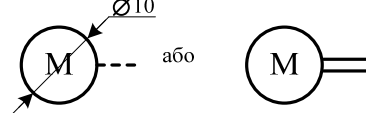
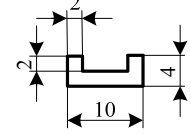
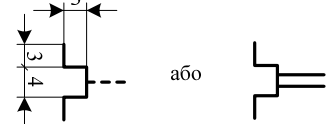
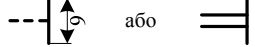
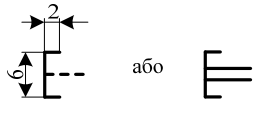
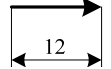
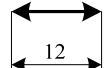
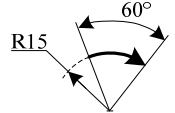
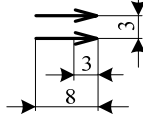
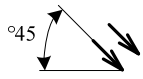

Продовження табл. Д.4

№ ел.	Опис	Графічне позначення
15	Вимикач ручний	
16	Контакт замикаючий вимикача однополюсного	
	Контакт замикаючий вимикача триполюсного	
17	Контакт замикаючий вимикача триполюсного з автоматичним спрацюванням максимального струму	
18	Контакт електротеплового реле при рознесеному способі зображення	
19	Реле електротеплове без самоповернення, з поверненням натисненням кнопки	
22	Перемикач однополюсний багатопозиційний (наприклад, шестипозиційний)	
23	Позиції перемикача, в яких відсутні комутаційні кола чи позицій, які з'єднані між собою, позначають короткими штрихами	
24	Перемикач однополюсний, шестипозиційний з здійсненням переключення без розриву кола	

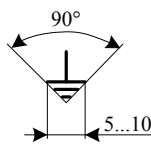
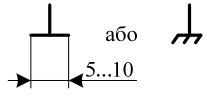




Продовження табл. Д.4

№ ел.	Опис	Графічне позначення
25	Перемикач однополюсний, багатопозиційний з рухомим контактом, який в кожній наступній позиції підключає паралельне коло до кіл, які були замкнуті в попередній позиції	
26	Перемикач двополюсний чотирьохпозиційний	
27	Перемикач багатопозиційний незалежних кіл	
28	При необхідності вказати обмеження руху привода перемикача використовують діаграму положення (напр.: привод забезпечує перехід рухомого контакта перемикача від позиції 1 до позиції 4 і назад). Причому, діаграму положення зв'язують з рухомим контактом перемикача лінією механічного зв'язку.	
29	Перемикач двополюсний, трипозиційний з нейтральним положенням	

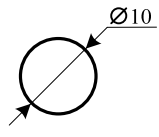
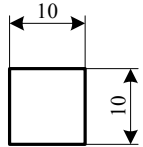
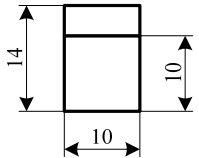
Таблиця Д.5 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.721-74

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Електромагнітний привод	
2	Електромашинний привод	
3	Магніт постійний	
4	Привод з допомогою біметалу	
5	Привод ручний (загальне позначення)	
6	Привод ручний, який приводиться в рух натисненням кнопки	
7	Рух прямолінійний:	
	1) односторонній	
2) з поверненням		
8	Обертальний рух	
9	Зв'язок оптичний	
10	Неіонізувальне електромагнітне випромінювання, фотоелектричний ефект	
11	Світлове випромінювання, оптоелектричний ефект	



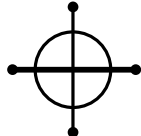
Продовження табл. Д.5

№ ел.	Опис	Графічне позначення
12	Заземлення (загальне позначення)	
13	Електричне з'єднання з корпусом (маса)	
14	Лінія електричного зв'язку з відгалуженням	
15	Трифазна обмотка з'єднана в „зірку”	
16	Трифазна обмотка з'єднана в „зірку” з виведеною нейтраллю	
17	Трифазна обмотка з'єднана в „трикутник”	

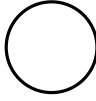
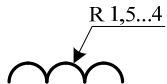
Таблиця Д.6 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.729-68

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Прилад електровимірвальний:	
	1) показувальний	
	2) реєструвальний	
	3) інтегрувальний (лічильник електричної енергії)	





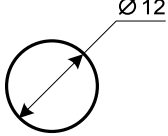
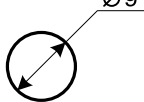




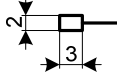
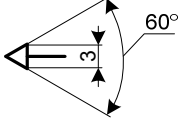
Продовження табл. Д.6

№ ел.	Опис	Графічне позначення
2	Обмотки в схемах вимірювальних приладів; відображають їх взаємне положення в вимірювальному механізмі, зображають таким чином:	
	1) обмотка струмова	
	2) обмотка напруги	
	наприклад, ватметр:	


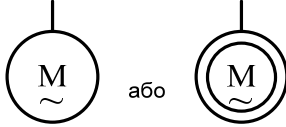
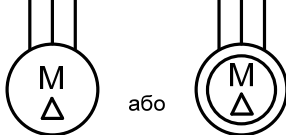
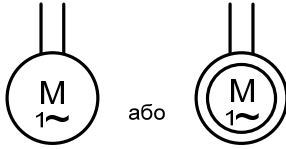
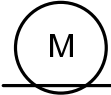

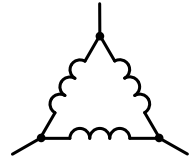
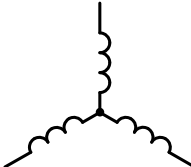
Таблиця Д.7 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.722-68

№ ел.	Опис	Графічне позначення
1	Машина електрична. Загальне позначення <i>Примітка:</i> Всередині кола дозволяється вказувати такі дані: а) вид машини (генератор – G, двигун – M, генератор синхронний – GS, двигун синхронний – MS, сельсин – ZZ, перетворювач – C); б) вид струму, число фаз або вид з'єднання обмоток	
2	Обмотка електричної машини	

Продовження табл. Д.7



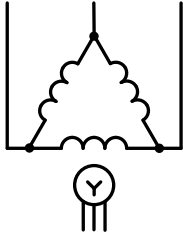
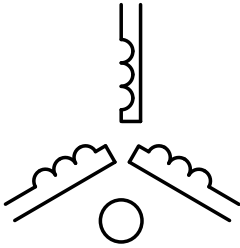
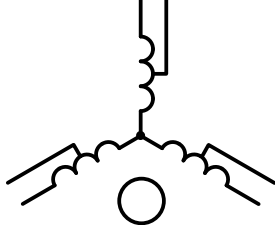
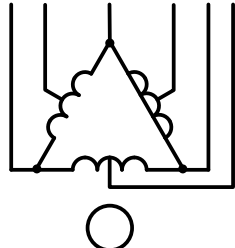
№ ел.	Опис	Графічне позначення
3	Обмотка додаткового полюса	
4	Обмотка компенсаційна	
5	Обмотка статора машини змінного струму, обмотка послідовного збудження машини постійного струму	
6	Обмотка паралельного (незалежного) збудження машини постійного струму	
7	Статор електричної машини	
8	Ротор електричної машини:	
	1) короткозамкнений	
	2) з явновираженими полюсами (явнополюсний) з прорізами по колу	
3) явнополюсний з постійним магнітом		
9	Ротор з обмоткою, колектором і щітками	
10	Ротор з щітками на контактних кільцях	
11	Щітка на колекторі	
12	Щітка на контактному кільці	

Продовження табл. Д.7

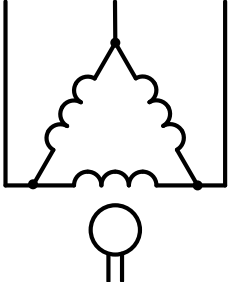
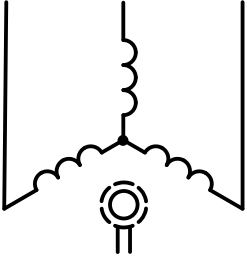
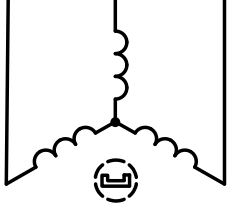
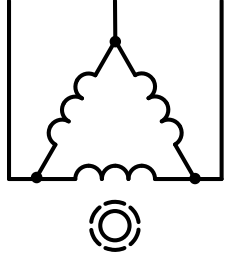
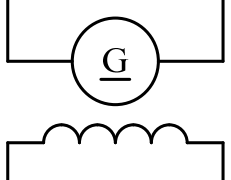
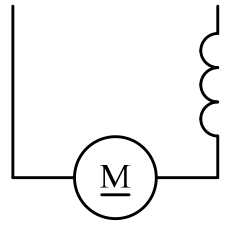
№ ел.	Опис	Графічне позначення
13	Двигун асинхронний з фазним ротором	
14	Двигун асинхронний з короткозамкнутим ротором	
15	Двигун асинхронний трифазний, з'єднаний в трикутник з короткозамкнутим ротором	
16	Двигун асинхронний однофазний з короткозамкнутим ротором	
17	Двигун лінійний	
18	Двигун кроковий	
19	Статор з трифазною обмоткою:	
	1) з'єднаною в „трикутник”	
	з'єднаною в „зірку”	



Продовження табл. Д.7

№ ел.	Опис	Графічне позначення
20	Ротор з розподіленою обмоткою:	
	1) трифазною, з'єднаною в „трикутник”	
	2) трифазною, з'єднаною в „зірку”	
21	Машина асинхронна трифазна з фазним ротором, обмотка якого з'єднана в „зірку”; обмотка статора з'єднана в „трикутник”	
22	Машина асинхронна трифазна з шістьма виведеними кінцями фаз обмотки статора і з короткозамкнутим ротором	
23	Машина асинхронна з переключенням обмотки статора на два числа полюсів, з КЗ ротором. Переключення обмотки статора:	
	1) з „зірки” на „зірку” з двома паралельними вітками	
	2) з „трикутника” на „зірку” з двома паралельними вітками	

Продовження табл. Д.7

№ ел.	Опис	Графічне позначення
24	Машина синхронна трифазна неявнополюсна з обмоткою збудження на роторі; обмотка статора з'єднана в „трикутник”	
25	Машина синхронна трифазна неявнополюсна з обмоткою збудження і пусковою короткозамкнутою обмоткою на роторі; обмотка статора з'єднана в „зірку”	
26	Машина синхронна трифазна з збудженням від постійних магнітів; обмотка статора з'єднана в зірку	
27	Машина синхронна трифазна явнополюсна без обмотки збудження, з пусковою короткозамкнутою обмоткою на роторі (реактивний синхронний двигун); обмотка статора з'єднана в „трикутник”	
28	Машина постійного струму з незалежним збудженням	
29	Машина постійного струму з послідовним збудженням	


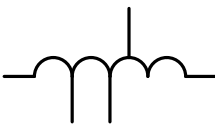
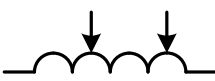


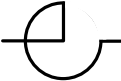
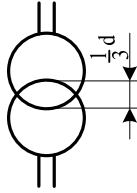
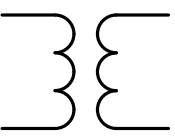
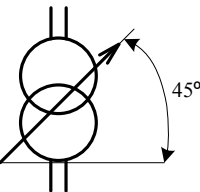
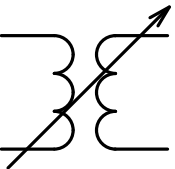

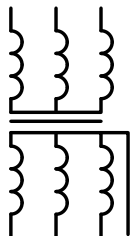
Продовження табл. Д.7

№ ел.	Опис	Графічне позначення
30	Машина постійного струму з паралельним збудженням	
31	Машина постійного струму зі змішаним збудженням	
32	Машина постійного струму зі збудженням від постійних магнітів	

Таблиця Д.8 – Графічні позначення елементів згідно з ГОСТ 2.723-68

№ ел.	Опис	Графічне позначення	
		форма I	форма II
1	Обмотка трансформатора (силового), автотрансформатора, дроселя і магнітного підсилювача		
2	Магнітопровід		
	1) феромагнітний		
	2) феритовий (зображають товстою лінією)		
	3) феромагнітний з повітряним зазором		

Продовження табл. Д.8

№ ел.	Опис	Графічне позначення	
		форма I	форма II
3	Котушка індуктивності з відводами		або 
4	Котушка індуктивності з ковзними контактами		
5	Котушка індуктивності з магнітоелектричним магнітопроводом		
6	Дросель з феромагнітним магнітопроводом		
7	Реактор		
8	Трансформатор без магнітопровода		
	1) з постійним зв'язком, де $d$ – діаметр		
	2) з змінним зв'язком		
9	Трансформатор трифазний з феромагнітним магнітопроводом; з'єднання обмоток „зірка-зірка” з середньою точкою		

Продовження табл. Д.8

№ ел.	Опис	Графічне позначення	
		форма I	форма II
10	Трансформатор трифазний з феромагнітним магнітопроводом; з'єднання обмоток "зірка з середньою точкою" – „трикутник”		
11	Трансформатор трифазний триобмотковий (фазорегулятор); з'єднання обмоток „зірка-зірка”		
12	Трансформатор обертовий		
13	Автотрансформатор однофазний з феромагнітним магнітопроводом		
14	Автотрансформатор однофазний з регулюванням напруги		
15	Трансформатор струму з одною вторинною обмоткою		
16	Трансформатор напруги вимірювальний		

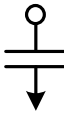
## Додаток Е

## Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Таблиця Е.1 – Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Назва	Умовне позначення
Прилад магнітоелектричний з рухомою рамкою	
Логометр магнітоелектричний	
Прилад електромагнітний	
Логометр електромагнітний	
Прилад електродинамічний	
Логометр електродинамічний	
Прилад феродинамічний	
Логометр феродинамічний	
Прилад індукційний	

Продовження табл. Е.1

Назва	Умовне позначення
Прилад електростатичний	
Струм постійний	—
Струм змінний (однофазний)	~
Струм постійний і змінний	⌚
Трифазна система струмів	≈
Прилад використовувати при горизонтальному положенні шкали	┌
Прилад використовувати при вертикальному положенні шкали	└
Прилад використовувати при положенні шкали під кутом до горизонту (наприклад, 30°)	∠30°
Захист від зовнішніх електричних кіл (I категорія)	□ I
Захист від зовнішніх магнітних кіл (I категорія)	□ I
Клас точності приладу (наприклад, 1,5)	1,5 (1,5)
Вимірювальне коло ізольоване від корпусу; випробуване напругою (наприклад, 2 кВ)	☆ 2
Обережно! Міцність ізоляції вимірювального кола відносно корпусу не відповідає нормам	⚡
Увага! Дивіться додаткові вказівки в паспорті та інструкції з експлуатації	⚠

Навчальне видання

**Михайло Петрович Розводюк**

**Євген Якович Блінкін**

**Валентина Станіславівна Ткач**

**Електротехніка**

**Частина І. Дослідження електричних кіл**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено М.П. Розводюком

Редактор Т.О. Старічек

Науково-методичний відділ ВНТУ

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК №746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку 15.03.2007 р. Гарнітура Times New Roman

Формат 29,7 x 42 ¼

Папір офсетний

Друк різнографічний

Ум. друк. арк. 12.03

Тираж 75 прим.

Зам № 2007-041

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького національного технічного університету

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК №746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ