

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний університет
«Запорізька політехніка»**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни

«Електротехніка, частина 1.

Електричні кола постійного та змінного струму»

для студентів спеціальностей 131 "Прикладна механіка"

всіх форм навчання

2022

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Електротехніка, частина 1. Електричні кола постійного та змінного струму». Для студентів спеціальностей 131 "Прикладна механіка" всіх форм навчання. /Укл.: І.О. Афанасьєва, Г.М. Романіченко, Г.В. Касапов – Запоріжжя: НУЗП, 2022 – 66 с.

Укладачі: І.О. Афанасьєва, старший викладач,
Г.М. Романіченко, старший викладач,
Г.В. Касапов, зав. лабораторією.

Рецензент: В.В. Козлов, доцент, к. т. н.

Відповідальний за випуск: С.М. Тиховод, доцент, д. т. н.

Затверджено
на засіданні кафедри ТЗЕ
Протокол № 5 від 11.05.2022

Рекомендовано до видання
НМК Інженерно-фізичного факультету
Протокол № 10 від 8.06.2022.

ЗМІСТ

Передмова.....	5
Вказівки з техніки безпеки	6
1. Лабораторна робота №1. Вимірювання струму, напруги, потужності в електричних колах	7
1.1 Мета роботи	7
1.2 Загальні теоретичні відомості	7
1.3 Порядок проведення підготовчої роботи	11
1.4 Опис лабораторної установки	11
1.5 Робоче завдання	12
1.6 Зміст звіту	13
1.7 Контрольні запитання	14
2. Лабораторна робота №2. Дослідження роботи джерела електроенергії в різних режимах.....	15
2.1 Мета роботи	15
2.2 Загальні теоретичні відомості	15
2.3 Порядок проведення підготовчої роботи	20
2.4 Опис лабораторної установки	20
2.5 Робоче завдання	20
2.6 Зміст звіту	22
2.7 Контрольні запитання	22
3. Лабораторна робота №3. Дослідження розгалуженого кола постійного струму з декількома джерелами <i>е.р.с.</i>	23
3.1 Мета роботи	23
3.2 Загальні теоретичні відомості	23
3.3 Порядок проведення підготовчої роботи	28
3.4 Опис лабораторної установки	28
3.5 Робоче завдання	28
3.6 Зміст звіту	29
3.7 Контрольні запитання	30
4. Лабораторна робота №4. Дослідження нерозгалуженого кола синусоїдного струму.....	31
4.1 Мета роботи	31
4.2 Загальні теоретичні відомості	31
4.3 Порядок проведення підготовчої роботи	37
4.4 Опис лабораторної установки	38

4.5 Робоче завдання	38
4.6 Зміст звіту	39
4.7 Контрольні запитання	40
5. Лабораторна робота № 5. Дослідження розгалуженого електричного кола синусоїдного струму	41
5.1 Мета роботи	41
5.2 Загальні теоретичні відомості	41
5.3 Порядок проведення підготовчої роботи	45
5.4 Опис лабораторної установки	45
5.5 Робоче завдання	45
5.6 Зміст звіту	46
5.7 Контрольні запитання	47
6. Лабораторна робота № 6. Дослідження трифазного електричного кола зі з'єднанням споживачів зіркою	48
6.1 Мета роботи	48
6.2 Загальні теоретичні відомості	48
6.3 Порядок проведення підготовчої роботи	56
6.4 Опис лабораторної установки	56
6.5 Робоче завдання	56
6.6 Зміст звіту	58
6.7 Контрольні запитання	58
7. Лабораторна робота № 7. Дослідження трифазного кола зі з'єднанням споживачів трикутником	59
7.1 Мета роботи	59
7.2 Загальні теоретичні відомості	59
7.3 Порядок проведення підготовчої роботи	62
7.4 Опис лабораторної установки	63
7.5 Робоче завдання	63
7.6 Зміст звіту	64
7.7 Контрольні запитання	64
8. Рекомендована література	65
Додаток А. Зразок оформлення титульного аркуша звіту про лабораторну роботу	66

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки містять інструкції до семи лабораторних робіт із розділу “Електричні кола”, призначених до виконання студентами спеціальності 131 «Прикладна механіка». У процесі їх виконання студенти повинні оволодіти навичками читання і монтажу електричних схем, використання електровимірювальних приладів, аналізу роботи електроустановки за даними вимірювань електричних величин.

Для успішного виконання і захисту лабораторної роботи за відведений аудиторний час необхідно підготуватися до неї завчасно. До обов’язкової підготовки належить вивчення теоретичного матеріалу по даним методичним вказівкам і рекомендованій літературі, усна відповіді на контрольні запитання, заготовка бланку звіту. Виконання домашнього розрахункового завдання, яке пропонується в лабораторних роботах, не є обов’язковим, але сприяє підвищенню рейтингу студента.

Бланк звіту повинен вміщати: титульний аркуш (зразок див. у Додатку А), формулювання мети роботи; схеми і таблиці з “Робочого завдання”. Крім того, в нього можуть входити результати тих додаткових робіт, які студент знайшов за потрібне виконати для підготовки до лабораторного заняття. Креслення потрібно виконувати із застосуванням креслярського приладдя у відповідності до ЄСКД.

Рівень підготування студента до виконання лабораторної роботи визначає викладач на початку заняття і своїм підписом на титульному аркуші бланку звіту засвідчує допуск до роботи.

Лабораторні роботи передбачають різний рівень опанування теоретичним матеріалом. Ті пункти робочого завдання та оформлення звіту, які призначення для виконання студентами, що більше підготовлені позначені зірочкою.

Лабораторна робота вважається виконаною після того, як викладач перевірів результати вимірювань, зробив помітку в журналі і надав дозвіл на розборку електроустановки. Після цього електричне коло треба розібрати, прилади та з’єднувальні дроти покласти на місце.

Для захисту лабораторної роботи треба представити викладачеві звіт, який містить результати вимірювань і обчислень з показом всіх розрахункових формул, необхідні побудування та письмові висновки. Крім того, треба вміти пояснювати результати дослідів.

ВКАЗІВКИ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Проведення лабораторних робіт пов'язане зі застосуванням напруги, що є небезпечною для життя (більше 36 В в сухих приміщеннях). Порушення правил поведінки в електротехнічній лабораторії та роботи з електроустановками може призвести до ураження електричним струмом та виходу з ладу коштовного обладнання. Тому кожний студент допускається до виконання лабораторних робіт тільки після проходження інструктажу з техніки безпеки, що підтверджується його підписом в Журналі з ТБ.

При виконанні лабораторних робіт необхідно пам'ятати:

- Робоче місце не повинно бути захаращене сторонніми предметами, проходи – стільцями.
- Перед початком складання електричного кола необхідно перевірити, чи вимкнено лабораторний стенд від мережі (не горить сигнальна лампа ліворуч зверху стенда, та натиснути червону кнопку “Стоп” автоматичного вимикача ліворуч знизу стенда).
- Складене коло вмикається до джерела напруги тільки після перевірки його викладачем або лаборантом та з їх дозволу.
- Під час роботи треба бути уважним, щоб не торкнутися оголених частин проводів та контактів, які знаходяться під напругою.
- Всі заміни в колі, або з'ясування причин несправності можна здійснювати тільки після повного вимкнення стенду від напруги.
- Про всі несправності слід повідомляти викладача .
- Після закінчення вимірювань стенд треба вимкнути з мережі.
- Розборку кола після закінчення роботи треба здійснювати при вимкненому стенді і *тільки з дозволу викладача*.

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ВИМІРЮВАННЯ СТРУМУ, НАПРУГИ, ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

1.1 Мета роботи

Ознайомитись з лабораторним стендом; придбати практичні навички складання електричних кіл; навчитись обирати електровимірювальні прилади і засвоїти їх підключення до схеми кола; опанувати методику вимірювань електричних величин.

1.2 Загальні теоретичні відомості

1.2.1. Електричні вимірювання та прилади.

Об'єктом електричних вимірювань є електричні величини: струм, напруга, потужність тощо. По результатах вимірювань за допомогою формул можна одержати значення різноманітних параметрів, що характеризують роботу джерел та споживачів електричної енергії. Електричні методи вимірювання широко застосовуються і для вимірювання неелектричних величин, однак останні потрібно попередньо перетворити на електричні.

Електричні вимірювання здійснюються за допомогою електровимірювальних приладів, робота яких базується на використанні електричних та магнітних явищ. Ці прилади вельми різноманітні, вони розрізняються за принципом дії, точністю, умовами експлуатації тощо. Усі характеристики приладу у вигляді умовних позначень наведено на його передній панелі.

Під час вибору вимірювального приладу слід враховувати:

- а) величину, яка підлягає вимірюванню (струм (A), напруга (V), потужність (W) тощо);
- б) рід струму, який підлягає вимірюванню (постійний (—); змінний однофазний (—); трифазний (—));
- в) границю вимірювань (максимальне значення величини, яке вказано на шкалі електровимірювального приладу);
- г) клас точності приладу - це узагальнена характеристика засобу вимірювальної техніки, що визначається границями його допустимих основних і додаткових похибок (%).

Значення величини, яка підлягає виміру ($A_{\text{вим}}$) відповідає її істинному значенню (A) лише з якимось рівнем точності:

$$A = A_{\text{вим}} \pm \Delta A ,$$

де ΔA - абсолютна похибка приладу.

Обчислити значення ΔA можна по відомому класу точності приладу, який

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_{max}} \cdot 100\%,$$

де A_{max} – границя вимірювання приладу.

Клас точності показано в нижньому куті лицевої панелі числом зі стандартного ряду: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

Таким чином, абсолютна похибка

$$\Delta A = \frac{\gamma \cdot A_{max}}{100\%}$$

є величина постійна для даного приладу.

Клас точності не є безпосереднім показником точності конкретного засобу, оскільки не визначає його похибку, а дає лише інформацію про граничне значення похибки (нормоване значення), встановлене для приладу даного класу

Точність вимірювань оцінюється *відносною похибкою*




$$\delta \approx \frac{\Delta A}{A_{вим}} \cdot 100\% = \frac{\gamma \cdot A_{max}}{A_{вим}}$$


З останнього співвідношення видно, що чим ближче вимірювана величина до границі приладу, тим меншою буде відносна похибка вимірювань. Однак, якщо можливе значення величини, яка підлягає вимірюванню, невідоме, прилад треба обрати із запасом.

Слід мати на увазі, що похибка вимірювання не перевищує ту, що визначена класом точності приладу лише в разі виконання вимог його правильної експлуатації. Умовні позначення цих правил теж показані на лицевій панелі приладу:

- робоче положення приладу: горизонтальне (Γ , або \rightarrow), вертикальне (\perp), під відповідним кутом ($\angle 60^\circ$);
- діапазон частот;
- захищеність від дії зовнішніх електричних та магнітних полів (\square або \square).

Принцип дії приладу теж має умовне позначення у вигляді системи та типу приладу. Наприклад:

-  - магнітоелектрична система, тип М;
 - електромагнітна система, тип Е;
 - електродинамічна система, тип Д.

Крім того, на лицевій панелі позначається де і коли було виготовлено прилад, а також напруга, при якій випробувалась ізоляція приладу (в кіловольтах): .

Після того, як обрано прилад, розраховують ціну поділки:

$$C = \frac{A_{max}}{N},$$

де N – число поділок у всій шкалі.

Якщо шкала нерівномірна, то ціну поділки визначають для будь-якого її інтервалу:

$$C = (A_2 - A_1) / \Delta N,$$

де: A_2 та A_1 – кінцеве та початкове значення величини, що вимірюється на інтервалі;

ΔN – кількість поділок на обраному інтервалі.

При роботі із приладами, які мають декілька границь вимірювання (*багатовимірні прилади*), при переході до нової границі треба обчислювати нову ціну поділки (і нові похибки). Числове значення величини, яка вимірюється, визначають за формулою:

$$A_{вим} = C \cdot N_{вим},$$

де $N_{вим}$ - число поділок на шкалі, яке показує стрілка приладу.

Саме це $A_{вим}$ і треба записувати до таблиці результатів дослідів.

1.2.2. Схеми підключення вимірювальних приладів.

Умовне позначення вимірювальних приладів на схемах – коло діаметром 10 мм із відповідними буквами в центрі, наприклад:

 - амперметр,  - вольтметр,  - ватметр.

Амперметри підключають в електричне коло *послідовно* (рис. 1.1), так, щоб скрізь них проходив струм, що вимірюється. Оскільки їхній опір R_A значно менший за опір споживачів, то наявність амперметра не впливає на струм і можна вважати, що $R_A = 0$.

Вольтметри підключають *паралельно* до тієї ділянки кола, на якій вимірюється напруга (рис. 1.1). Оскільки їхній опір R_V набагато більший за опір споживачів, його можна вважати нескінченно великим ($R_V = \infty$). Це означає, що струмом, який проходить через вольтметр, можна нехтувати.

Принцип дії *ватметра* ґрунтується на електромагнітній взаємодії двох обмоток: обмотки струму (затискачі I^*, I) та обмотки напруги (затискачі U^*, U). Перша підключаються послідовно, а друга – паралельно до тієї ділянки, де вимірюється потужність (рис. 1.1). Необхідно дотримуватись полярності підключення обмоток. Затискачі, що позначені зірочкою, зветься «генераторними» і повинні з'єднуватись із проводом, який іде від джерела електроенергії. Частіше за все, ці затискачі з'єднують між собою, а потім один із них підключають до позитивної клеми джерела. Оскільки потужність пропорційна добутку струму та напруги, границя вимірювання у ватметра:

$$P_{max} = U_{max} \cdot I_{max},$$

де U_{max}, I_{max} - границі вимірювання по напрузі та струму, які встановлено в даному досліді.

1.2.3. Основні правила складання електричних кіл.

Електричне коло – це сукупність пристроїв та об'єктів, що утворюють шлях електричному струму, електромагнітні процеси в якому можна описати за допомогою понять про електрорушійну силу, струм та напругу. Електричні кола складають з джерела енергії, споживачів і допоміжних елементів (з'єднувальні проводи, вимірювальні прилади, вимикачі тощо). Схема з'єднання елементів, що зображені за допомогою умовних позначень, називають *принциповою*. Вона показує порядок і місце підключення елементів в колі. Для того, щоб електричне коло виконувало свої функції, по ньому повинен проходити струм, тобто воно повинно бути замкнутим.

Починати складання електричного кола потрібно від “+” джерела постійної напруги, або від прийнятої за фазову клему у джерел змінної напруги. У першу чергу треба забезпечити замкнений шлях для струмів в колі, тобто з’єднавши по черзі елементи проводами, останній провід підключити до “-” (або 0) джерела. Вольтметри підключають до кола в останню чергу. Під час складання кіл постійного струму слід звертати увагу на *полярність* амперметрів і вольтметрів. Струм через них повинен проходити від “+” до“-”, інакше стрілка буде відхилятися ліворуч.

Якщо дві будь-які точки в колі з’єднати між собою проводом, то в електричному сенсі вони являють одну точку, бо напруга між ними дорівнює нулю. Це слід мати на увазі під час пошуків точок для підключення вольтметрів або паралельних обмоток ватметрів.

1.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п.1.2.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, формулювання мети роботи, таблиця 1.1, схема рис. 1.1, таблиця 1.2.

1.4 Опис лабораторної установки

Лабораторний стенд призначено для виконання всіх лабораторних робіт з дослідження електричних кіл. Він вміщує в собі:

- джерело живлення трифазної напруги (гнізда A , B , C), яке вмикається при натисненні білої кнопки “Пуск” автоматичного вимикача SF (зліва знизу стенда);

- джерела постійної напруги $E1$ та $E2$, які вимикаються тумблерами $S4$ та $S5$ (справа знизу стенда); при натисненні кнопки “Пуск” автомату SF . Однофазну напругу можна одержати використовуючи яку-небудь пару гнізд з A , B , C , N . Про наявність напруги на стенді свідчить сигнальна лампа H . Стенд вмикається червоною кнопкою “Стоп” автоматичного вимикача SF або запобіжником F в разі короткого замикання;

- на стенді встановлено електровимірювальні прилади;
- змінні та постійні резистори ($R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$, $R6$);
- конденсатор змінної ємності (C);
- котушки індуктивності ($L1$, $L2$);
- діод.

Всі елементи змонтовано за панеллю стенду. На лицеву сторону панелі винесено гнізда для підключення елементів та вимірювальні приладів. Якщо два гнізда з'єднуються рискою (○—○), то це – розгалуження однієї електричної точки. Складання кола на такій установці зводиться до з'єднання відповідних гнізд за допомогою проводів із штекерами, які можна одержати у викладача або лаборанта.

1.5 Робоче завдання

1.5.1. Вивчити опис лабораторної установки і знайти на стенді всі позначені в п. 1.4 елементи.

1.5.2. Вибрати прилади, яким можна здійснити вимірювання згідно зі схемою рис. 1.1, враховуючи, що напруга мережі не перевищуватиме 36 В, а струм – 1 А.

1.5.3. В разі необхідності встановити потрібні границі вимірювань у багатовимірних приладів, обчислити ціну поділок. Результати обчислень, а також паспортні дані приладів записати в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Паспортні дані вимірювальних приладів

Назва приладу	Вимірювальна система		Клас точності	Границя вимірювань	Ціна поділки
	Умовна позначка	Назва системи			

1.5.4. Скласти коло за схемою рис. 1.1. З дозволу викладача увімкнути стенд. Змінюючи опір $R1$ перемиканням тумблерів $S1.4... S1.1$, виміряти потужність, струм та напругу для п'ятьох-шістьох значень опору. Результати записати до табл. 1.2. Стенд вимикнути. Результати вимірів показати викладачеві.

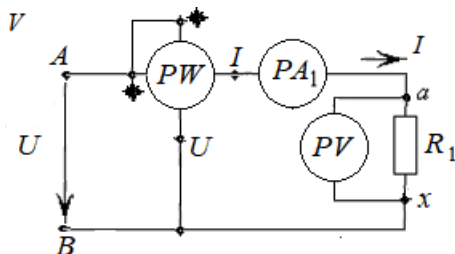


Рисунок 1.1 – Принципова схема електричного кола

Таблиця 1.2 – Дані дослідів

Виміряно			Обчислено							
$P,$ $Вт$	$U,$ $В$	$I,$ $А$	Абсолютна похибка			Відносна похибка			$R,$ $Ом$	$P,$ $Вт$
			$\Delta P,$ $Вт$	$\Delta U,$ $В$	$\Delta I,$ $А$	$\delta_P,$ $\%$	$\delta_U,$ $\%$	$\delta_I,$ $\%$		

1.6 Зміст звіту

1.6.1. За даними вимірювань (табл. 1.2) обчислити абсолютну і відносну похибку. Результати порівняти і записати до Табл. 1.2.

1.6.2. Користуючись законами Ома та Джоуля-Ленца, обчислити опір R та потужність P споживача. Результати обчислень записати в Табл. 1.2. Порівняти обчислене і вимірне значення потужності.

1.6.3. Зробити письмові висновки про те, в якій частині шкали вимірювального приладу досягається найбільша точність вимірювань і як, виходячи з цього, треба обирати прилад, а також про доцільну точність обчислень параметрів за даними вимірювань.

1.7 Контрольні запитання

1.7.1. Як вибрати електровимірювальний прилад?

1.7.2. Що таке границя вимірювань, як її визначити для багатовимірного приладу, зокрема ватметра?

1.7.3. Що таке клас точності?

1.7.4. Що таке абсолютна похибка і від чого вона залежить?

1.7.5. Як за результатами вимірювань визначити справжнє значення величини?

1.7.6. Що таке відносна похибка, від чого вона залежить?

1.7.7. Як визначити ціну поділки приладу?

1.7.8. Що означають умовні позначення на шкалі приладу?

Поясніть на конкретнім прикладі.

1.7.9. Як підключають амперметри в коло? Чому?

1.7.10. Як підключають вольтметри в коло? Чому?

1.7.11. Поясніть схему підключення ватметра, Що означають зірочки на затискачах?

1.7.12. Що називають електричним колом? В якому разі воно виконує свої функції? З чого воно складається?

1.7.13. Що таке принципова електрична схема?

1.7.14. Як враховується полярність джерел та приладів при складанні електричного кола?

1.7.15. Чому при складанні кола амперметри підключають у першу чергу, а вольтметр – у другу?

1.7.16. Назвіть всі відомі вам формули для обчислення опору споживача і його потужності, які ґрунтуються на законах Ома і Джоуля – Ленца.

1.7.17. Яка буде найбільша абсолютна похибка та найбільша можлива відносна похибка під час вимірювання напруги, якщо прилад з максимальною напругою $U_n = 450 \text{ В}$ показує $U_d = 120 \text{ В}$?

Клас точності приладу $\gamma = 1,5$.

1.7.18. Яка буде ціна поділки C_A та дійсне значення струму I_d , якщо стрілка приладу амперметра показує $N_d = 55$ поділок?

Шкала цього амперметра з максимальним струмом $I_n = 1 \text{ А}$ має $N_n = 150$ поділок. Клас точності приладу $\gamma = 1,5$.

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ

2.1 Мета роботи

Навчитися аналізувати роботу джерела за допомогою зовнішньої характеристики; засвоїти енергетичні співвідношення в колі постійного струму в різних режимах роботи джерела енергії.

2.2 Загальні теоретичні відомості

2.2.1. Поняття про заступну схему електротехнічного пристрою.

Електричні кола складаються із різноманітних певним чином поєднаних між собою активних та пасивних елементів. Відрізняючись один від одного за призначенням, формою та іншими ознаками, з електричної точки зору вони мають властивості, що описуються обмеженим числом параметрів. Елементи кола постійного струму при його стаціонарній роботі можуть бути описані двома параметрами: електрорушійною силою (E , *Вольт*) та опором (R , *Ом*).

Опір R характеризує здатність елемента на незворотне перетворення електричної енергії на якийсь інший вид, наприклад, на тепло. Джерело електрорушійної сили (джерело *е.р.с.*) характеризує здатність створювати і підтримувати різницю потенціалів на його полюсах за допомогою сил неелектричного походження.

Якщо роботу будь-якого пристрою або елемента можна описати за допомогою одного параметру, такий елемент називається *ідеальним*. Наприклад, електричну лампу можна вважати ідеальним резистивним елементом R . Кожний реальний пристрій може бути представлений у вигляді набору ідеальних елементів, який з достатньою для даного випадку точністю відповідає його електричним властивостям. Така кількісна модель називається *заступною схемою* і є основою для розрахунку роботи електричного кола. Одному і тому ж пристрою можуть відповідати декілька різних заступних схем в залежності від того, які електричні явища потрібно врахувати в конкретних умовах.

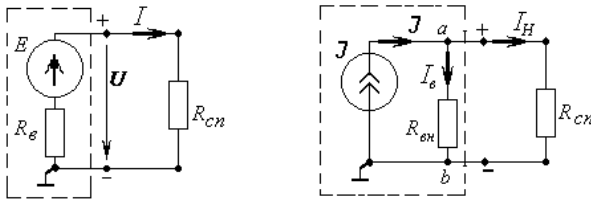
2.2.2. Заступні схеми джерела електроенергії.

Основна властивість джерела кількісно описується параметром *е.р.с.* (E). При проходженні по ньому струму джерело нагрівається. Це означає, що частина енергії, що виробляється в ньому, перетворюється на тепло. Отже, його можна охарактеризувати двома параметрами:

e.p.c. E та опором R_B , який прийнято називати «внутрішнім». В деяких випадках втратою енергії на нагрів можна знехтувати, тоді джерело вважається *ідеальним* і його заступна схема містить тільки один елемент – *e.p.c.* E .

Особливості роботи джерела залежать від співвідношення між опором споживача R_{cn} і внутрішнім опором самого джерела R_B . Якщо $R_{cn} \gg R_B$ то напруга на вихідних затискачах джерела електроенергії мало змінюється із зміною струму навантаження. В цьому випадку використовують заступну схему у вигляді джерела напруги (рис.2.1,а). У випадку, коли $R_{cn} \ll R_B$ струм через джерело можна вважати незалежним від опору споживача. При цьому використовують заступну схему у вигляді *джерела струму* (рис.2.1,б), для якого чинне таке співвідношення: $E = J \cdot R_{вн}$.

Як правило, джерело струму вживають в заступних схемах пристроїв промислової електроніки.



а) $R_{cn} \gg R_B$

б) $R_{cn} \ll R_{вн}$

Рисунок 2.1 - Заступні схеми реального джерела *e.p.c.* (а) та струму (б)

2.2.3. Зовнішня характеристика джерел енергії.

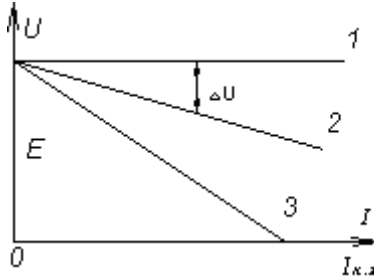
Зовнішня характеристика джерела напруги являє собою залежність напруги на його вихідних затискачах U від струму, що проходить через джерело I . Це по суті його вольт-амперна характеристика. Оскільки струм залежить від опору споживача, наприклад, для схеми рис.2.1,а:

$$I = \frac{E}{R_B + R_{cn}},$$

тоді говорять, що зовнішня характеристика – це залежність напруги джерела від навантаження.

Рівняння зовнішньої характеристики отримаємо із другого закону Кірхгофа (див. схему на рис.2.1,а). При умовах, що *е.р.с.* джерела E та його внутрішній опір R_B - постійні величини, вона являє собою рівняння прямої (рис. 2.2).

$$U = E - R_B \cdot I . \quad (2.1)$$



$$R_{B1} = 0, \quad R_{B2} < R_{B3} .$$

Рисунок 2.2 – Зовнішні характеристики джерела напруги

У випадку, коли R_B можна вважати, таким, що дорівнює нулю, зовнішня характеристика є *абсолютно жорсткою*, тобто напруга на вхідних затискачах джерела не залежить від навантаження і дорівнює *е.р.с.*: $U=E$ (пряма 1 на рис. 2.2). Чим більше R_B , тим більш *м'якою* буде зовнішня характеристика, тобто тим більший її нахил. Втрата напруги в середині джерела:

$$\Delta U = E - U = R_B \cdot I . \quad (2.2)$$

Звідси отримаємо формулу для обчислення внутрішнього опору:

$$R_B = \frac{E - U}{I} . \quad (2.3)$$

У зварювальних джерелах живлення часто потрібно створювати дуже *м'яку* зовнішню характеристику. Це досягається зокрема послідовним підключенням до джерела *додаткового* резистора. Регулюючи величину його опору, можна змінювати нахил і домогтись стійкого горіння зварювальної дуги.

2.2.4. Потужність і ККД в електричному колі.

Швидкість перетворення неелектричної енергії на електричну в джерелі характеризується потужністю джерела:

$$P_{дж} = E \cdot I.$$

Потужність нагріву самого джерела $\Delta P = R_B \cdot I^2$.

В споживачах енергія перетворюється на інші види (теплову, механічну, світлову тощо). Інтенсивність цих перетворень характеризується потужністю споживача:

$$P_{cn} = R_{cn} \cdot I_{cn}^2 = U_{cn} \cdot I_{cn},$$

де U_{cn}, I_{cn} – напруга і струм на споживачі.

З точки зору джерела ті провиди, що з'єднують його зі споживачем, теж є споживачами. Під опором R_{cn} слід розуміти еквівалентний опір усіх елементів, які підключено до затискачів джерела. Потужність P_{cn} можна знайти і як суму потужності кожного споживача

$$P_{cn} = \sum_{k=1}^n R_k \cdot (I_k)^2,$$

де R_k, I_k – опір та струм окремого споживача в електричному колі.

Згідно зі законом збереження енергії обов'язково:

$$P_{дж} = P_{cn} + \Delta P.$$

Коефіцієнт корисної дії джерела (ККД):

$$\eta = \frac{P_{cn}}{P_{дж}} \cdot 100\% = \frac{P_{cn}}{P_{cn} + \Delta P} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

2.2.5. Режими роботи електричного кола.

Електричне коло (рис.2.1,а) в залежності від величини опору навантаження може перебувати в таких характерних режимах: номінальним, холостого ходу та короткого замикання.

В номінальним режимі в електроустановці мають місце ті значення струмів і напруг, на які вона проектувалась. Вони показані в паспорті устаткування. При номінальним струмі, напрузі і потужності

забезпечується економічне виробництво і споживання електроенергії і гарантується термін служби, що вказано заводом-виробником.

В електричних колах постійного струму *узгоджений режим* роботи джерела і споживача має місце при умові рівності внутрішнього опору джерела опору споживача: $R_B = R_{cn}$. При цьому в споживачі виділяється максимальна потужність $P_{cn} = R_{cn} \cdot I^2 = \max$. В цьому легко переконатися, якщо дослідити функцію потужності на екстремум при змінному опорі споживача. Коефіцієнт корисної дії для такого режиму

$$\eta = \frac{P_{cn}}{P_{дж}} = \frac{R_{cn} \cdot I^2}{E \cdot I} = \frac{E \cdot R_{cn}}{(R_{cn} + R_B)E} = \frac{R_{cn}}{R_B + R_{cn}} = 0,5.$$

Узгоджений режим вживається у тих випадках, коли треба отримати якнайбільшу потужність в споживачі, а ефективність передачі енергії відіграє другорядну роль, наприклад, в радіоелектроніці або в контактному зварюванні.

Режим *неробочого ходу* відповідає відсутності струму навантаження і здійснюється відмиканням споживача від джерела (рис. 2.3,а). Можна вважати, що опір навантаження $R_{cn} = \infty$. Напруга на вихідних затискачах джерела у відповідності із (2.1) дорівнює е.р.с. джерела. В розгалуженому колі при відмиканні або обриві одного з елементів струм через джерело змінить своє значення, але не дорівнюватиме нулю. Напруга на розімкнених затискачах в колі теж, як правило не нульова.

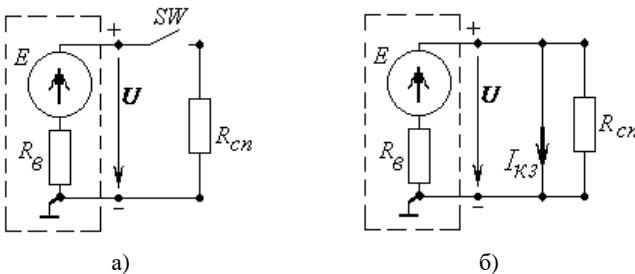


Рисунок 2.3 – Заступні схеми електричного кола при неробочому ході (а) і короткому замиканні (б)

В режимі *короткого замикання* затискачі джерела з'єднуються між собою на коротко (рис.2.3,б). Це може статися, наприклад, під час

пробою ізоляції між прямим і зворотнім проводом, що з'єднує джерело із споживачем, при замиканні затискачів споживача провідником з дуже малим опором, при зіткненні зварювального електроду з виробом тощо. Оскільки електричний струм проходить по шляху з найменшим опором, тоді такий «закорочений» споживач не буде приймати участі в роботі схеми і можна вважати, що $R_{cn} = 0$. Тоді струм через джерело досягає максимального значення $I_{K.3} = E/R_B$, а напруга на його вихідних затискачах $U=0$. Вся енергія, яка вироблена джерелом, перетворюється на тепло у середині його: $E \cdot I = R_B \cdot I_{K.3}^2$. Це приводить до перегрівання і навіть до пошкодження джерела. Великий струм руйнівні впливає на вимірювальні прилади, що вмикаються послідовно. Для джерела живлення зварювальної дуги коротке замикання – це режим, що є близьким до номінального, оскільки $I_{ном} = 0,7 \cdot I_{K.3}$ і не є аварійним.

Коротке замикання може статися не тільки на вихідних затискачах джерела. Будь-який елемент або ділянка кола може потрапити в такий аварійний стан. Це еквівалентно паралельному підключенню до нього резистора з $R=0$.

2.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п.2.2.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, формулювання мети роботи, схеми досліджуваного кола рис. 2.4, таблиця 2.1.

2.4 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді є:

- джерело постійного струму $E1$, яке вмикається тумблером $S4$;
- змінні резистори $R1$ і $R2$ та постійний резистор $R5$;
- амперметр постійного струму $A8$;
- вольтметр постійної напруги $V2$.

2.5 Робоче завдання

2.5.1. Ввімкнути стенд і тумблер $S4$. Виміряти вольтметром напругу на затискачах джерела $E1$ (в режимі неробочого ходу) і записати її у табл. 2.1. Тумблер $S4$ вимикнути.

2.5.2. Скласти коло, схема якого зображена на рис. 2.4,а.

2.5.3. З дозволу викладача увімкнути стенд і тумблер $S4$. Змінюючи опір резистора $R2$ вмиканням тумблерів $S2.4...S2.1$ виміряти в кожному випадку напругу на затискачах джерела та струм через нього. Результат вимірювань занести до табл.2.1. Стенд вимикнути.

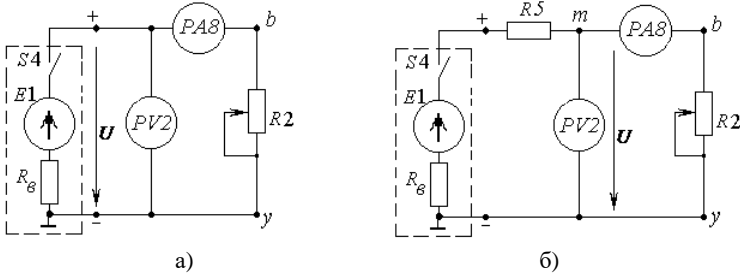


Рисунок 2.4 – Принципові схеми електричних кіл для зняття зовнішніх характеристик: а) – жорсткої; б) – м'якої

Таблиця 2.1 – Дані дослідів режимів роботи джерела *e.p.c.*

Назва режиму		н.х.	Робочий режим					к.з.	
			0	1	2	3	4		5
Виміряно	Коло без $R5$	U, B							–
		I, A							–
	Коло з $R5$	U, B							
		I, A							
Обчислено для кола з $R5$		$P_{дж}, Вт$							
		$P_{сн}, Вт$							
		$\eta, \%$							

2.5.4. Скласти коло за рис. 2.4,б. Резистор $R5$ відіграє роль додаткового внутрішнього опору. Тому вихідними затискачами джерела треба вважати точки “ m ”, “ y ” (на схемі 2.4,б).

2.5.5. Зняти м'яку зовнішню характеристику (повторити дії за п.2.5.3).

2.5.6. Здійснити коротке замикання споживача. Для цього замкнути проводом затискачі “b”, “у” на резисторі R_2 , або вихідний провід з амперметру A_8 безпосередньо з’єднати із точкою “у”. Ввімкнути тумблер S_4 . Покази приладів записати в табл. 2.1. Стенд вимикнути. Дані вимірів показати викладачу. Робочу схему розібрати.

2.6 Зміст звіту

2.6.1. Обчислити внутрішній опір джерела живлення для двох схем (рис. 2.4, а та рис. 2.4, б). Визначити опір навантаження і струм *узгодженого режиму* для схеми 2.4,б.

2.6.2. Обчислити потужність джерела $P_{дж}$, споживача $P_{сп}$ і ККД (η) за даними вимірювань для схеми 2.4,б. Все занотувати до табл. 2.1.

2.6.3. Побудувати на однім полі графіки м’якої та жорсткої зовнішніх характеристик. Побудувати на однім полі графіки залежності $P_{дж}(I)$, $P_{сп}(I)$, $\eta(I)$. Показати на всіх графіках точки *н.х.*, *к.з.*, *узгодженого режиму*.

2.6.4. Порівняти дані табл. 2.1 та зробити письмовий висновок про те, як і чому змінюється напруга на джерелі при підключенні до нього додаткових споживачів.

2.7 Контрольні запитання

2.7.1. Дайте визначення параметрів R та E .

2.7.2. Які елементи називаються ідеальними?

2.7.3. Що таке заступна схема?

2.7.4. Зобразіть заступні схеми джерела електроенергії у вигляді джерела напруги та струму. У яких випадках вони використовуються?

2.7.5. Що таке зовнішня характеристика джерела напруги? Виведіть її рівняння.

2.7.6. Намалюйте зовнішню характеристику ідеального джерела. Що таке жорстка і що таке м’яка характеристики? Як регулювати нахил м’якої характеристики?

2.7.7. Поясніть, як працює закон зберігання енергії в електричному колі постійного струму?

2.7.8. Як обчислити потужність джерела та споживачів?

2.7.9. Дайте характеристику всім режимам роботи джерела живлення.

3. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ДЕКІЛЬКОМА ДЖЕРЕЛАМИ Е.Р.С.

3.1 Мета роботи

Оволодіти методикою застосування законів електротехніки до перевірки результатів електричних вимірювань; засвоїти методику аналізу електричного стану кола за допомогою потенційної діаграми.

3.2 Загальні теоретичні відомості

3.2.1. Основні визначення.

Віткою називається ділянка кола (або його заступної схеми), уздовж якої струм в кожний момент має одне й те ж значення. Вітка складається з одного або декількох елементів і є ділянкою між двома вузлами.

Вузол – це місце з'єднання трьох або більше віток. Він може бути утвореним із декількох точок розгалуження шляхом з'єднування їх перемичками.

Якщо опором елементів у вітці, яка не має *е.р.с.*, можна знехтувати, таку вітку називають «*перемичкою*» або «*закороткою*». Точки кола, які з'єднані перемичкою, в електричному сенсі являють собою одну точку (або вузол).

Контур – це такий замкнений шлях по елементах електричного кола або його заступної схеми, в якому жодний елемент не повторюється. Отже, початкова точка контуру є і його кінцевою точкою.

3.2.2. Електрична напруга і електричний потенціал.

Різниця потенціалів (або напруга) між двома точками електричного кола $U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$ характеризує роботу по переміщенню заряду з точки *a* в точку *b*. Оскільки струм (за законом Ома) пропорціональний напрузі (різниці потенціалів), то потенціалу однієї довільної точки схеми можна надавати будь-якого значення, зокрема нульового – для простоти. В електротехніці за нульовий прийнято потенціал Землі. Тому подання будь-якій точці нульового потенціалу рівнозначно її заземленню, тобто поєднанню з землею. На схемах ця точка позначається знаком \perp або — (застаріле).

Вимірювання потенціалів здійснюється вольтметром як вимірювання напруги між точкою, що досліджується, і точкою, яку прийнято за нульову (базову). До базової точки підключають один затискач вольтметра (для магнітоелектричного приладу це повинен бути негативний), а другий затискач підключають до точок, потенціал яких треба виміряти. Якщо стрілка магнітоелектричного вольтметра відхиляється ліворуч від нульової поділки, тоді точка має від'ємний потенціал відносно нульової. В такому випадку для вимірювання треба поміняти місцями затискачі вольтметра, але при переході до іншої точки полярність вольтметра треба відновити.

Обчислення потенціалу будь-якої точки заступної схеми здійснюється як обчислення напруги між цією точкою і нульовою. Для правильного визначення знаків необхідно домовитись про позитивні напрямки струму та напруги кожної вітки.

3.2.3. Умовні позитивні напрямки струму, напруги, е.р.с.

Струм, напруга, е.р.с. – це скалярні величини. Їх позитивні напрями на заступних схемах слід розуміти як вказівки на розподіл потенціалів уздовж ділянок електричного кола. Точку з більшим потенціалом прийнято позначати знаком “+”, з меншим – знаком “-”. Умовні позитивні напрями вказуються на заступних схемах стрілками або порядком букв чи цифр в індексі (рис.3.1.).

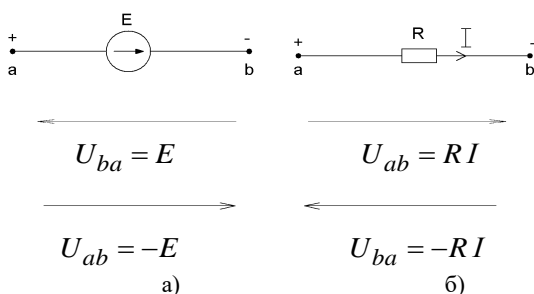


Рисунок 3.1 – Розподіл потенціалів на активному (а) та пасивному (б) елементах заступної схеми

Позитивний напрям е.р.с. співпадає з напрямом дії сил неелектричного походження, тобто сил, що виробляють електричний заряд. Стрілка е.р.с. вказує на клему з більшим потенціалом .

За позитивний напрям струму прийнято напрям руху позитивних зарядів. У зовнішній відносно джерела електричної енергії частині кола струм спрямовано від клем з більшим потенціалом («+») до клем з меншим потенціалом («-») (рис. 3.1, б).

Позитивний напрям напруги співпадає з напрямом спаду потенціалу (звідси – вираз “спад напруги”):

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b, \quad U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a,$$

де φ_a, φ_b - потенціали точок a та b .

Таким чином на джерелі напруга спрямована протилежно напрямку е.р.с. (рис. 3.1, а), а на споживачі вона співпадає з напрямом струму (рис.3.1, б). Відповідно обчислюється потенціал точок:

$$\varphi_b = \varphi_a + E \quad \text{або} \quad \varphi_a = \varphi_b - E \quad (\text{рис.3.1, а}), \quad \text{та}$$

$$\varphi_b = \varphi_a - RI \quad \text{або} \quad \varphi_a = \varphi_b + RI \quad (\text{рис.3.1, б}).$$

3.2.4. Закони Кірхгофа для кіл постійного струму.

Перший закон Кірхгофа сформульовано для вузла електричного кола: алгебраїчна сума струмів, які підходять до вузла, дорівнює нулю. Або: сума струмів, що входять у вузол, дорівнює сумі струмів, що відходять від нього.

$$\sum I_k = 0,$$

де k – номер струму на схемі електричного кола

Другий закон Кірхгофа зв’язує напруги в замкненім контурі електричного кола. Вживають такі формулювання:

- алгебраїчна сума напруги в замкненім контурі дорівнює нулю:

$$\sum U_k = 0;$$

- алгебраїчна сума е.р.с. в замкненім контурі дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруги на пасивних елементах:

$$\sum E_k = \sum R_k \cdot I_k.$$

- зміна потенціалу уздовж замкнутого контуру дорівнює нулю.

Розглянемо порядок складання рівнянь за другим законом Кірхгофа на прикладі схеми рис. 3.2, а. Якщо напрями струмів невідомі, то треба задати їх довільно. Крім того, треба домовитися про напрями обходу контуру (наприклад, за годинниковою стрілкою).

Якщо напрям струму (напруги або е.р.с.) співпадає з обходом, в рівнянні ці величини входять зі знаком «плюс», якщо ні – з «мінусом»:

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3 = E_2 - E_3 + E_1, \quad \text{або}$$

$$U_{ab} - U_{bc} - U_{cd} + U_{de} - U_{fe} - U_{af} = 0.$$

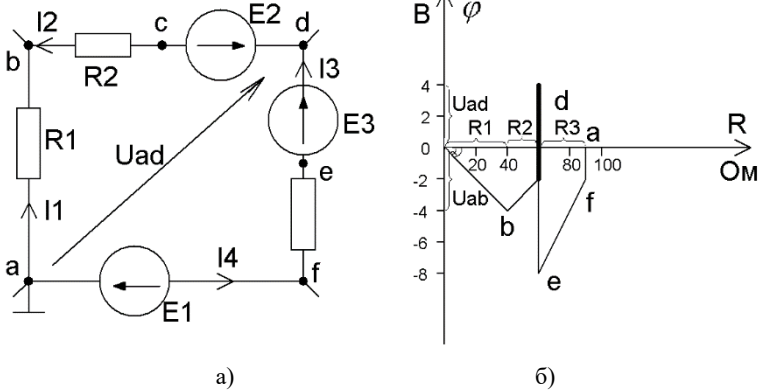


Рисунок 3.2 – Контур електричного кола (а) та його потенційна діаграма (б)

Рівняння за другим законом Кірхгофа можна скласти не тільки для замкнутого контуру, а і для його ділянки, якщо ввести до розгляду напругу між розімкненими кінцями. Наприклад, для схеми рис.3.2,б:

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 - U_{ad} = E_2, \quad \text{або} \quad U_{ad} - R_3 I_3 = -E_3 + E_1.$$

Розв'язання системи рівнянь, що складено за законами Кірхгофа є універсальним методом для обчислення струмів у вітках розгалуженого електричного кола із декількома джерелами живлення. Загальна кількість рівнянь відповідає кількості невідомих струмів, тобто віток у колі. За першим законом складається число рівнянь, на одиницю менше за кількість вузлів у колі. Інші рівняння складають за другим законом Кірхгофа для незалежних контурів.

3.2.5. Потенційна діаграма.

Потенційна діаграма – це графік розподілу потенціалів уздовж будь-якого шляху по ділянкам електричного кола або його заступної схеми. Для кола постійного струму в прямокутній системі координат на осі абсцис відкладають опори ділянок (кожний наступний із кінця попереднього), а по осі ординат – потенціали точок, що позначають границі ділянок. Точки, які відповідають потенціалам, з'єднують між

собою ломаною лінією. Точка, що прийнята за початок відліку, розміщується в початку координат.

Потенціальна діаграма, що побудована для замкненого контуру, є графічною ілюстрацією другого закону Кірхгофа. Її можна будувати як за даними вимірювань потенціалів φ та опорів R ділянок, так і за результатами розрахунків, якщо відомі величини струмів, е.р.с. та опорів.

Побудуємо, наприклад, діаграму для контуру, який зображено на рис. 3.2,а, якщо відомі величини $R_1 = 40 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $E_1 = 2 \text{ В}$, $E_2 = 6 \text{ В}$, $E_3 = 12 \text{ В}$; $I_1 = 0,1 \text{ А}$, $I_2 = 0,1 \text{ А}$, $I_3 = 0,2 \text{ А}$. Напрями струмів показано на схемі.

Розіб'ємо контур на ділянки так, щоб кожна вміщала тільки один елемент. Границі ділянок позначимо буквами. Хай $\varphi_a = 0$. Розрахуємо потенціали точок, обходячи контур за годинною стрілкою, потенціал кожної наступної на основі потенціалу попередньої по формулам (3.1).

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 0, & \varphi_b &= \varphi_a - R_1 I_1 = -4 \text{ В}, & \varphi_c &= \varphi_b + R_2 I_2 = -4 + 2 = -2 \text{ В}, \\ \varphi_d &= \varphi_c + E_2 = -2 + 6 = 4 \text{ В}, & \varphi_e &= \varphi_d - E_3 = 4 - 12 = -8 \text{ В}, \\ \varphi_f &= \varphi_e + R_3 I_3 = -8 + 6 = -2 \text{ В}, & \varphi_a &= \varphi_f + E_1 = -2 + 2 = 0. \end{aligned}$$

Обчислення останнього потенціалу є перевірочним, і те, що він дорівнює нулю означає, що в контурі дотримано другого закону Кірхгофа.

Побудову діаграми почнемо з вибору масштабів. По осі абсцис треба відкласти значення опору $R = R_1 + R_2 + R_3 = 90 \text{ Ом}$. Зручно обрати $m_R = 1 : 10$. По осі ординат уверх максимальне число +4, униз -8. Зручний масштаб $m_V = 1 : 2$ (рис. 3.2, б).

По потенційній діаграмі можна визначити напругу між будь-якими двома точками як вертикальну проекцію відстані між цими точками в масштабі напруги (на рис. 3.2, б це, наприклад, $U_{ad} = \varphi_a - \varphi_d = 4 \text{ В}$).

Тангенс кута нахилу відрізка ломаної лінії, що відповідає ділянці зі споживачем R , є пропорційним до струму на цій ділянці:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{m_V \cdot U_{ab}}{m_R \cdot R_1} = I_1.$$

3.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п. 3.2, конспектом лекцій.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, формулювання мети роботи, схема досліджуваного кола рис. 3.3, таблиці: 3.1, 3.2 і 3.3.

3.4 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді є:

- два джерела $E1$ та $E2$, які вмикаються тумблерами $S4$ та $S5$;
- амперметри постійного струму $A7$; $A8$; $A9$;
- вольтметри постійного струму $V2$;
- резистори змінні $R1$ та $R2$;
- резистор постійний $R5$.

3.5 Робоче завдання

3.5.1. Ввімкнути стенд і тумблери $S4$ та $S5$. Виміряти е.р.с. джерела живлення $E1$ та $E2$. Результати записати до табл. 3.1. Стенд і тумблери вимикнути.

Таблиця 3.1 – Дані досліджу

$E1, \text{В}$	$E2, \text{В}$

3.5.2. Скласти коло за схемою рис. 3.3.

3.5.3. З дозволу викладача ввімкнути стенд і тумблери $S4$ та $S5$. Змінюючи опори резисторів $R1$ та $R2$, встановити деякі значення струмів, орієнтуючись по амперметрах.

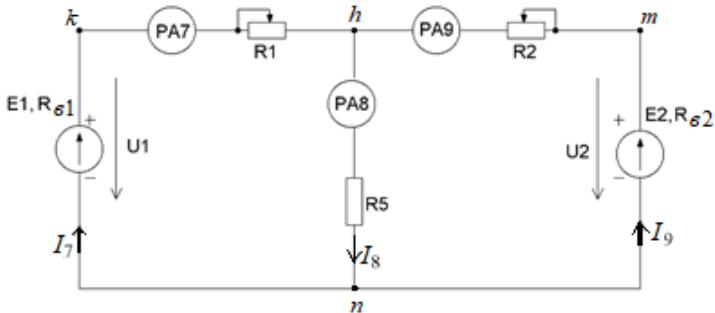


Рисунок 3.3 – Принципова схема розгалуженого кола

3.5.4. Виміряти струми у вітках та напругу на окремих елементах. Спадом напруги на амперметрах знехтувати. Перевірити результати вимірювань за законами Кірхгофа і записати їх у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані дослідіу

Виміряно								Обчислено				
U_1	U_2	U_{R1}	U_{R2}	U_{R5}	I_7	I_8	I_9	$R1$	$R2$	$R5$	R_{B1}	R_{B2}
B	B	B	B	B	A	A	A	Om	Om	Om	Om	Om

3.5.5. Виміряти потенціали точок, що позначені на схемі рис. 3.3 буквами k , h , m , n . Нульовий потенціал надати точці, вказаній викладачем. Результати записати в табл. 3.3. Стенд і тумблери вимкнуті.

Таблиця 3.3 – Дані дослідіу

Виміряно, В				Обчислено, В					
φ_k	φ_h	φ_m	φ_n	φ_k	φ_h	φ_m	φ_n	φ_1	φ_2

3.6 Зміст звіту

3.6.1. Обчислити за законом Ома величини опорів $R1$, $R2$, $R5$, а також внутрішні опори R_{B1} та R_{B2} джерел електричної енергії, (див. Лабораторну роботу №2). Результати записати до табл. 3.2.

3.6.2. Зобразити заступну схему кола, що досліджувалося, маючи на увазі таке: амперметри вважати ідеальними, тобто $R_A = 0$; джерела е.р.с. замінити двоелементними заступними схемами (див. Лабораторну роботу №2); точки, що відокремлюватимуть на заступній схемі ідеальні е.р.с. $E1$ і $E2$ від їх внутрішніх опорів позначити “1” і “2” відповідно.

3.6.3. Обчислити потенціали точок (1, k , h , m , n , 2) заступної схеми, порівняти результати із даними дослідіу і записати в табл. 3.3.

3.6.4. Побудувати потенційну діаграму для контуру з обома е.р.с. Визначити по діаграмі напругу на джерелах U_1 , U_2 та порівняти із даними експерименту (табл. 3.2).

3.6.5. Зробити письмовий висновок про те, як використовуються закони Кірхгофа для аналізу електричних кіл.

3.7 Контрольні запитання

3.7.1. Що таке вітка, вузол, контур електричного кола?

3.7.2. Що таке потенціал, напруга, спад напруги?

3.7.3. Що спільного і яка різниця при вимірюванні напруги і потенціалу?

3.7.4. Що таке заземлення в схемі? Як воно відбивається на розрахунках?

3.7.5. Що прийнято за умовні позитивні напрямки струму, е.р.с. напруги?

3.7.6. Наведіть формули для обчислення потенціалу на ділянках схеми з ідеальним джерелом е.р.с. та резистором.

3.7.7. Наведіть всі формулювання законів Кірхгофа.

3.7.8. Складіть рівняння за другим законом Кірхгофа для довільного контуру та для його частини.

3.7.9. Як обчислити струм у вітках розгалуженого кола за методом безпосереднього використання законів Кірхгофа?

3.7.10. Що таке потенційна діаграма і яка методика її побудування?

3.7.11. Як обчислити потенціали точок на ділянці з джерелом е.р.с., яке має внутрішній опір?

3.7.12. Як за допомогою потенційної діаграми визначити напругу між двома довільними точками кола та струм на окремій ділянці?

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

4.1 Мета роботи

Засвоїти методику застосування другого закону Кірхгофа до аналізу кіл синусоїдного струму; придбати навички аналізу таких кіл за допомогою векторних діаграм; ознайомитись із особливостями роботи кола при послідовному з'єднанні котушки індуктивності та конденсатора.

4.2 Загальні теоретичні відомості

4.2.1. Особливості електромагнітних процесів в електричних колах синусоїдного струму.

Змінне електромагнітне поле викликає в електричному колі явища, яких не буває в колах постійного струму. Фізичні явища в колах змінного струму можна подати в заступних схемах трьома пасивними ідеальними елементами: резистивним R , індуктивним L , ємнісним C .

Змінний за часом струм $i_L(t)$ збуджує в індуктивному елементі е.р.с. самоіндукції $e_L = -L \frac{di_L}{dt}$.

Змінна напруга, що прикладена до ємнісного елемента $u_c(t)$, викликає в ньому струм завдяки почерговому заряду та розряду:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}.$$

Вплив L - та C - елементів при розрахунках електричних кіл враховують введенням відповідних реактансів (опорів):

$$X_L = \omega \cdot L ; \quad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} ,$$

де ω - колова частота коливань напруги мережі живлення.

Очевидно, що при синусоїдному законі змінювання струму за часом на елементах виникають напруги, що змінюються за законом косинуса, тобто зсунуті відносно струму за фазою. При цьому на індуктивнім елементі напруга випереджає струм на чверть періоду, а на ємніснім – відстає також на чверть періоду. В резистивному опорі струм і напруга співпадають за фазою: $u_R(t) = R \cdot i_R(t)$.

При розрахунках в електричних колах синусоїдного струму треба брати до уваги не тільки амплітудні значення I_m , U_m струмів та напруги, а також їхні початкові фази: ψ_i , ψ_U . Це зручно робити за допомогою комплексних амплітуд:

$$\underline{U}_m = U_m \cdot e^{j\psi_u} \quad \text{та} \quad \underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i},$$

або комплексів діючих значень:

$$\underline{U} = U \cdot e^{j\psi_u} \quad \text{та} \quad \underline{I} = I \cdot e^{j\psi_i},$$

де $U = U_m / \sqrt{2}$ та $I = I_m / \sqrt{2}$.

З цього випливає і поняття комплексного опору (імпедансу)

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z \cdot e^{j\varphi} = R + jX,$$

тут: φ – фазовий зсув між струмом і напругою на ділянці, де визначається імпеданс;

R - резистанс або дійсна складова комплексного імпедансу;

X - реактанс або уявна складова комплексного імпедансу.

Співвідношення між R , X , Z та φ зручно запам'ятати (рис. 4.1, а) за допомогою так званого трикутника опорів.

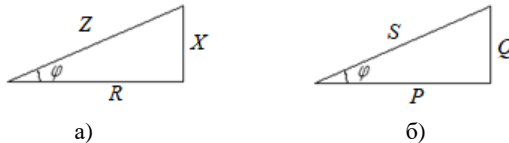


Рисунок 4.1 - Трикутник опорів і трикутник потужності

4.2.2. Векторні діаграми для кіл синусоїдного струму

Е.р.с., струм, напруга – це скалярні величини, але для зручності і наочності їх можна зображувати радіус-векторами. Довжина вектору дорівнює діючому (або амплітудному) значенню, а кут відносно горизонтальної осі (яку позначають: $+1$) – початковій фазі. Позитивні кути відкладають *проти годинної стрілки* (рис. 4.2). Сукупність векторів, які зображують струми і напругу однієї схеми, називають *векторною діаграмою*. Якщо вектори напруги на окремих елементах або ділянках контуру зображують в такому ж порядку (наступні з кінця попереднього), в якому ділянки складають контур, діаграма зветься *топографічною*. За її допомогою зручно визначати напругу між двома довільними точками кола як відстань між такими точками на діаграмі.

Векторні діаграми можна будувати двома засобами:

- за даними вимірювань треба спочатку обрати якийсь вектор (струм чи напругу) за основу побудови, прийняти його початкову фазу за нуль і розташувати горизонтально. Наприклад, при послідовному сполученні за основу зручно взяти вектор струму, оскільки він однаковий для всіх елементів;
- за даними обчислень струмів та напруги в комплексній формі діаграма будується на комплексній площині із дотриманням масштабів.

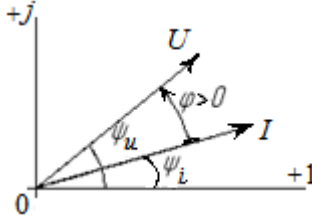


Рисунок 4.2 - Зображення струму і напруги векторами на комплексній площині.

Фазовий зсув між струмом і напругою на ділянці ($\varphi = \varphi_U - \varphi_i$) на діаграмі відраховують від вектору струму до вектору напруги. Наприклад, на рис 4.2, фазовий струм позитивний, оскільки орієнтований проти годинної стрілки.

4.2.3. Енергетичні співвідношення в колі синусоїдного струму.

В колі постійного струму вся електрична енергія джерела неперворотно перетворюється в споживачах в інші види енергії, наприклад, в тепло. Швидкість цих перетворень характеризують так званою активною потужністю $P = R \cdot I^2$, *Вт*. Такі перетворення енергії відбуваються також і в колі синусоїдного струму. В заступній схемі їм відповідає резистивний елемент R .

Активна потужність вимірюється ватметром, у якого струмова обмотка увімкнена послідовно, а обмотка напруги – паралельно до тієї ділянки, де вимірюється активна потужність.

Крім цього, в колі синусоїдного струму відбувається обмін енергією між електромагнітним полем споживачів і джерелом, а також між магнітним і електричним полями окремих споживачів. Швидкість такого обміну характеризують *реактивною* потужністю Q , *ВАр*.

В заступних схемах ці процеси подані реактивними елементами L та C :

$$Q_L = X_L I_L^2; \quad Q_C = X_C I_C^2 .$$

Сумарна реактивна потужність в електричному колі: $Q = Q_L - Q_C$.

Останній вираз означає, що енергетичні процеси в магнітному та електричному полях протифазні.

Загальну характеристику роботи джерела чи споживача можна одержати за допомогою повної потужності S, VA .

Якщо відомі комплекси діючих значень струму $\underline{I} = I \cdot e^{j\beta}$ та напруги $\underline{U} = U \cdot e^{j\alpha}$ на якійсь ділянці, то комплекс повної потужності:

$$S = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = U e^{j\alpha} \cdot I e^{-j\beta} = U \cdot I \cdot e^{j(\alpha-\beta)} = S \cdot e^{j\varphi} = P + jQ .$$

Співвідношення між P, Q, S, φ зручно з'ясувати з трикутника потужності (рис. 4.1, б).

Важливою характеристикою роботи електричного кола є відношення $P/S = \cos \varphi$. Його називають *коефіцієнтом потужності*. Він вказує, яка саме частка повної електричної потужності перетворюється в потужність інших видів енергії.

4.2.4. Аналіз кіл синусоїдного струму

Аналіз роботи і розрахунок електричних кіл синусоїдного струму здійснюють по заступним схемам на основі законів Кірхгофа, які можуть вживатись тільки у символічній та векторній формі або для миттєвих значень. У табл. 4.1 наведено основні співвідношення для окремих елементів заступних схем кіл синусоїдного струму, які узагальнюють все викладене в п. 4.2.1. – 4.2.3.

4.2.5. Послідовне з'єднання елементів заступної схеми.

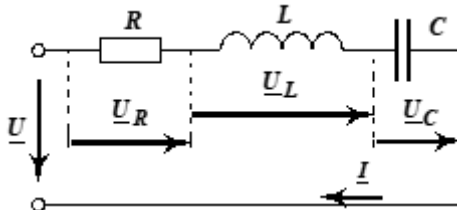
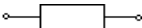


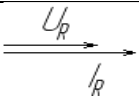
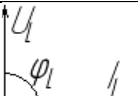
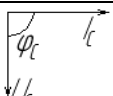
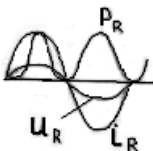
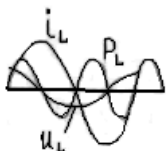
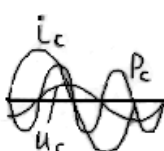


Рисунок 4.3 – Послідовне з'єднання резистивного, індуктивного і ємнісного елементів

Таблиця 4.1 – R, L, C - елементи. Теоретичні положення.

Назва елемента	Резистивний	Індуктивний	Ємнісний
Заступна схема			
Зв'язок між миттєвими значеннями струму і напруги	$U_R = R \cdot i_R$	$U_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$	$U_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$
Миттєве значення u при $i = I_m \sin \omega t$	$u_R = U_m \sin \omega t$	$u_L = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$	$u_C = U_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$
Закон Ома для комплексних амплітуд	$U_{mR} = R \cdot I_{mR}$	$U_{mL} = jX_L \cdot I_m$	$U_{mC} = X_C e^{-j90^\circ} \cdot I_{mC}$
Співвідношення між початковими фазами	$\varphi_R = \psi_u - \psi_i = 0$	$\varphi_L = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$	$\varphi_C = \psi_u - \psi_i = -90^\circ$
Закон Ома для діючих значень	$U_R = R \cdot I_R$	$U_L = L \cdot \omega \cdot I_L$	$U_C = \frac{1}{\omega C} \cdot I_C$
Комплексний опір або імпеданс	$\underline{Z}_R = R$	$\underline{X}_L = jX_L = X_L e^{j90^\circ}$	$\underline{Z}_C = -jX_C = X_C e^{-j90^\circ}$
Реактанс (реактивний опір)	0	$X_L = L\omega$	$X_C = \frac{1}{C\omega}$
Векторна діаграма			
Часові діаграми струму i , напруги U , потужності P			
Активна потужність P , [Вт]	$P_R = RI^2 = U_R I_R$	0	0
Реактивна потужність, Q , Вар	–	$Q_L = X_L I_L^2 = U_L I_L$	$Q_C = X_C I = U_C I$

Аналіз *послідовного* з'єднання проводять на основі другого закону Кірхгофа, маючи на увазі, що струм всіх елементів однаковий. Для найпростішої схеми (рис.4.3):

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = (R + jX_L - jX_C) \cdot I = Z \cdot I ,$$

де: $Z = R + j(X_L - X_C)$ – вхідний імпеданс електричного кола.

Залежно від фазового зсуву φ можливі три варіанти роботи джерела, які зручно дослідити за допомогою векторних діаграм (рис.4.4).

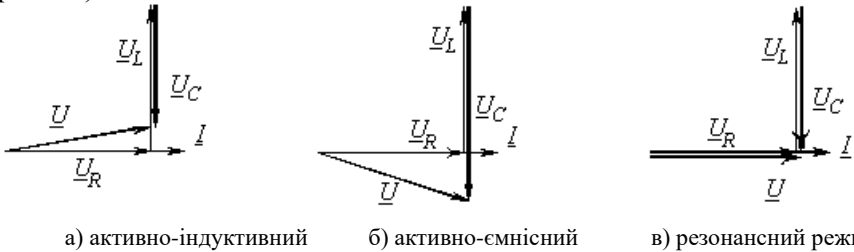


Рисунок 4.4 – Векторні діаграми при різних режимах роботи послідовного кола

У випадку, коли $X_L > X_C$, струм відстає від напруги джерела живлення ($\varphi > 0$), характер навантаження буде активно-індуктивний (Рис. 4.4, а).

У випадку, коли $X_L < X_C$ (Рис. 4.4, б), струм випереджає загальну напругу ($\varphi < 0$), характер навантаження активно-ємнісний.

У випадку, коли $X_L = X_C$ у колі має місце резонанс напруги, а $X_L = X_C$ є умовою резонансу напруги. При цьому струм співпадає з напругою за фазою $\varphi = 0$, $U = U_R$, а $Z_0 = R$, тобто мінімальне. Резонансний струм $I_{рез} = U/R$ співпадає за фазою зі загальною напругою. Через це напруги на індуктивних та ємнісних елементах можуть сягати дуже великих значень, які обумовлені співвідношенням між опорамі елементів:

$$\frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{X_L}{R} = \frac{X_C}{R} .$$

4.2.6. Заступна схема індуктивної котушки.

Індуктивна котушка в електричних колах використовується для створення магнітного поля. Але при проходженні по ній струму вона нагрівається. Отже її заступна схема складається з двох елементів (рис.4.5,а). Тому виміряти напругу тільки на індуктивному елементі U_L неможливо. Вольтметр, що підключається до затискачів котушки, показує значення повної напруги $U_k = \sqrt{U_{RK}^2 + U_L^2}$.

Активну U_{RK} та реактивну U_L складові (рис.4.5,б) можна визначити за відомими параметрами заступної схеми котушки R_K та X_L , які розраховують за допомогою активної потужності котушки P_K :

$$R_K = \frac{P_K}{I^2}; \quad Z_K = \frac{U_K}{I}; \quad X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}.$$

$$U_{RK} = R_K \cdot I \quad U_L = X_L \cdot I.$$

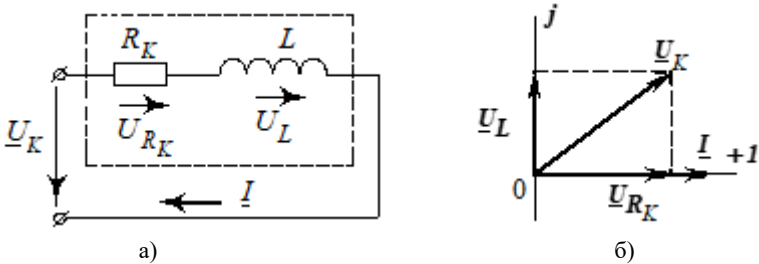


Рисунок 4.5. Заступна схема (а) та векторна діаграма (б) індуктивної котушки

4.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п. 4.2, конспектом лекцій.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, формулювання мети роботи, схема досліджуваного кола рис. 4.6, таблиця 4.2.

4.4 Опис лабораторної установки

Для проведення лабораторної роботи на стенді є:

- джерело синусоїдальної напруги на 36 В (гнізда A ; B);
- вимірювальні прилади змінного струму W , $A2$, $V1$;
- резистор змінний $R1$;
- індуктивна котушка із втратами $L1$;
- конденсатор змінної ємності C .

4.5 Робоче завдання

4.5.1. Скласти коло за схемою рис. 4.6. Тумблери $S3.1...S3.4$ вимкнути. З дозволу викладача включити стенд. Змінюючи опір резистора $R1$ встановити деяке значення струму. Виміряти напругу мережі U і записати в табл. 4.2.

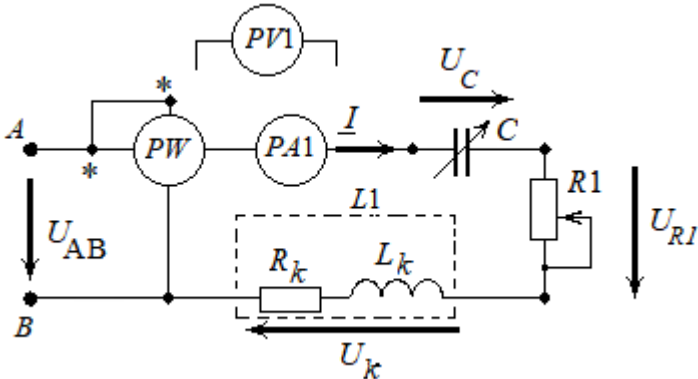


Рисунок 4.6 - Принципова схема електричного кола

4.5.2. Вмикаючи по чергову тумблери від $S3.1$ до $S3.4$, змінювати ємність конденсатора. Для кожного значення ємності вимірювати напругу на конденсаторі U_C , резисторі U_R і котушці U_K . Записувати покази у табл. 4.2. Туди ж записувати значення струму I та активної потужності P . Стенд вимкнути.

4.6.2. Зобразити на однім полі графіки залежності:

$I = f_1(X_C)$, $Z = f_2(X_C)$, $U_L = f_3(X_C)$, $U_C = f(X_C)$, $\cos \varphi = f(X_C)$, кожну величину у власнім масштабі, для чого зробити декілька вертикальних осей.

4.6.3. Побудувати по даних табл. 4.2 в масштабі векторні топографічні діаграми напруги для двох випадків: $\varphi > 0$ та $\varphi < 0$. Показати на діаграмах вектори напруги на вході кола і на котушці. Порівняти їх величину із виміряною.

4.6.4. Знайти величину ємності конденсатора, при якій в електричному колі настає режим резонансу.

4.6.5. Зробити письмовий висновок про те, звідки беруться фазові зсуви між струмами та напругами в колах синусоїдного струму і які особливості аналізу цих кіл пов'язані з ними.

4.7 Контрольні запитання

4.7.1. Як поведуть себе індуктивні та ємнісні елементи в колах постійного та синусоїдного струму?

4.7.2. Що таке реактанси і як виводять формули для їх обчислення через колову частоту?

4.7.3. Звідки беруться фазові зсуви між струмами та напругами і як їх треба урахувати при аналізі кіл синусоїдного струму?

4.7.4. Дайте визначення комплексній амплітуді і комплексному імпедансу. Що таке діюче значення синусоїдного струму?

4.7.5. Що таке трикутники опорів та потужності, коефіцієнт потужності?

4.7.6. Що таке векторна діаграма електричного кола, з якою метою її будують? Як по ній визначити фазові зсуви?

4.7.7. Що таке активна потужність, як її виміряти і обчислити для кола синусоїдного струму?

4.7.8. Що таке реактивна і повна потужності? Як їх обчислюють?

4.7.9. Наведіть усі вказані в табл. 4.1 характеристики для резистивного, індуктивного та ємнісного елементів і поясніть їх.

4.7.10. Які є характеристики послідовного з'єднання споживачів в колі синусоїдного струму?

4.7.11. Що таке резонанс напруги і які властивості цього режиму роботи?

Очевидний зв'язок між параметрами обох схем:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \cdot \frac{X}{R^2 + X^2} = G - jB;$$

$$G = \frac{R}{Z^2}; \quad B = \frac{X}{Z^2} = \frac{X_L - X_C}{Z^2} = \frac{X_L}{Z^2} - \frac{X_C}{Z^2} = B_L - B_C,$$

тут: X_L, X_C – індуктивний та ємнісний реактанс (опори);

B_L, B_C – індуктивний та ємнісний susceptанси (провідності).

Використання паралельної заступної схеми дозволяє подати струм, як такий, що складається із двох складових: *активної* і *реактивної*:

$$\underline{I} = I_a + jI_p = G \cdot \underline{U} - jB \cdot \underline{U}.$$

Активна складова струму I_a співпадає за фазою із прикладеною напругою \underline{U} і відповідає за перенесення від джерела до споживача активної потужності $P = I_a \cdot U = G \cdot U^2$.

Реактивна складова струму

$$jI_p = -jB\underline{U} = -j(B_L - B_C) \cdot \underline{U} = j(I_C - I_L).$$

зсунута відносно напруги на $+90^\circ$ для індуктивного споживача і на -90° – для ємнісного. Реактивна складова струму забезпечує обмін енергією між джерелом і електромагнітним полем споживачів, тобто обумовлює наявність реактивної потужності $Q = I_p U = BU^2$.

5.2.2. Провідності та векторні діаграми.

Розрахунок паралельного з'єднання споживачів (рис. 5.2,а) можна проводити символічним методом, якщо характеризувати споживачів їхніми комплексними імпедансами $\underline{Z} = R + jX$.

Але для розуміння особливостей паралельного з'єднання зручніше скористатися комплексними адмітансами, а струм подати через активні і реактивні складові (рис. 5.3, б).

Використовуючи поняття та формули, що наведені у попередньому розділі, отримаємо:

$$I_{a1} = G_1 \cdot \underline{U} = \underline{U} \cdot \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad I_{a2} = G_2 \cdot \underline{U} = \underline{U} \cdot \frac{R_2}{Z_2^2}.$$

$$I_{p1} = B_1 \cdot \underline{U} = \underline{U} \cdot \frac{X_1}{Z_1^2} = \underline{U} \cdot \frac{X_L}{Z_1^2} = I_L ;$$

$$I_{p2} = B_2 \cdot \underline{U} = \underline{U} \cdot \frac{X_2}{Z_2^2} = \underline{U} \cdot \frac{-X_C}{Z_2^2} = -I_C .$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, для схеми рис. 5.2,а:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = (I_{a1} + I_{a2}) - j(I_L - I_C) .$$

Активна і реактивна складові загального струму є сумою аналогічних складових окремих віток.

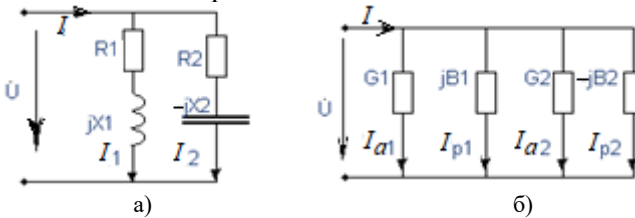


Рисунок 5.2 – Схема паралельного з'єднання споживачів (а) та її заступна схема (б)

Фазовий зсув φ між загальним струмом I і прикладеній до паралельного з'єднання напруги U залежить від співвідношення між провідністю паралельних віток.

Можливі три варіанти роботи кола. Їх зручно розглянути за допомогою векторних діаграм (рис. 5.3). Якщо індуктивний суццептанс більше ємнісного (рис. 5.3,а), загальний струм відстає від напруги за фазою на кут $\varphi > 0$. Векторна діаграма (рис. 5.3,б) відповідає випадку, коли перебільшує ємнісний суццептанс, струм випереджає напругу на кут $\varphi < 0$.

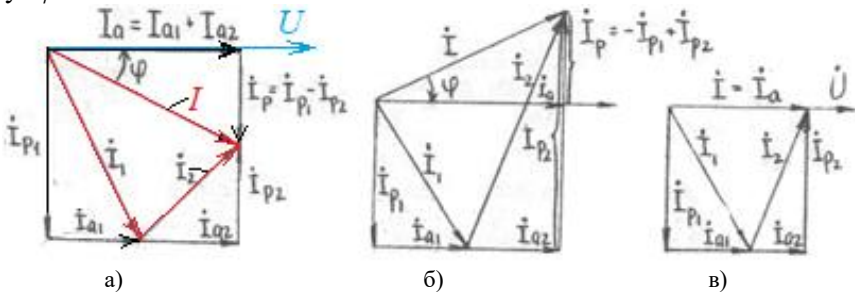


Рисунок 5.3 - Векторні діаграми до схеми рис. 5.2, а

Рівність susceptансів $B_L = B_C$ є умовою резонансу струмів. Це режим, при якому адмітанс кола чисто резистивний і мінімальний за величиною: $Y_{резон} = G = G_1 + G_2$. Загальний струм теж мінімальний і може бути значно меншим за струми віток, бо не містить реактивної складової: $I_{рез} = GU$. За умови резонансу можна обчислити значення частоти ω індуктивності L або ємності C , при яких можливий резонанс (рис. 5.3, в).

5.2.3 Компенсація реактивної потужності електроустановок

Чим більша частина електроенергії, яку виробляє джерело перетворюється в споживачах в інші види, тим ефективніше використовується джерело. Тому в промисловості стоїть задача всіляко зменшувати реактивну потужність Q індуктивних споживачів. Це можна зробити шляхом її компенсації: до індуктивного споживача паралельно підключають конденсатор. При цьому зменшується реактивна складова загального струму $I_p = I_L - I_C$, а звідси і його модуль $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$. Ємність конденсатора як правило підбирають так, щоб загальний коефіцієнт потужності електроустановки $\cos\varphi$ дорівнював одиниці або був трохи менший.

5.2.4. Побудування векторних діаграм за допомогою циркуля

Якщо відома довжина трьох векторів, а також те, що сума двох із них повинна дорівнювати третьому, взаємне розташування векторів на площині можна визначити за допомогою циркуля. Розглянемо, наприклад, як в такий спосіб побудувати векторну діаграму для схеми (рис. 5.4,а) тільки по відомих діючих значеннях струмів у вітках $I_1=0.4$ А; $I_2=0.5$ А; $I_3=0.3$ А.

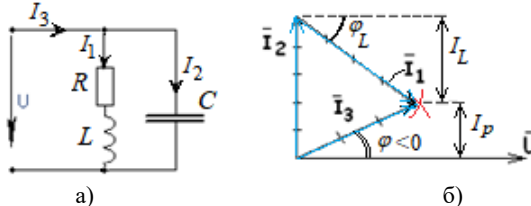


Рисунок 5.4 – Заступна схема розгалуженого кола (а) та її векторна діаграма (б)

Обираємо масштаб для векторів струму (наприклад, $I=0.1 \text{ A/cm}$). За основу візьмемо вектор напруги, як спільного для обох віток. Під кутом 90° до нього в бік випередження (проти обігу годинникової стрілки) проведено вектор струму I_2 , бо вітка має *тільки* ємнісний елемент. З кінця цього вектору, як із центру циркулем радіусом, що дорівнює в масштабі струму I_1 , проведемо дугу. Із початкової точки вектору I_2 , як із центру, проведемо іншу дугу радіусом, що дорівнює в масштабі струму I_3 . Точка, де два кола перетинаються, є єдиною точкою, в якій виконується перший закон Кірхгофа: $\overline{I_3} = \overline{I_2} + \overline{I_1}$.

5.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п. 5.2, конспектом лекцій.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, формулювання мети роботи, схема досліджуваного кола рис. 5.5, таблиця 5.1.

5.4 Опис лабораторної установки

Для проведення лабораторної роботи на стенді є:

- джерело синусоїдної напруги на 36 В (гнізда А, В);
- вимірювальні прилади змінного струму А2, А4, А6, W, V1;
- індуктивна котушка із втратами L2;
- резистор змінного опору R1 (тумблери S1.1...S1.4);
- конденсатор змінної ємності С (тумблери S3.1...S3.4).

5.5 Робоче завдання

5.5.1. Скласти коло за схемою (рис. 5.5). Тумблери S3.1...S3.4 вимкнути. З дозволу викладача ввімкнути стенд. Змінюючи опір резистора R1, встановити деяке значення струму. Виміряти напругу мережі і записати в табл. 5.1.

5.5.2. Вмикаючи почергово тумблери S3.1...S3.4, змінювати ємність конденсатора. Для кожного випадку записувати покази вимірювальних приладів в табл. 5.1. Стенд вимкнути.

Таблиця 5.1. – Дані досліду

Виміряно					Визначено По діаграмах			Обчислено за п. 5.4.2. та 5.4.3.			
U	P	I_2	I_4	I_6	φ	I_a	I_L	S	Q	$\cos \varphi$	φ
B	$Вт$	A	A	A	<i>град</i>	A	A	$ВА$	$ВАр$	—	<i>град</i>
...											
...											

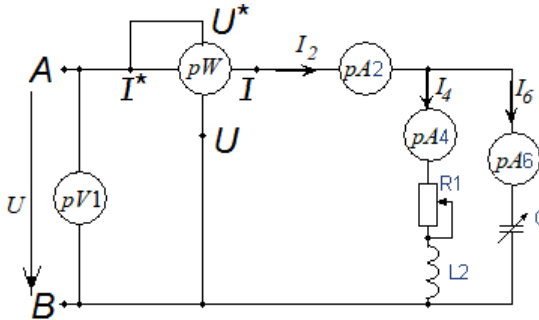


Рисунок 5.5 - Принципова схема електричного кола із паралельним з'єднанням віток

5.6 Зміст звіту

5.6.1. За допомогою циркуля і лінійки побудувати в масштабі векторні діаграми струмів для всіх випадків і визначити по них величину і знак фазового зсуву φ між струмом і напругою на джерелі живлення. Визначити по діаграмах активну I_a та реактивну I_L складові струму I_4 . Результати записати до табл. 5.1.

5.6.2. Обчислити за формулами, що наведено в розділі 5.2 і записати до табл. 5.1 повну S та реактивну Q потужності кола, а також коефіцієнт потужності $\cos(\varphi)$ і фазовий зсув φ . Порівняти обчислене значення φ із визначеним по векторних діаграмах (знак реактивної потужності Q дорівнює знаку φ).

5.6.3. Обчислити і записати в табл. 5.1. ємність конденсатора для кожного випадку, маючи на увазі, що конденсатор без втрат:

$$C = \frac{I_6}{U \cdot \omega}.$$

5.6.4. Зобразити на одному полі графіки залежності

$$I_2 = f_1(C); \quad Q = f_2(C); \quad \cos \varphi = f_3(C) \quad ,$$

кожну величину у власному масштабі, для чого зробити три вертикальні осі.

5.6.5. Зробити письмовий висновок проте, як і чому змінюється реактивна потужність схеми Q при зміні ємності конденсатора і як це явище можна використовувати при експлуатації електроустановок.

5.7 Контрольні запитання.

5.7.1. Що таке трикутник провідностей? Наведіть співвідношення між адмітансом, кондуктансом, сусцептансом і фазовим зсувом на ділянці електричного кола.

5.7.2. Наведіть формули переходу від послідовної (R, X) заступної схеми двополюсника до паралельної (G, B) , і навпаки.

5.7.3. Що таке трикутник струмів? Яку роль в роботі джерела електроенергії відіграють активна і реактивна складові струму?

5.7.4. Наведіть методику аналізу паралельного сполучення споживачів за допомогою провідностей.

5.7.5. Дайте характеристику режиму резонансу струмів.

5.7.6. Що таке компенсація реактивної потужності електроустановок, з якою метою її здійснюють?

5.7.7. Поясніть ідею підвищення коефіцієнту потужності за допомогою конденсатора.

5.7.8. Наведіть, як виглядає формула резонансної частоти для заступної схеми (рис. 5.4,а) і якою буде резонансна частота, якщо в ній:

$$R=10 \text{ Ом}; \quad L=10 \text{ мГн}; \quad C=20 \text{ мкФ?}$$

6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗІ З'ЄДНАННЯМ СПОЖИВАЧІВ ЗІРКОЮ

6.1 Мета роботи

Засвоїти основні співвідношення між струмами і напругами в трифазних колах; придбати навички аналізу трифазних кіл за допомогою векторних діаграм; ознайомитись із особливостями роботи трифазного кола, з'єданого за схемами три- і чотири- провідної зірки.

6.2 Загальні теоретичні відомості

6.2.1. Основні визначення.

Трифазним колом називають сукупність електрично зв'язаних трьох однофазних кіл, в яких діє трифазна е.р.с. Трифазна е.р.с – це три синусоїдні е.р.с. однакової частоти і амплітуди, зсунуті одна відносно одної за фазою на 120° , що створено одним джерелом електричної енергії.

Фізично існуюча частина трифазної системи, що характеризується одним і тим же струмом, називається *фазою*. Початки фаз трифазного генератора позначають великими буквами $A;B;C$. Початки фаз навантаження – маленькими буквами a,b,c . Кінці фаз позначаються відповідно $X;Y;Z$ і $x;y;z$. Прямою послідовністю чергування фаз називається така, коли синусоїди фазних е.р.с. ідуть одна за одною в алфавітному порядку.

Існує два засоби з'єднування фаз між собою: *зіркою* і *трикутником*. При з'єднанні зіркою (рис.6.1) кінці фазних обмоток генератора і кінці трьох фаз навантаження з'єднуються в точки, що називаються відповідно нейтральною точкою генератора N і нейтральною точкою споживачів N' . Потенціал $\varphi_N = 0$.

Різницю потенціалів $\varphi_{N'} - \varphi_N = \underline{U}_N$ називають *напругою зміщення нейтралі*. Провід, який з'єднує нейтральні точки генератора і навантаження, називається *нейтральним*, а струм в ньому I_N – струм в нейтралі. Коло, де споживачі з'єдані зіркою із нейтральним проводом, називають чотири провідним, без нього – три провідним.

Дроти, що з'єднують початки фаз генератора і споживача, називають *лінійними*, струми в них I_A, I_B, I_C – *лінійні струми*.

Напруги між *початками фаз* – це *лінійні напруги*: U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – на генераторі і U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – на споживачі.

Напряга між початком і кінцем фази називається *фазною*. При з'єднанні зіркою їх позначають U_A, U_B, U_C – на генераторі та U_a, U_b, U_c – на споживачі.

Струми в фазах споживача I_a, I_b, I_c – називають *фазними*.

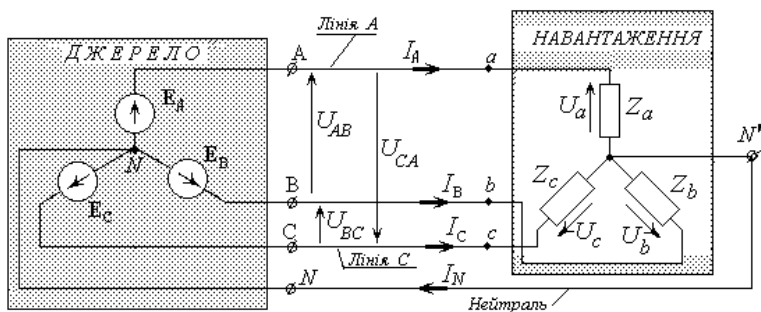


Рисунок. 6.1 – Заступна схема трифазного кола зі з'єднанням фаз зіркою

Споживачі, що підключаються до трифазного джерела, можуть бути однофазними і трифазними. До перших відносяться електричні лампи освітлювання, побутові прилади, ЕОМ тощо. До других – трифазні двигуни, трансформатори, індукційні печі.

Якщо комплексні імпеданси фаз споживачів дорівнюють один одному: $Z_a = Z_b = Z_c = Z \cdot e^{j\varphi}$, то такі споживачі називаються *симетричними*. Як правило, трифазне навантаження є симетричним, а сукупність однофазних – *несиметричним*.

Несиметричні режими виникають також при аваріях в електричному обладнанні: обриві або короткому замиканні однієї з фаз симетричного трифазного споживача або на лініях електричних мереж.

6.2.2. Основні співвідношення.

Загальноприйняті позитивні напрямки струмів і напруги в трифазних колах вказані на рис. 6.1. Опір з'єднувальних проводів вважаємо близькими до нуля. Тому лінійні напруги на генераторі і на навантаженні рівні одна одній.

Фазні напруги на генераторі подібно до е.р.с. утворюють симетричну систему (рис. 6.2).

$$\underline{U}_A = U_\phi e^{j0}; \quad \underline{U}_B = U_\phi e^{-j120}; \quad \underline{U}_C = U_\phi e^{j120}. \quad \underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C = 0.$$

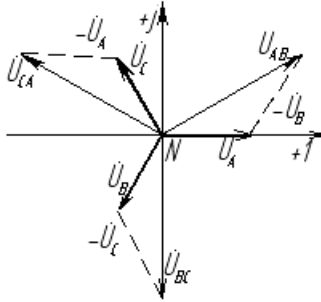


Рисунок 6.2 - Векторна діаграма напруги на генераторі

Лінійні напруги на генераторі при з'єднанні його фаз зіркою згідно із другим законом Кірхгофа дорівнюють геометричній різниці відповідної фазної напруги:

$$U_{AB} = U_A - U_B = U_\phi e^{j0} - U_\phi e^{-j120^\circ} = U_{\text{Л}} e^{j30^\circ} ;$$

$$U_{BC} = U_B - U_C = U_\phi e^{-j120^\circ} - U_\phi e^{j120^\circ} = U_{\text{Л}} e^{-j90^\circ} ;$$

$$U_{CA} = U_C - U_A = U_\phi e^{j120^\circ} - U_\phi e^{j0} = U_{\text{Л}} e^{j150^\circ} ,$$

де $U_{\text{Л}} = \sqrt{3} \cdot U_\phi$.

Комплекс діючого значення напруги зміщення нейтральні.

$$\underline{U}_{N'N} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_a + \underline{U}_B \underline{Y}_b + \underline{U}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} , \quad (6.1)$$

де $\underline{Y}_a = 1/\underline{Z}_a$, $\underline{Y}_b = 1/\underline{Z}_b$, $\underline{Y}_c = 1/\underline{Z}_c$ – комплексні адмітанси фаз споживача;

\underline{Y}_N – комплексний адмітанс нейтрального дроту.

($\underline{Y}_N = \infty$, якщо цей провід існує, і $\underline{Y}_N = 0$, якщо його немає).

Комплекси фазної напруги на споживачі:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{N'N}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{N'N}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{N'N} . \quad (6.2)$$

Струми в лініях обчислюють за законом Ома:

$$\underline{I}_a = Y_a U_a; \quad \underline{I}_b = Y_b U_b; \quad \underline{I}_c = Y_c U_c; \quad (6.3)$$

Очевидно, що при з'єднанні зіркою фазні і лінійні струми однакові:

$$I_L = I_\phi, \quad I_a = I_A, \quad I_b = I_B, \quad I_c = I_C.$$

Згідно з першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \underline{I}_N \quad \text{— при наявності нейтрального дроту;}$$

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0 \quad \text{— при його відсутності.}$$

6.2.3. Симетричний режим три провідної зірки.

При симетричному навантаженні напруга зміщення нейтралі:

$$\underline{U}_{N'N} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) = 0.$$

Тому напруга на фазах споживача дорівнює відповідній напрузі на генераторі (див. формули 6.2). На векторній діаграмі (рис.6.3.) нейтральна точка споживача N' співпадає із нейтральною точкою генератора N . Струми (згідно із формулами 6.3) утворюють симетричну систему. Фазовий зсув (φ) між струмом і напругою на кожній фазі споживача однаковий і залежить від співвідношення параметрів його заступної схеми R та X :

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right). \quad (6.4)$$

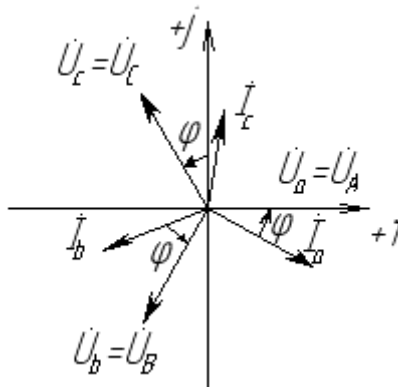


Рисунок 6.3 - Векторна діаграма при симетричному навантаженні

6.2.4. Несиметричний режим три провідної зірки

При несиметричному навантаженні напруга зміщення нейтралі $U_{N'N} \neq 0$. Проаналізуємо наслідки цього факту за допомогою векторної діаграми. Положення вектору $U_{N'N}$ на комплексній площині може бути визначено або за розрахунком (формула 6.1) або за даним вимірювань з використанням циркуля і лінійки.

Побудова починається з векторів фазної напруги на генераторі (рис 6.4,а) U_A , U_B , U_C . Потім з кінців цих векторів як із центрів, проводять кола радіусами, які в обраному масштабі дорівнюють фазним напругам на споживачах U_a , U_b , U_c . Місце перетину трьох кіл – це й є положення нейтральної точки споживача N' , тобто місце кінця вектору $U_{N'N}$. Напруги на споживачах є геометричними різницями між векторами U_A , U_B , U_C і $U_{N'N}$ відповідно.

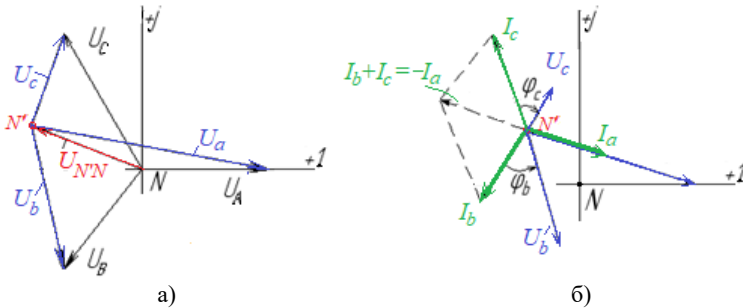


Рисунок 6.4 – Приклад побудови векторної діаграми напруги (а) та струмів (б) для несиметричної три провідної зірки

Очевидно, що напруги на споживачах не тільки будуть не симетричні, але й виявляються взаємно залежними. Такий перекик фазної напруги є основним недоліком три провідної зірки. З цієї причини несиметричне навантаження ніколи не підключають зіркою без нейтрального проводу.

Вектори фазних струмів I_a , I_b , I_c відкладаються з точки N' як із початку координат (рис.6.4,б). При цьому кути зсуву фаз між фазними струмами і напругами на споживачі визначаються за формулою (6.4), для кожної фази окремо. Векторна діаграма, побудована для випадку, коли фаза "а" має чисто резистивне навантаження ($\varphi_a = 0$), фаза "b" – резистивне-індуктивне ($\varphi_b > 0$), фаза "c" – резистивне-ємнісне ($\varphi_c < 0$). Перевірка: повинно виконуватись співвідношення $I_a + I_b + I_c = 0$.

6.2.5. Обрив фаз в три провідній зірці.

Окремим випадком несиметричного навантаження є обрив фазного проводу симетричного споживача. Як приклад роздивимось обрив фази «а» при резистивно-індуктивному навантаженні. Після обриву ($Z_a = \infty$) фази споживача із імпедансами $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{i\varphi}$ виявляються поєднаними між собою *послідовно* і знаходяться вони під дією однофазної лінійної напруги $U_{BC} = U_{\Delta} e^{-j90^\circ}$ (рис.6.5,а). Таким чином, трифазне коло перетворюється на *однофазне*. Незважаючи на це, при розрахунках умовні позитивні напрямки струмів і напруги прийнято залишати незмінними.

Напругу зміщення нейтралі знаходимо по формулі (6.1) при умові: $Y_a=0$. На векторній діаграмі (рис.6.5,б): нейтральна точка N' лежить посередині напруги U_{bc} , оскільки $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c$; фазні напруги на споживачах $U_b = U_c = U_{\phi} \cdot \sqrt{3}/2 = 0,866 \cdot U_{\phi}$. Відповідно у $\sqrt{3}/2$ рази зменшуються і струми. Фактично у колі є один струм $I_b = -I_c$, зсунутий відносно напруги \underline{U}_{bc} на кут φ .

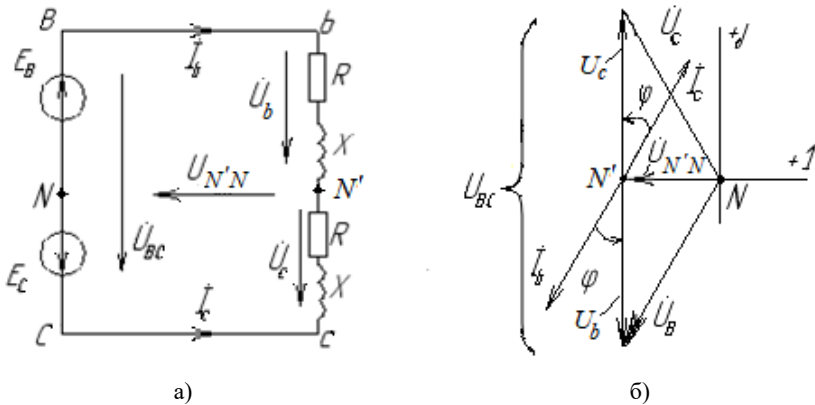
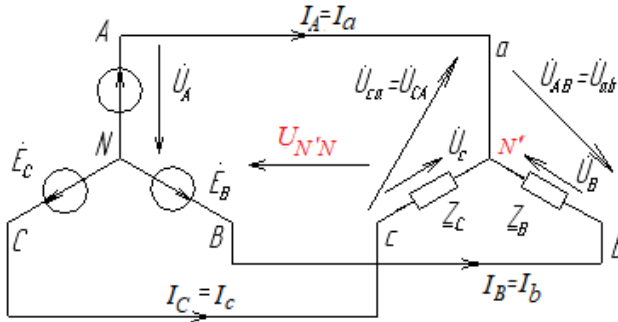


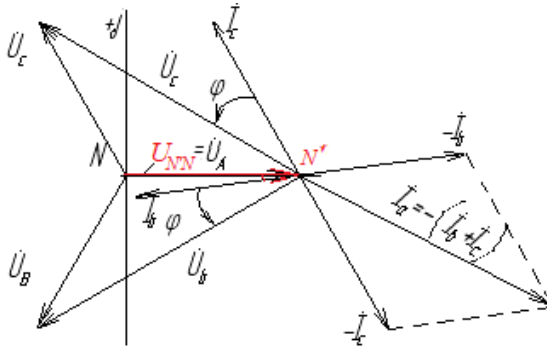
Рисунок 6.5 – Заступна схема (а) і векторна діаграма (б) режиму обриву фази «а» три провідній зірки

6.2.6. Коротке замикання фази споживача в три провідній зірці.

На відміну від кола із нейтральним проводом режим короткого замикання фази не спричиняє аварії джерела, бо не відбувається багаторазового зростання струму. Переконаємося в цьому з векторної діаграми для короткого замикання фази «а» резистивно-індуктивного споживача (рис. 6.б.,а).



а)



б)

Рисунок 6.6 – Заступна схема (а) і векторна діаграма (б) режиму короткого замикання фази «а» три провідній зірки

При відсутності опору проводів $Z_a = 0$ і $U_a = 0$ нейтральна точка споживача N' співпадає із точкою A генератора. Зі схеми, а також з її векторної діаграми (рис.6.б, б) видно, що $\underline{U}_{N'N} = \underline{U}_A$.

Фазні напруги на споживачах: $\underline{U}_b = -\underline{U}_{AB}$; $\underline{U}_c = \underline{U}_{CA}$.

Їх діючі значення дорівнюють лінійним напругам, тобто зросли у порівнянні із нормальним режимом у $\sqrt{3}$ разів. Відповідно зросли і фазні струми, але природньо, що кути фазних зсувів відносно напруги не змінилися. Струм в аварійній фазі знайдемо за першим законом Кірхгофа: $\underline{I}_a = -(\underline{I}_b + \underline{I}_c)$. З аналізу векторної діаграми легко довести, що він більший за струми I_b і I_c в $\sqrt{3}$ разів, тобто зріс у три рази порівняно із нормальним режимом.

6.2.7. Особливості роботи чотири провідної зірки

Завдяки нейтральному проводу ($\underline{Y}_N = \infty$) напруга зміщення нейтралі відсутня. Напруги на фазах споживачів незалежні одна від одної, утворюють симетричну систему і за умови відсутності опору проводів дорівнюють відповідним напругам на генераторі. Це відбувається за рахунок того, що струм нейтрального дроту $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ зрівнює потенціали нейтральних точок навантаження N' і генератора N . Обрив нейтрального проводу веде до "перекосу" фаз, тому в нього не вмикають запобіжників.

При симетричному навантаженні струм у нейтральному проводі відсутній, бо $\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$ (див. рис. 6.3). Тому необхідність в ньому відпадає.

Коротке замикання в колі із нейтральним проводом – це режим небезпечний для генератора, оскільки замикається на коротко фаза генератора і струм в ній обмежений тільки внутрішнім опором обмоток джерела та опором проводів.

6.2.8. Потужність трифазних кіл.

Комплексна повна потужність всього кола:

$$\underline{S} = P + jQ = \underline{S}_a + \underline{S}_b + \underline{S}_c = (P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c),$$

де: P_a, P_b, P_c, P - активні потужності окремих фаз і всього кола;

Q_a, Q_b, Q_c, Q - реактивні потужності окремих фаз і всього кола;

$\underline{S}_a, \underline{S}_b, \underline{S}_c, \underline{S}$ - комплексні повні потужності фаз і всього кола.

Модуль повної потужності трифазного кола $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Комплексна потужність окремої фази

$$S_{\phi} = P_{\phi} + jQ_{\phi}, P_{\phi} = U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi, Q_{\phi} = U_{\phi}I_{\phi}\sin\varphi.$$

Для симетричного навантаження потужність всієї схеми дорівнює потужності трьох фаз: $S=3\cdot S_{\phi}$. Її можна виразити через лінійні напругу і струм $S = \sqrt{3}\cdot U_{Л}I$.

6.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п. 6.2, конспектом лекцій.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, формулювання мети роботи, схема досліджуваного кола рис. 6.7, таблиця 6.1, таблиця 6.2.

6.4 Опис лабораторної установки

Для проведення лабораторної роботи на стенді є:

- джерело трифазної напруги і з нейтральною точкою (A, B, C, N);
- прилади змінного струму: $V1, A1, A3, A5, A6$;
- резистори змінного опору $R1$ та $R2$ ($S1.1\dots S1.4, S2.1\dots S2.4$);
- резистор постійного опору $R3$;
- конденсатор змінної ємності (тумблери $S3.1\dots S3.4$).

6.5 Робоче завдання

6.5.1. Скласти коло за схемою 6.7, вимкнути всі тумблери. З дозволу викладача увімкнути стенд і виміряти лінійні та фазні напруги на генераторі. Результати записати в табл. 6.1.

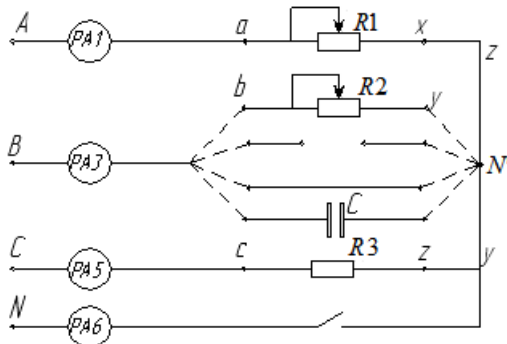


Рисунок 6.7 - Принципова схема трифазного кола споживачів, які з'єднані зіркою

Таблиця 6.1.– Дані дослідів

Напруги, виміряні на генераторі, B					
фазні			лінійні		
U_A	U_B	U_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}

6.5.2. Дослідити трифазне коло при з'єднанні споживачів зіркою в усіх режимах, вказаних в табл.6.2. Для кожного режиму (окрім короткого замикання!) дослідити два випадки: при наявності і при відсутності нейтрального проводу. Для здійснення переходу від чотирипровідного до трипровідного кола треба забирати із кола дріт, що з'єднує амперметр A_6 і нейтральну точку генератора N .

В усіх дослідях необхідно вимірювати фазні напруги і струми на споживачах, напругу зміщення нейтралі або струм нейтрального проводу. Результати записувати в табл.6.2.

Треба мати на увазі, що після з'єднання між собою точок «х», «у», «z» кожна з них є нейтральною точкою навантаження N' .

Увага! Всі перемикання проводів (окрім тих, що ведуть від вольтметра) треба здійснювати при вимкненому стенді.

6.5.3. Симетричний режим устанолюється тумблерами $S_{1.1}...S_{1.4}$, та $S_{2.1}...S_{2.4}$ так, щоб покази амперметрів A_1 , A_3 , A_5 були однакові. Положення цих тумблерів треба залишати незмінним до закінчення всіх дослідів.

6.5.4. Обрив фази "b" споживача здійснюється шляхом видалення проводу, що з'єднує точку "y" в нейтральну точку навантаження. Напругу U_b треба вимірювати між точкою "b" і нейтральною точкою, наприклад, "x" або "z",

6.5.5. Коротке замикання фази "b" споживача проводити тільки без нейтрального проводу, який треба видалити. Для створення режиму K_3 треба дріт, що веде від амперметра A_3 , підключити безпосередньо в точку "y" або "x", оминаючи резистор R_2 .

6.5.6. Для четвертого режиму роботи конденсатор в фазу "b" треба підключити замість резистора R_2 і встановити тумблерами $S_{3.1}...S_{3.4}$ деяке значення струму в амперметрі A_3 .

6.5.7. По закінченні всіх вимірювань стенд вимикнути.

Таблиця 6.2 – Дані досліду

Назва режиму роботи	Нейтральний дріт	Виміряно на споживачі							Обчислено			
		U_a	U_b	U_c	U_N	I_a	I_b	I_c	I_N	P	Q	S
		<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>Вт</i>	<i>Вар</i>	<i>ВА</i>
Симетричний споживач	так											
	ні											
Обрив фази "b"	так											
	ні											
К.З. фази "b"	ні											
Конденсатор в фазі "b"	так											
	ні											

6.6 Зміст звіту

6.6.1. Для всіх дослідів в масштабі побудувати векторні діаграми струмів та напруги. Струм нейтрального проводу I_N і напругу зміщення нейтралі U_N знайти графічно і порівняти результат із даними вимірювань. Для симетричного режиму побудувати одну діаграму. Діаграму для четвертого режиму будувати за допомогою циркуля.

6.6.2. Обчислити активну, реактивну і повну потужності трифазного кола. Результати занотувати в табл. 6.2.

6.6.3. З аналізу векторних діаграм зробити письмовий висновок про роль нейтрального проводу в роботі трифазного кола.

6.7 Контрольні запитання

- 6.7.1. Дайте визначення трифазного кола, трифазної е.р.с, фази.
- 6.7.2. Які переваги трифазних кіл перед однофазними?
- 6.7.3. Дайте визначення лінійним та фазним струмам і напругам.
- 6.7.4. Яке співвідношення між лінійними і фазними напругами?
- 6.7.5. Що ви знаєте про напругу зміщення нейтралі?
- 6.7.6. Яка роль нейтрального проводу?
- 6.7.7. Як обчислити потужність в трифазному колі?
- 6.7.8. Що таке перекіс фаз, як він виникає і як його уникнути?
- 6.7.9. Поясніть роботу трифазного кола при обриві та короткому замиканні однієї з фаз споживача.

7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ЗІ З'ЄДНАННЯМ СПОЖИВАЧІВ ТРИКУТНИКОМ

7.1 Мета роботи

Дослідити співвідношення між лінійними і фазними струмами і напругами у трифазному колі з симетричним і несиметричним навантаженням при його з'єднанні трикутником; придбати навички аналізу таких трифазних кіл за допомогою векторних діаграм.

7.2 Загальні теоретичні відомості

7.2.1. Основні визначення.

На рис 7.1. Зображене трифазне коло, в якому фази навантаження з'єднано трикутником.

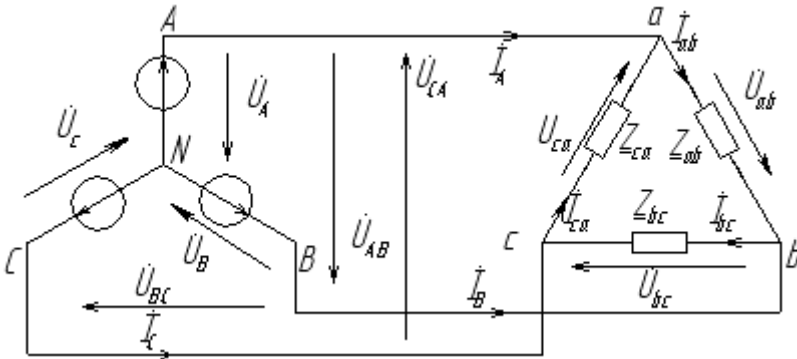


Рисунок 7.1- Заступна схема трифазного кола із сполученням фаз трикутником

На рис 7.1 прийняті такі позначення:

U_A, U_B, U_C – фазні напруги джерела;

U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – лінійні напруги джерела;

I_A, I_B, I_C – лінійні струми;

U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} – фазні напруги споживача;

I_{ab}, I_{bc}, I_{ca} – фазні струми споживача;

Z_{ab}, Z_{bc}, Z_{ca} – комплексні імпеданси фаз споживача.

В кожній фазі генератора діють е.р.с, що дорівнюють одна одній за модулем і частотою і зсунуті за фазою на кут 120° одна відносно одної. Лінійні напруги на генераторі теж зсунуті одна відносно одної на кут 120° .

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_A - U_B = U_\phi - U_\phi e^{-j120} = \sqrt{3}U_\phi e^{j30} = U_{\text{Лл}} e^{j30} ; \\ U_{BC} &= U_B - U_C = U_\phi e^{-j120} - U_\phi e^{j120} = U_{\text{Лл}} e^{-j90} ; \\ U_{CA} &= U_C - U_A = U_\phi e^{j120} - U_\phi = \sqrt{3}U_\phi e^{j150} = U_{\text{Лл}} e^{-j150} . \end{aligned} \quad (7.1)$$

7.2.2. Основні співвідношення.

При з'єднанні споживачів трикутником фазні напруги навантаження дорівнюють лінійним: $U_{\text{фн}} = U_{\text{лн}}$ і без урахування опору проводів дорівнюють відповідним лінійним напругам на генераторі:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB}; \quad \underline{U}_{bc} = U_{BC}; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_{CA} .$$

Фазні струми визначаються за законом Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} .$$

Лінійні струми можуть бути визначені за першим законом Кірхгофа для вузлів a, b, c на основі фазних:

$$\begin{aligned} I_A &= I_{ab} - I_{ca} \\ I_B &= I_{bc} - I_{ab} \\ I_C &= I_{ca} - I_{bc} \end{aligned} \quad (7.2)$$

При симетричному навантаженні ($\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$) сили фазних струмів однакові $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi$, а сила лінійних струмів більша за силу фазних у $\sqrt{3}$ разів: $I_{\text{Лл}} = \sqrt{3}I_\phi$. Це можна довести із векторної діаграми рис.7.2.а. На ній лінійні струми зображені як вектори, що з'єднують кінці векторів фазних струмів (бо дорівнюють їх різниці) і утворюють рівнобічний трикутник.

При несиметричному навантаженні ($\underline{Z}_{ab} \neq \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$) сили фазних струмів нерівні і лінійні струми знаходять за формулами (7.2).

Векторна діаграма рис.7.2.б побудована для випадку, коли в фазу «са» увімкнено конденсатор, а в дві інші неоднакові резистори. Струм I_{ca} випереджає фазу напругу U_{ca} на 90° , а струми I_{ab} та I_{bc} співпадають із відповідними фазними напругами. Трикутник, що утворений лінійними струмами, нерівнобічний.

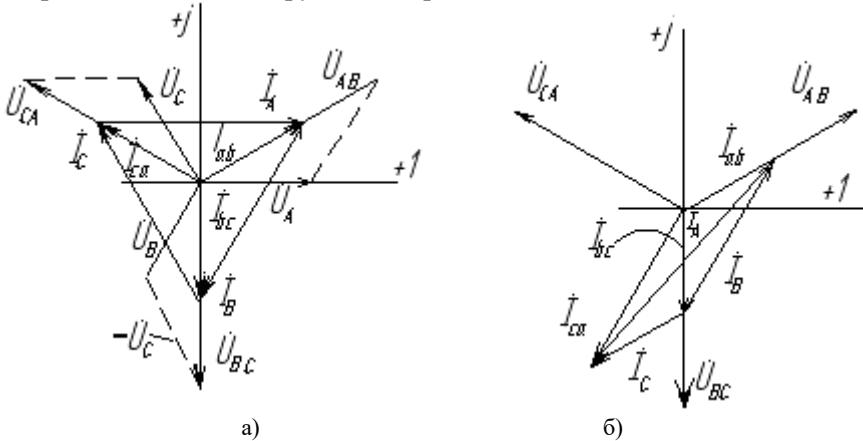


Рисунок - 7.2. Векторні діаграми напруги і струмів в робочому режимі:
а – для симетричного навантаження; б – для несиметричного

7.2.3. Аварійні режими роботи.

Як аварійні режими трифазного кола розглядаємо обрив лінійного і фазного проводів.

При обриві лінійного проводу, наприклад $C-c$, система с трифазної перетворюється на однофазну (рис.7.3) зі змішаним сполученням споживачів. Z_{bc} і Z_{ca} поєднані послідовно між собою і паралельно до Z_{ab} і знаходяться під напругою U_{ab} . Якщо залишити, ті ж самі умовні позитивні напрямки струмів, що прийняті в трифазних колах, то можна записати:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}};$$

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_B = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{bc} = \underline{U}_{AB} \frac{(\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}) \cdot \underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca} + \underline{Z}_{ab}}.$$

У відповідності з цим побудована векторна діаграма рис.7.3,б для випадку, коли $Z_{bc} = Z_{ca} = Z_{ab} = R$. Очевидно, що $I_{ab} = U_{\text{л}} / R$; $I_{bc} = I_{ca} = U_{\text{л}} / 2R$, тобто струм I_{ab} не змінився у порівнянні із робочим режимом, а струми I_{bc} та I_{ca} зменшилися удвічі. Лінійний струм $I_A = -I_B = I_{ab} - I_{bc}$; $I_A = I_{ab} + I_{bc} = \frac{3}{2} I_{ab}$. Природно, що обчислення без комплексних чисел та векторів можливо тільки тому, що у резистивнім споживачі струм співпадає із напругою за фазою.

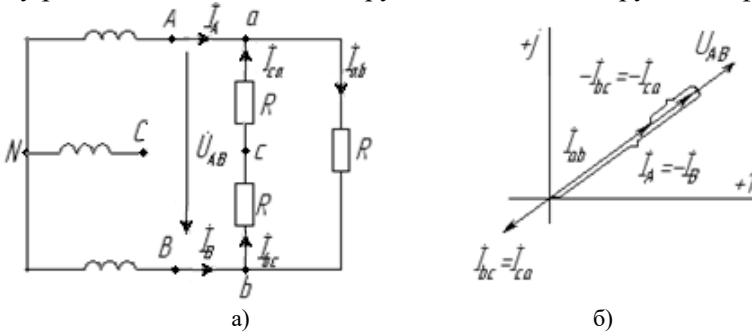


Рисунок 7.3 – Схема (а) та векторна діаграма (б) при обриві лінійного проводу в трифазному колі зі симетричним навантаженням

При обриві фазного проводу, наприклад "ca", сила струму в цій фазі $I_{ca} = 0$. В інших фазах струми не змінилися, бо напруга на фазах залишилась така ж сама, як і в робочому режимі тому, що лінійні проводи не обірвані. Лінійні струми:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -\underline{I}_{bc};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} \quad (\text{не змінився}).$$

7.3 Порядок проведення підготовчої роботи

Вивчити теоретичний матеріал за п. 7.2, конспектом лекцій.

Усно відповісти на контрольні запитання.

Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити: Тема роботи, мета роботи, схема досліджуваного кола рис. 7.4, таблиця 7.1.

7.4 Опис лабораторної установки

Для проведення лабораторної роботи на стенді є:

- джерело трифазної напруги і з нейтральною точкою (A, B, C);
- прилади змінного струму: $V1, A1, A2, A3, A4, A5, A6$;
- резистори змінного опору $R1$ та $R2$ (тумблери $S1.1...S1.4, S2.1...S2.4$);
- резистор постійного опору $R3$;
- конденсатор змінної ємності (тумблери $S3.1...S3.4$).

7.5 Робоче завдання

7.5.1. Скласти коло за схемою рис. 7.4, вимкнути всі тумблери. З дозволу викладача увімкнути стенд.

7.5.2. Дослідити коло у всіх режимах, що вказані в табл.7.1. Для кожного режиму вимірювати фазні напруги на споживачах, фазні і лінійні струми. Результати записувати в табл.7.1.

Увага! Всі перемикання проводів, крім тих, що ведуть від вольтметра, треба здійснювати при вимкнутах стенді.

7.5.3. Симетричний режим встановити тумблерами $S1.1...S1.4$ та $S2.1...S2.4$ так, щоб покази лінійних амперметрів $A1, A3, A5$; були однакові.

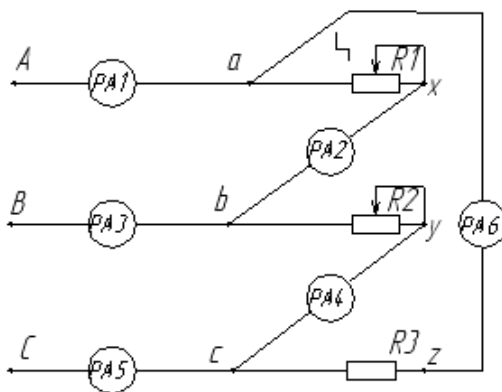


Рисунок 7.4 – Принципова схема трифазного кола зі з'єднанням споживачів трикутником

7.5.4. Обрив лінії A здійснити відключенням дроту, що з'єднує гнізда A генератора і амперметр $A1$, Після вимірювань коло відновити.

7.5.5. Обрив фази " ab " здійснити відключенням дроту, що з'єднує точку " x " із амперметром $A2$. Після вимірювань коло відновити.

7.5.6. Несиметричне резистивне навантаження встановити тумблерами $S1$ і $S2$ так, щоб фазні струми були нерівними.

7.5.7. Конденсатор в фазу " bc " підключити замість резистора $R2$. Тумблерами $S1$ встановити деяке значення струму в амперметрі $A4$. Напругу U_{bc} треба вимірювати на затискачах конденсатора.

7.5.8. По закінченні всіх вимірювань стенд вимикнути.

Таблиця 7.1 – Дані досліду

Назва режиму роботи	Виміряно									Обчислено	
	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	P	S
	A	A	A	A	A	A	B	B	B	$Вт$	$ВА$
Симетричний											
Обрив лінії « A - a »											
Обрив фази " ab "											
$R1 \neq R2 \neq R3$											
Конденсатор в фазі											

7.6 Зміст звіту

7.6.1. Обчислити активну P та повну S потужність трифазного кола для всіх режимів роботи. Результати записати в табл.7.1.

7.6.2. Побудувати в масштабі векторні діаграми струмів і напруги для всіх режимів. Лінійні струми знайти графічно по фазних струмах і порівняти із результатами вимірювань.

7.6.3. Записати в комплексній формі діючі значення всіх струмів і напруг для одного з режимів по вказівці викладача.

7.6.4. Зробити письмовий висновок про те, в яких випадках споживач у трифазному колі з'єднують трикутником і які переваги такого сполучення.

7.7 Контрольні запитання

7.7.1. Як з'єднати фази споживача трикутником? В яких випадках живають таке сполучення? Які в нього переваги?

7.7.2. Наведіть співвідношення між фазними і лінійними величинами симетричного і несиметричного навантаження при такому з'єднанні.

7.7.3. Охарактеризуйте усі режими, що вказані в табл.7.1.

7.7.4. Як обчислити потужність трифазного споживача?

7.7.5. Який вигляд має векторна діаграма трифазного електричного кола в тому випадку, якщо навантаження фазне буде різним за характером ($Z_{ab} = 10, Ом$; $Z_{bc} = -j10, Ом$; $Z_{ca} = j10, Ом$) і з'єднане в трикутник, а лінійна напруга $U_L = 380 В$?

8. РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

8.1. Паначевський Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Теорія і практикум. – К.: Каравела, 2003. – 440 с.

8.2. Малинівський С.М. Загальна електротехніка: Підручник. – Львів: Видавництво “Бескид Біт”, 2003. – 640 с.

8.3. Пантюшин В.С. Электротехника.- М.: Высш. Шк., 1976. – 560 с.

8.4. Электротехника под ред. В.Г. Герасимова, - 3-е изд., - М.: Высш. шк., 1985. – 480 с.

8.5. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 1984.- 375 с.

8.6. Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника. – М.: Высш.шк., 1984. – 377 с.

8.7. Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высш. шк., 1979. – 2533 с.

8.8. Липатов Д.Н. Вопросы и задачи по электротехнике для программированного обучения. М.: Энергия, 1977. – 304 с.

8.9. Борисов Ю.М. и др. Электротехника. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 552с.

ДОДАТОК А
Зразок оформлення титульного аркуша звіту про
лабораторну роботу

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

Кафедра ТЗЕ

Лабораторна робота № 1

Вимірювання струму, напруги, потужності в електричних колах

Допустив доц. кафедри ТЗЕ

О.Г. Волкова

Виконав ст. гр. М-114

М.К. Ткаченко

Прийняв доц. кафедри ТЗЕ

О.Г. Волкова

2022