



НМЦ
навчально-методичний
центр сільськогосподарських
вузів України

**МІНІСТЕРСТВО
АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ**

**Департамент кадрової політики,
аграрної освіти і науки**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

*до лабораторних робіт по курсу
“Теоретичні основи електротехніки”*

*для студентів факультету енергетики
та комп’ютерних технологій*

Харків 2008 р.

**ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА
ІМ. П. ВАСИЛЕНКО**

**Кафедра “Загальна електротехніка”
Лабораторія ТОЕ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

*до лабораторних робіт по курсу
“Теоретичні основи електротехніки”*

*для студентів факультету енергетики
та комп’ютерних технологій*

Виконали: доц. Свергун Ю.Ф.
доц.. Балан Г.П.
проф. Черенков О.Д.
доц. Кравченко П.О.
ст. викладач Щербаков О.Є.
асис. Котенко М.В.

Відповідальний за випуск:
Васильєв С.І.

Харків 2008 р.

Автори-укладачі: Свергун Ю.Ф., Балан Г.П., Черенков О.Д., Кравченко П.О.
Щербаков О.Є. Котенко М.В.

Рецензенти: Ільченко Б.М., доцент, к.т.н (Харківський державний технічний
університет сільського господарства)
Савченко П.І., професор д.т.н (Харківський державний технічний
університет сільського господарства).

Схвалено і рекомендовано до видання Радою Навчально-методичного
центру по заочній формі навчання у закладах освіти 3-4 рівнів акредитації
аграрного профілю (план видання навчально-методичної літератури на 2007-
2008 н.р., № від).

З М І С Т

1. Основні правила техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт	6
2. Організація проведення лабораторних робіт по ТОЕ	6
3. Правила виконання лабораторних робіт.....	7
4. Оформлення звітів по лабораторним роботам	8
5. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	10
6. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	18
7. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	28
8. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4	33
9. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	40
10. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	46
11. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7	51
12. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8	56
13. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9	61
14. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10	69
15. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11	75
16. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12	80
17. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13	85
18. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14	90
19. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15	96

1. ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Перед початком лабораторних занять студенти повинні ознайомитися з правилами техніки безпеки і суворо дотримуватися їх при виконанні лабораторних завдань. Слід пам'ятати, що напруга 220 В, яка застосовується в лабораторії, небезпечна для життя людини. Тому, щоб запобігти нещасним випадкам, необхідно дотримуватись наступних правил безпеки:

Перед початком роботи слід перевірити, в якому положенні знаходиться вимикач на робочому місці. Вимкнутим є нижнє положення ручки вимикача. Переконавшись у відсутності напруги на елементах схеми.

Ввімкнути схему під напругу, тільки переконавшись, що ніхто не доторкується до струмоведучих частин схеми.

Перед ввімкненням вимикача попередити товаришів по роботі.

Вмикати схему в мережу без попередньої перевірки її викладачем або лаборантом категорично забороняється.

Після ввімкнення схеми забороняється торкатися руками проводів і частин приладів, що знаходяться під напругою.

Будь-які зміни в схемі виконувати тільки після вимкнення її з мережі. Ввімкнення в мережу після внесених змінень проводити з дозволу викладача.

При виявленні ненормальностей в роботі схеми негайно відключити її від мережі і повідомити про це викладача або лаборанта.

Категорично забороняється залишати без нагляду електроустановку, що знаходиться під напругою.

Розбирати схему тільки після від'єднання її від джерел напруги на робочому місці.

Головні вимикачі на розподільному щиті вмикаються і вимикаються тільки викладачем або лаборантом.

При нещасному випадку негайно вимкнути напругу і надати першу допомогу тому, хто постраждав від електричного струму. У всіх випадках поразки струмом виклик лікаря є обов'язковим, незалежно від стану того, хто постраждав.

2. ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ПО ТОЕ

Лабораторні роботи по ТОЕ виконують студенти 2 і 3 курсів факультету енергетики та комп'ютерних технологій.

Основною метою лабораторних робіт є поглиблення та закріплення здобутих теоретичних знань по окремим розділам курсу ТОЕ і здобуття навиків експериментальних досліджень.

У зв'язку з цим методичні вказівки, окрім опису лабораторних робіт, мають короткий опис вимірювальних приладів, що використовуються при виконанні лабораторних робіт, а також вказівки про порядок складання схеми, виконання робіт та оформлення звітів.

Основні завдання, що стоять перед студентом:

Зв'язати теорію з практикою - підтвердити вивчені положення теорії.

Вивчити роботу електричних кіл як постійного, так і змінного струму, ознайомитися з процесами, що в них відбуваються.

Навчитися узагальнювати та оформлювати результати досліджень.

Перед виконанням роботи студент повинен знати теорію досліджуваного питання, також чітко уявляти собі порядок виконання досліджень: ознайомитися з приладами і обладнанням, що будуть застосовуватися в даній електричній схемі.

Для занять в лабораторії група розбивається на бригади. Кожна бригада за 4 години виконує одну лабораторну роботу, оформляє звіт і здає його для перевірки викладачеві.

3. ПРАВИЛА ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Кожна лабораторна робота виконується на окремому робочому місці. Виконання роботи містить в собі: складання схем, виміри, обробку одержаного із досліду матеріалу та складання звіту спостережень.

До виконання лабораторних робіт допускаються тільки попередньо підготовлені студенти.

Перед складанням схеми необхідно ознайомитися з приладами, автотрансформаторами, джерелами живлення, осцилографами та ін., записати їх паспортні дані.

Дуже важливо з'ясувати, які затискачі приладів відповідають тим чи іншим джерелам схеми. На першому занятті студенти ознайомлюються з основними правилами техніки безпеки. Про знання цих правил та про відповідальність за їх виконанням кожен студент розписується в журналі реєстрації інструктажу з техніки безпеки.

Перед початком складання схеми необхідно переконатися в тому, що головний вимикач кола вимкнений.

При складанні схеми завжди слід збирати спочатку послідовне коло з амперметром і котушкою струму ватметра, потім допоміжні та паралельні кола, підключаючи вольтметр та котушку напруги ватметра.

При такій послідовності складання схеми зменшується можливість неправильних з'єднань.

Перед вмиканням електричного кола всі прилади, що регулюють струм і напругу (реостати, автотрансформатори) повинні бути встановлені в положення, що відповідає мінімуму величини, що регулюється. Всі багатограничні прилади повинні бути ввімкнені на максимальні границі вимірів. Перехід на менший діапазон вимірів допускається тільки після дослідної перевірки роботи кола.

Зібрана схема обов'язково перевіряється членами бригади, які виконують дану роботу, а потім вже викладачем або лаборантом.

Без дозволу викладача під'єднувати коло мережі

ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ

На ввімкненій під напругу схемі слід зробити всі регулювання та перевірити почергово всі потрібні режими роботи. Постійно необхідно стежити за показами вимірювальних приладів. Якщо стрілки приладів виходять за границі шкали, необхідно негайно вимкнути вимикач.

Під час роботи забороняється відходити від обладнання, що знаходиться під напругою.

Забороняється використовувати прилади, обладнання та провідники з інших робочих місць.

При проведенні досліду покази приладів записують у заздалегідь складені таблиці з вказівкою постійної ціни поділки шкали приладу.

Після закінчення всіх спостережень і вимірювань схема вимикається з мережі, але не розбирається до утвердження викладачем результатів роботи. Експеримент з помилковими даними слід повторити.

По виконаній лабораторній роботі складається звіт. Бригада, яка не подала звіт про попередню роботу, до наступних лабораторних робіт не допускається.

Під час роботи в лабораторії студенти повинні додержуватися правил техніки безпеки і правил внутрішнього розпорядку вищого навчального закладу.

Студенти, які порушують ці правила, від роботи в лабораторії відсторонюються.

У випадках, коли порушення правил тягне за собою пошкодження обладнання, ремонт та відновлення останнього проводиться за рахунок порушника.

4. ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ ПО ЛАБОРАТОРНИМ РОБОТАМ

По кожній виконаній роботі студенти складають звіт. Титульний лист звіту повинен бути виконаний за встановленою формою.

У звіті приводяться наступні відомості:

- Назва лабораторної роботи;
- Мета роботи;
- Необхідне обладнання;
- Перелік апаратури та приладів, що використовуються в роботі, з їх технічними характеристиками (найменування, тип, система, номінальне значення напруги і струму, клас точності та ін.).
- Принципова електрична схема кола, що досліджується. Схеми викреслюються за допомогою інженерної лінійки з додержанням умовних графічних позначень, встановлених стандартами.
- Порядок виконання роботи з таблицями результатів вимірювань та обчислень.
- Графічні побудови. Графіки та векторні діаграми будуються за даними вимірювань і обчислень у масштабі в прямокутній системі координат.

На вісях координат повинні бути вказані позначки, розмірність та числові значення величини.

Якщо декілька змінних є функцією будь-якої одної змінної і ці змінні необхідно відобразити графічно, то усі криві слід креслити на одній діаграмі.

При побудові кривої за дослідними даними попередньо наносять точки, а потім проводять пряму або плавну криву, яка характеризує загальну закономірність зміни величини, що досліджується.

У звіті необхідно привести основні розрахункові формули, підставити в них експериментальні дані і дати кінцевий результат розрахунків.

У кінці звіту необхідно навести основні висновки, що впливають з виконаної роботи, які повинні представляти собою самостійний аналіз проведеного експерименту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ, ПАРАЛЕЛЬНОМУ І ЗМІШАНОМУ З'ЄДНАННІ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1. Мета роботи.

Експериментально перевірити закони Ома та Кірхгофа для кіл постійного струму при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні опорів.

1.2. Основні теоретичні положення.

Сукупність з'єднаних один з одним елементів, по яким може текти електричний струм, називають *електричним колом*.


Електричні кола, у яких одержання електричної енергії, передача і її перетворення відбувається при незмінних у часі струмах і напругах, називають *колами постійного струму*.

У теорії електричних кіл розрізняють активні і пасивні елементи.

Кола, що містять джерела енергії, називаються активними, кола, що не містять джерел енергії і в яких електрична енергія перетворюється в тепло, називаються пасивними.

Зображення електричного кола за допомогою умовних позначок називають *електричною схемою*.

Характеристикою резистора є опір “**R**” і відповідне йому позначення, що використовується для елемента, в якому електрична енергія перетворюється в

інші види енергії (теплову і т. ін.),  а також для кількісної оцінки величини, яка дорівнює відношенню напруги на даному елементі кола до струму, що тече через нього:

$$R = \frac{U}{I}, \text{ Ом} \quad (1.2.1)$$

Величина, зворотна до опору, називається *провідністю*:

$$G = \frac{1}{R}, \text{ См} \quad (1.2.2)$$

У системі СІ опір **R** вимірюється у Омах (Ом), а провідність **G** - у Сіменсах (См).

Залежність струму, що тече через опір, від напруги на тому ж опорі прийнято називати вольт-амперною характеристикою:

$$I = f(U) \quad (1.2.3)$$

Розглянемо коло, яке складено з *n* послідовно з'єднаних опорів (рис. 1.2.1).

Послідовним з'єднанням опорів називають таке з'єднання, при якому через всі опори тече один і той же струм.

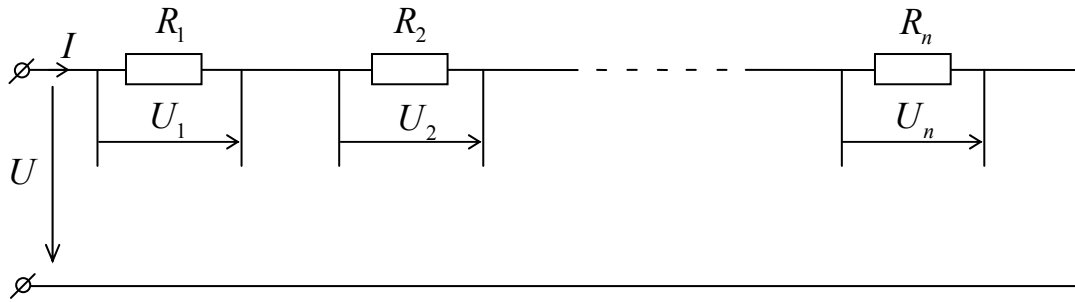


Рис. 1.2.1

Нехай до затискачів кола прикладена напруга U . Опори елементів мають позначення: R_1, R_2, \dots, R_n . Напруга U дорівнює сумі падінь напруг на окремих опорах:

$$U = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n \quad (1.2.4)$$

Якщо винести значення струму I за дужки, отримаємо:

$$U = I(R_1 + R_2 + \dots + R_n) \quad (1.2.5)$$

Введемо позначення: $R_1 + R_2 + \dots + R_n = R$, отримаємо:

$$U = IR. \quad (1.2.6)$$

Таким чином, еквівалентний опір R_e кола, що складається з послідовно з'єднаних елементів, дорівнює арифметичній сумі опорів:

$$R = \sum_{k=1}^n R_k. \quad (1.2.7)$$

Паралельним з'єднанням опорів електричного кола називається таке з'єднання, при якому всі опори знаходяться під однією напругою.

Розглянемо коло, що складається з " n " числа паралельно з'єднаних опорів провідності яких відповідно G_1, G_2, \dots, G_n (рис. 1.2.2). До затискачів прикладена напруга U .

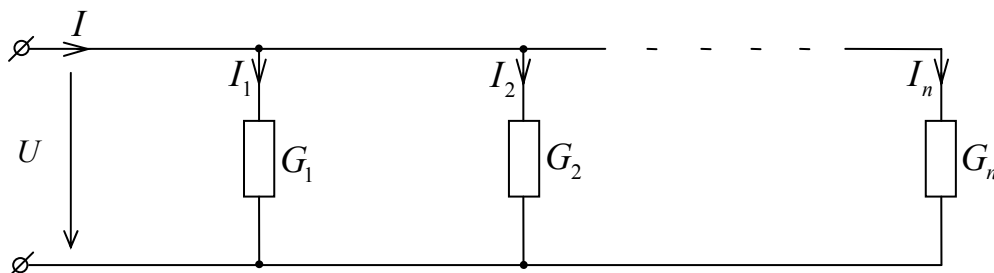


Рис. 1.2.2

З наведеного визначення паралельного з'єднання виходить, що напруга на всіх опорах однакова:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U. \quad (1.2.8)$$

Визначимо провідності через опори:

$$G_1 = \frac{1}{R_1}; \quad G_2 = \frac{1}{R_2}; \quad G_n = \frac{1}{R_n}. \quad (1.2.9)$$

За першим законом Кірхгофа струм в нерозгалуженій частині кола дорівнює сумі струмів окремих опорів:

$$I = I_1 + I_2 + I_n = UG_1 + UG_2 + UG_n = U(G_1 + G_2 + G_n), \quad (1.2.10)$$

або $I = UG$, де $G = G_1 + G_2 + G_n$.

Еквівалентна провідність кола дорівнює сумі провідностей опорів. Еквівалентний опір з трьох паралельних віток визначається за такими формулами:

$$G = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3}{R_1R_2R_3}, \quad (1.2.11)$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{R_1R_2R_3}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3}. \quad (1.2.12)$$

Методи, наведені раніше, використовують також при розрахунку кіл зі змішаним з'єднанням опорів, яке являє собою комбінацію послідовного та паралельного з'єднання (рис. 1.2.3).

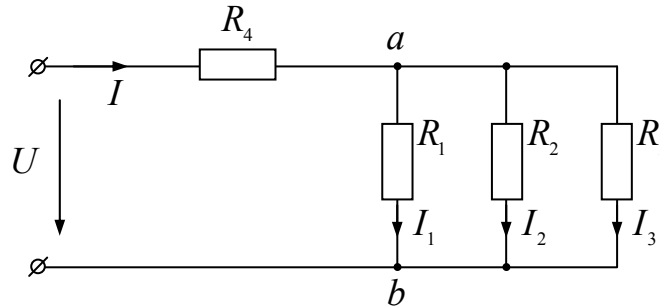


Рис. 1.2.3

Еквівалентний опір розгалуженої частини кола, що складається з трьох паралельно з'єднаних елементів, буде:

$$R_{ab} = \frac{R_1R_2R_3}{R_1R_2 + R_2R_3 + R_1R_3} \quad (1.2.13)$$

Еквівалентний опір всього кола:

$$R_{екв} = R_4 + R_{ab}. \quad (1.2.14)$$

Струм у нерозгалуженій частині кола визначається за законами Ома для замкненого кола:

$$I = \frac{U}{R_{екв}}. \quad (1.2.15)$$

Падіння напруги на опорі R_4 визначається добутком IR_4 :

$$U_4 = IR_4. \quad (1.2.16)$$

Падіння напруги на розгалуженій частині кола, тобто точках “ a ” і “ b ” дорівнює:

$$U_{ab} = IR_{ab}. \quad (1.2.17)$$

Тоді струми у вітках розгалуженої частини дорівнюють:

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1}; I_2 = \frac{U_{ab}}{R_2}; I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}. \quad (1.2.18)$$

Загальна потужність всього кола дорівнює сумі потужностей окремих елементів:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4. \quad (1.2.19)$$

1.3. Програма роботи.

- 1.3.1. Визначити параметри і побудувати вольт-амперні характеристики кожного опору, що використовується в роботі.
- 1.3.2. Виконати дослідження послідовного з'єднання опорів та перевірити виконання 2-го закону Кірхгофа.
- 1.3.3. Виконати дослідження паралельного з'єднання опорів та перевірити виконання 1-го закону Кірхгофа.
- 1.3.4. Розрахувати струми при змішаному з'єднанні опорів у колі.

1.4. Необхідне обладнання.

- | | |
|--|---------|
| 1.4.1. Лабораторний стенд | – 1 шт. |
| 1.4.2. Вольтметр магнітоелектричної системи | – 2 шт. |
| 1.4.3. Амперметр магнітоелектричної системи 1- 2 А | – 2 шт. |
| 1.4.4. Ватметр | – 1 шт; |
| 1.4.5. Комплект з'єднувальних проводів. | |

1.5. Порядок виконання роботи

- 1.5.1. Зібрати схему послідовного з'єднання опорів R_1, R_2, R_3 (рис. 1.5.1).

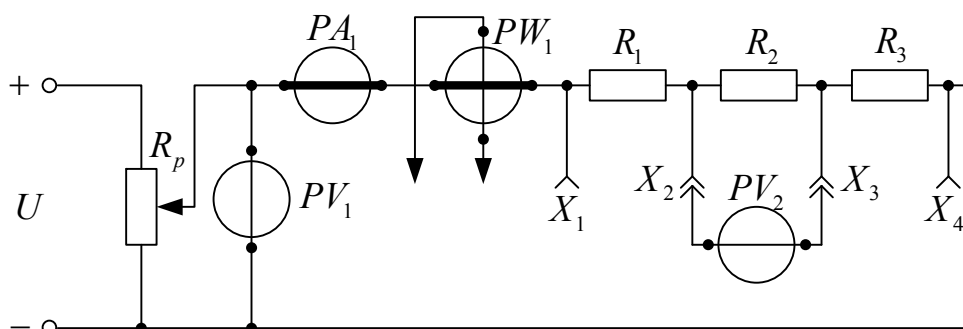


Рис. 1.5.1

- 1.5.2. Після перевірки схеми ввімкнути живлення і реостатом R_p встановити напругу, вказану викладачем.
- 1.5.3. Виміряти струми, напруги та потужності на кожному опорі кола та на всьому колі, змінюючи напругу реостатом через кожні 10 В від 40 В до 80 В. Результати занести в таблицю 1.5.1.

Таблиця 1.5.1

Опори	Виміри														
	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт	U, В	I, А	P, Вт
R ₁															
R ₂															
R ₃															
Все коло	40			50			60			70			80		

1.5.4. Визначити опори та потужність окремих елементів і всього кола, порівняти їх з дослідними даними. Результати розрахунків занести у таблицю 1.5.2.

Таблиця 1.5.2

Опори	Розрахунки									
	R	P	R	P	R	P	R	P	R	P
	Ом	Вт	Ом	Вт	Ом	Вт	Ом	Вт	Ом	Вт
R ₁										
R ₂										
R ₃										
Все коло										

1.5.5. Користуючись даними таблиць 1.5.1 та 1.5.2, побудували вольт-амперні характеристики кожного з опорів, а також графік залежності $I = f(U)$.

1.5.6. Скласти схему паралельного з'єднання приймачів R_1, R_2, R_3 за схемою, наведеною на рис. 1.5.2.

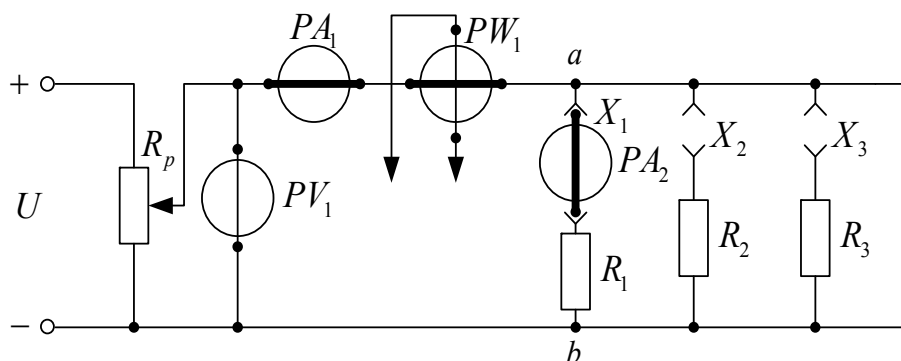


Рис. 1.5.2

1.5.7. Після перевірки схеми ввімкнути джерело живлення і реостатом встановити початкову напругу, вказану викладачем.

1.5.8. Змінюючи напругу, як це робилося у попередньому досліді, за допомогою переносного амперметра по черзі виміряти струм у опорах R_1, R_2, R_3 . Результати вимірювань занести у таблицю 1.5.3.

Таблиця 1.5.3

№ пп	Виміри						Розрахунки									
	U	I	P	I ₁	I ₂	I ₃	R ₁	R ₂	R ₃	G ₁	G ₂	G ₃	P ₁	P ₂	P ₃	
	В	А	Вт	А	А	А	Ом	Ом	Ом	См	См	См	Вт	Вт	Вт	
1.	10															
2.	20															
3.	30															
4.	40															
5.	50															

1.5.9. Виконати розрахунки і перевірити формули паралельного з'єднання:

$$I = I_1 + I_2 + I_3, G_{ab} = G_1 + G_2 + G_3, P_{ab} = P_1 + P_2 + P_3.$$

1.5.10. Послідовно до схеми паралельного з'єднання приєднати опір R_4 , перетворивши дану схему у схему змішаного з'єднання елементів (рис. 1.5.3).

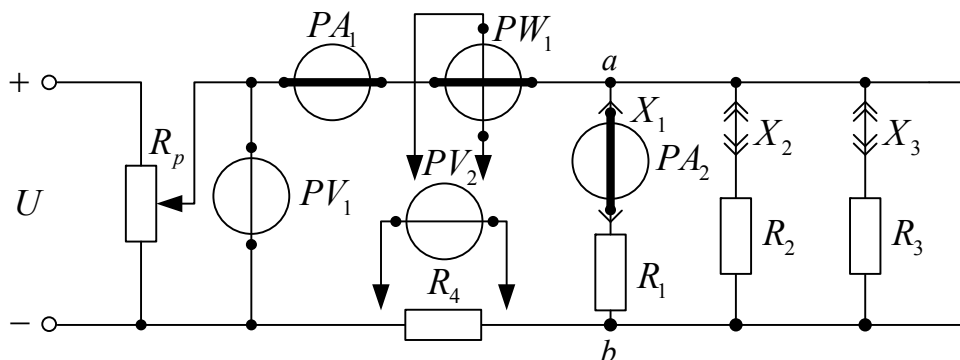


Рис. 1.5.3

1.5.11. Після перевірки схеми реостатом R_p встановити початкову напругу, вказану викладачем.

1.5.12. Переносним вольтметром PV_2 виміряти напругу на опорі R_4 , та між вузлами "а"- "б", а потім переносним амперметром PA_2 виміряти струми у вітках. Ватметром PW_1 виміряти потужність. Результати вимірів занести у таблицю 1.5.4.

№№ пп	Виміри							Розрахунки										
	U	U _B	U	I	I ₁	I ₂	I ₃	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	P _{ab}	P	
	В	В	В	А	А	А	А	Ом	Ом	Ом	Ом	См	См	См	См	Вт	Вт	
1.																		
2.																		
3.																		
4.																		
5.																		

1.6. Задачі

1.6.1. Визначити еквівалентний опір між точками “а” та “b” при розімкненому і замкненому контакті Q для схеми, наведеної на рис. 1.6.1.

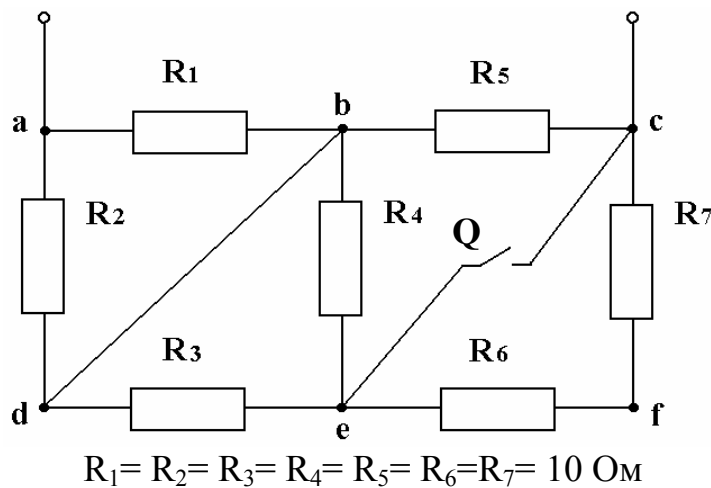


Рис. 1.6.1

1.6.2. Визначити опори кола при холостому ході та короткому замиканні для наведених схем рис.1.6.2. Режим холостого ходу - коли затискачі 2-2' розімкнені, короткого замикання - коли затискачі 2-2' замкнуті.

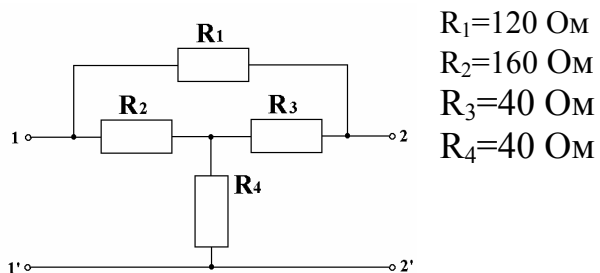


Рис. 1.6.2 (а)

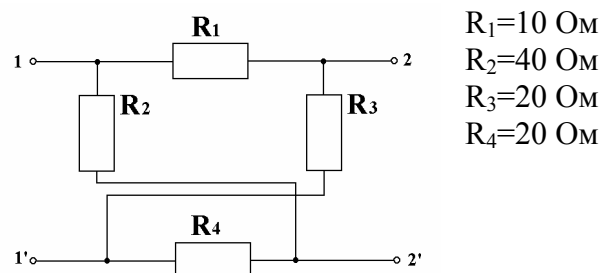
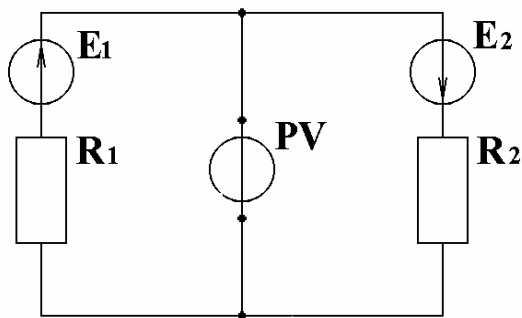


Рис. 1.6.2 (б)

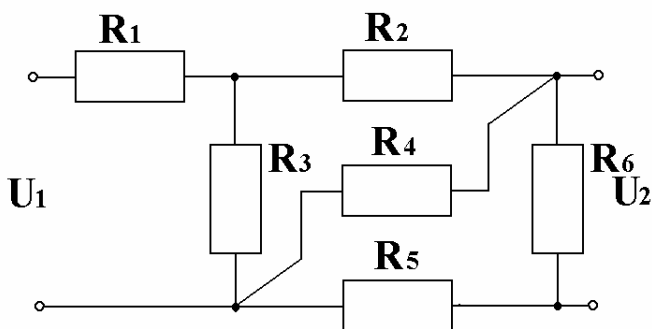
1.6.3. Визначити покази вольтметра для схеми рис.1.6.3, опір якого значно більший ніж опори R_1 , R_2 .



$$\begin{aligned} E_1 &= 40 \text{ В} \\ E_2 &= 20 \text{ В} \\ R_1 &= 10 \text{ Ом} \\ R_2 &= 5 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Рис. 1.6.3

1.6.4. Для кола, схема якого наведена на рис.1.6.4, визначити відношення напруги на виході кола U_2 до напруги на вході U_1 .



$$\begin{aligned} R_1 &= 24 \text{ Ом} \\ R_2 &= 10 \text{ Ом} \\ R_3 &= 40 \text{ Ом} \\ R_4 &= 25 \text{ Ом} \\ R_5 &= 20 \text{ Ом} \\ R_6 &= 30 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Рис.1.6.4

1.7. Контрольні запитання.

- 1.7.1. Дати визначення послідовного, паралельного та змішаного з'єднання елементів.
- 1.7.2. Чому дорівнюють еквівалентні опори послідовного і паралельного з'єднання елементів.
- 1.7.3. Навести закон Ома для ділянки кола без ЕРС та закон Ома для кола, що містить ЕРС. Узагальнений закон Ома.
- 1.7.4. Сформулювати перший та другий закони Кірхгофа та їх використання для розрахунку кіл.
- 1.7.5. Що розуміють під складними електричними колами?
- 1.7.6. Яке джерело називається джерелом ЕРС, а яке - джерелом струму?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1. Мета роботи

Дослідна перевірка основних методів розрахунку розгалуженого електричного кола з декількома джерелами і приймачами електричної енергії та встановлення основних закономірностей розподілу струмів і напруг у цьому колі.

2.2. Основні теоретичні положення

Основою для розрахунків складного розгалуженого кола є закон Ома та два закони Кірхгофа.

Відповідно до закону Ома, електричний струм на заданій нерозгалуженій ділянці кола дорівнює алгебраїчній сумі напруги, прикладеної до цієї ділянки, і діючих ЕРС на цій ділянці, яка поділена на суму опорів ділянки:

$$I = \frac{U_{ac} + \sum_{k=1}^n E_k}{\sum_{k=1}^n R_k}, \quad (2.2.1)$$

де під знаком суми зі знаком «+» записують ЕРС, що збігаються за напрямком зі струмом і навпаки.

За **першим законом Кірхгофа** для будь-якого вузла розгалуженого кола алгебраїчна сума струмів, що сходяться у цьому вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (2.2.2)$$

Другий закон Кірхгофа визначає зв'язок між ЕРС і напругами контурів розгалуженого кола. Згідно цього закону алгебраїчна сума падінь напруг у будь-якому замкнутому контурі електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС вздовж цього контуру:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n E_k. \quad (2.2.3)$$

Користуючись цими законами, можна провести розрахунок будь-якого лінійного розгалуженого кола постійного струму.

Найбільш розповсюдженими методами розрахунку розгалужених кіл є:

- метод рівнянь Кірхгофа;
- метод контурних струмів;
- метод накладання (суперпозиції);
- метод вузлових потенціалів;
- метод еквівалентного генератора (активного двополюсника).

2.2.1. Метод рівнянь Кірхгофа

Перед складанням рівнянь необхідно:

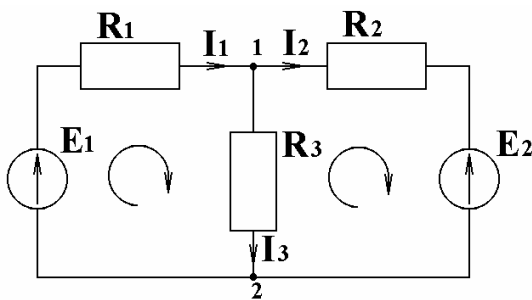
- довільно вибрати позитивний напрям струмів у вітках і позначити їх на схемі;
- довільно вибрати позитивний напрям обходу незалежних контурів для складання рівнянь за другим законом Кірхгофа.

Рекомендується позитивні напрями обходу незалежних контурів вибирати однаковими для всіх контурів.

При розрахунках складають “b” рівнянь, де “b” – кількість віток розгалуженого кола. З них число рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа, дорівнює (y-1), де y- кількість вузлів. Кількість рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа, дорівнює (b-(y-1)). Вирішуючи систему рівнянь при заданих ЕРС і опорах, знаходять невідомі струми.

Приклад.

Розглянемо електричне коло, яке має три вітки і два вузла (рис. 2.2.1). Треба визначити струм у вітках кола.



$$\begin{aligned} E_1 &= 10 \text{ В} \\ E_2 &= 7 \text{ В} \\ R_1 &= 50 \text{ Ом} \\ R_2 &= 100 \text{ Ом} \\ R_3 &= 100 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Рис. 2.2.1

Розв'язання.

Довільно вибираємо позитивний напрям струмів у вітках схеми і позитивні напрями обходу незалежних контурів (їх кількість дорівнює двом). У схемі два вузла, тому за першим законом Кірхгофа складаємо одне рівняння (для вузла “1”).

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.2.4)$$

За другим законом Кірхгофа складаємо два рівняння, враховуючи, напрям струмів у вітках схеми і напрями дії ЕРС з напрями обходу контурів.

Тоді, коли напрями струмів у вітках співпадають з позитивним напрямом обходу контура складова падіння напруги на опорі IR входить у рівняння зі знаком плюс, у протилежному випадку - зі знаком мінус.

Аналогічно враховуються напрями джерел ЕРС.

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1, \quad (2.2.5)$$

$$I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2. \quad (2.2.6)$$

Вирішуючи спільно одержані рівняння (2.2.4), (2.2.5), (2.2.6), визначаємо струми у вітках електричного кола.

2.2.2. Метод контурних струмів

У цьому методі виходять з умови, що у кожному контурі тече незалежний від суміжних контурів електричний струм, а струми віток визначаються як алгебраїчна сума струмів контурів, що розглядаються.

Система рівнянь контурних струмів I_I, I_{II}, I_{III} у загальному вигляді для схеми з трьома незалежними контурами має вигляд:

$$\begin{aligned} I_I R_{11} + I_{II} R_{12} + I_{III} R_{13} &= E_I, \\ I_I R_{21} + I_{II} R_{22} + I_{III} R_{23} &= E_{II}, \\ I_I R_{31} + I_{II} R_{32} + I_{III} R_{33} &= E_{III}. \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

Кількість рівнянь за методом контурних струмів визначаємо за формулою:

$$N_p = b - (y - 1). \quad (2.2.8)$$

Струм у окремій вітці дорівнює різниці або сумі контурних струмів суміжних контурів, для яких ця вітка є спільною, в залежності від напрямку струмів у цій вітці.

Приклад.

Визначити струми у вітках наведеної раніше схеми (рис. 2.2.2) методом контурних струмів.

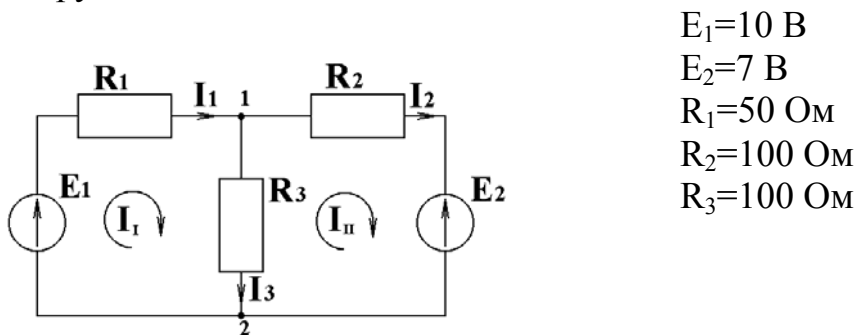


Рис. 2.2.2

Розв'язання.

Наведена схема має два незалежних контури. Довільно вибираємо позитивні напрями струмів у кожній вітці та напрями обходу контурів і позначаємо їх на схемі. Для кожного з контурів складаємо рівняння і одержуємо, таким чином, систему рівнянь, в яких невідомими є контурні струми:

$$\begin{aligned} I_I R_{11} + I_{II} R_{12} &= E_I, \\ I_I R_{21} + I_{II} R_{22} &= E_{II}, \end{aligned}$$

де $R_{11} = R_1 + R_3 = 150$ Ом - власний опір першого контуру;

$R_{22} = R_2 + R_3 = 200$ Ом - власний опір другого контуру;

$R_{12} = R_{21} = -R_3 = -100$ Ом - опір суміжної вітки між 1 і 2 контурами.

Знак мінус ставиться у тому випадку, коли контурні струми течуть через опір назустріч.

$$\begin{aligned} E_I &= E_1 = 10 \text{ В} - \text{контурна ЕРС 1-го контуру}; \\ E_{II} &= -E_2 = -7 \text{ В} - \text{контурна ЕРС 2-го контуру}. \end{aligned}$$

Знак мінус перед ЕРС E_2 ставиться тому, що напрям ЕРС E_2 протилежний напрямку обходу другого контуру.

Підставляємо цифрові значення у систему лінійних рівнянь і вирішуємо її відносно невідомих контурних струмів I_I та I_{II} методом складання визначників.

$$\begin{aligned} 150I_I - 100I_{II} &= 10 \\ -100I_I + 200I_{II} &= -7 \end{aligned}$$

Для цього складаємо головний визначник системи Δ та допоміжні Δ_1 та Δ_2 :

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} 150 & -100 \\ -100 & 200 \end{vmatrix} = 20000; \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} 10 & -100 \\ -7 & 200 \end{vmatrix} = 1300; \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} 150 & 10 \\ -100 & -7 \end{vmatrix} = -50. \end{aligned}$$

$$I_I = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{1300}{20000} = 0,065 \text{ А}; \quad I_{II} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-50}{20000} = -0,0025 \text{ А}.$$

Визначивши значення контурних струмів, визначаємо струми у вітках схеми:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_I = 0,065 \text{ А}; \\ I_2 &= I_{II} = -0,0025 \text{ А}; \\ I_3 &= I_I - I_{II} = 0,0675 \text{ А}. \end{aligned}$$

2.2.3. Метод накладання (суперпозиції)

Метод накладання базується на принципі накладання, який формулюється таким чином: струм будь-якої вітки електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів, викликаних дією кожного джерела окремо.

Приклад.

Для схеми кола (рис. 2.2.1) струм методом накладання визначається у такій послідовності:

Визначаємо струми, які виникають у колі від дії ЕРС E_1 (рис. 2.2.3)

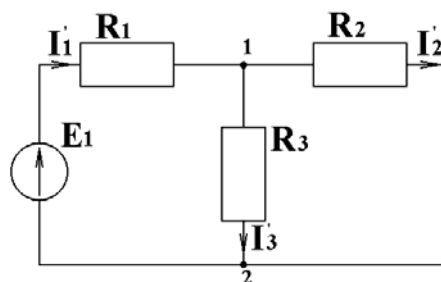


Рис. 2.2.3

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)} = \frac{10}{50 + 100 \cdot 100 / 100 + 100} = 0,1 \text{ A};$$

$$I_2' = I_1' \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0,1 \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A};$$

$$I_3' = I_1' \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 0,1 \frac{100}{100 + 100} = 0,05 \text{ A}.$$

Визначаємо струми, що течуть у колі від дії ЕРС E_2 (рис. 2.2.4).

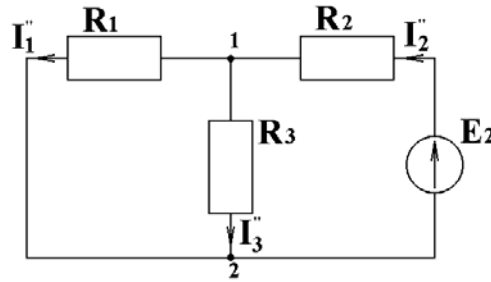


Рис. 2.2.4

$$I_2'' = \frac{E_2}{R_2 + R_1 R_3 / (R_1 + R_3)} = \frac{7}{100 + 50 \cdot 100 / (50 + 100)} = 0,0525 \text{ A};$$

$$I_1'' = I_2'' \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 100 / (50 + 100) = 0,035 \text{ A};$$

$$I_3'' = I_2'' \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 0,0525 \cdot 50 / (50 + 100) = 0,0175 \text{ A}.$$

3. Дійсні струми у вітках дорівнюють:

$$I_3 = I_3' + I_3'' = 0,05 + 0,0175 = 0,0675 \text{ A};$$

$$I_2 = I_2' - I_2'' = 0,0525 - 0,05 = 0,0025 \text{ A};$$

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 0,1 + 0,035 = 0,065 \text{ A}.$$

2.2.4. Метод вузлових потенціалів

За цим методом визначаються потенціали вузлів при заданому нульовому значенні потенціалу будь-якого вузла кола. Метод значно спрощує розрахунки у порівнянні з методом контурних струмів, коли кількість незалежних вузлів розгалуженого кола менше кількості незалежних контурів.

Тобто $(y-1) < (b-(y-1))$.

Основою метода є 1-й закон Кірхгофа і закон Ома.

Система рівнянь для трьох незалежних вузлів має вигляд:

$$\varphi_1 G_{11} - \varphi_2 G_{12} - \varphi_3 G_{13} = I_{11}$$

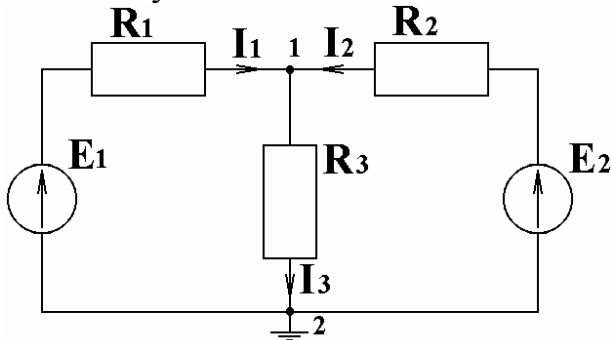
$$-\varphi_1 G_{21} + \varphi_2 G_{22} - \varphi_3 G_{23} = I_{22},$$

$$-\varphi_1 G_{31} - \varphi_2 G_{32} + \varphi_3 G_{33} = I_{33}$$

де G_{kk} – алгебраїчна сума провідностей, що сходяться у вузлі “к”;
 G_{km} – алгебраїчна сума провідностей між “к” і “m” вузлами;
 I_{kk} – вузловий струм “к”-вузла.
 Розв’язуючи цю систему рівнянь при відомих ЕРС і провідностях, можна визначити потенціали вузлів, а потім значення струмів у вітках.

Приклад.

Для схеми, що розглядається (рис. 2.2.5), визначимо струми у вітках методом вузлових потенціалів.



$$\begin{aligned} E_1 &= 10 \text{ В} \\ E_2 &= 7 \text{ В} \\ R_1 &= 50 \text{ Ом} \\ R_2 &= 100 \text{ Ом} \\ R_3 &= 100 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Рис. 2.2.5

Розв’язання.

У схемі два вузла. Один з вузлів заземляємо, тобто приймаємо $\varphi_2 = 0$.

Запишемо рівняння для вузла 1:

$$\varphi_1 G_{11} = I_{11},$$

де
$$G_{11} = G_1 + G_2 + G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{50} + \frac{1}{100} + \frac{1}{100} = 0,04 \text{ См};$$

$$I_{11} = E_1 G_1 + E_2 G_2 = 10 \frac{1}{50} + 7 \frac{1}{100} = 0,27 \text{ А.}$$

Визначаємо φ_1 :

$$\varphi_1 = \frac{I_{11}}{G_{11}} = \frac{0,27}{0,04} = 6,75 \text{ В.}$$

За законом Ома визначаємо струми у вітках схеми:

$$I_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{-6,75 + 10}{50} = 0,065 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_2}{R_2} = \frac{-6,75 + 7}{100} = 0,0025 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_3} = \frac{6,75}{100} = 0,0675 \text{ А.}$$

2.2.5. Метод еквівалентного генератора

Цей метод застосовують тоді, коли потрібно визначити струм у одній будь-якій вітці складного кола. Для цього вказану вітку, наприклад, між

вузлами “1-2” з опором R_3 виділяють окремо, а всю останню частину розгалуженого кола представляють у вигляді еквівалентного генератора з ЕРС $E_0 = U_{xx}$ і внутрішнім опором $R_{вх}$, при яких струм у вітці, яка розглядається, залишається незмінним.

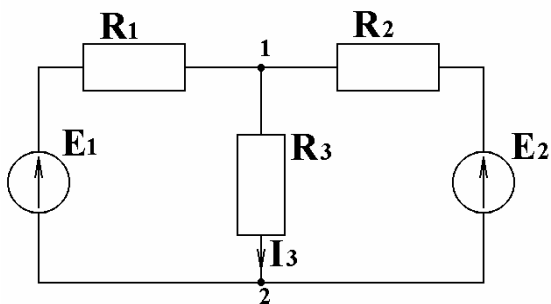
Одержане таким чином еквівалентне коло являє собою послідовне з’єднання, в якому діє ЕРС $E_0 = U_{xx}$, струм у цьому колі визначається за законом Ома:

$$I_3 = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + R_3},$$

Значення U_{xx} визначається дослідницьким або розрахунковим шляхом як напруга на затискачах “1-2” при від’єднаному опорі R_{12} (холостий хід). Вхідний опір $R_{вх}$ всієї схеми по відношенню до затискачів “1-2” визначають при замкнених джерелах ЕРС і розімкнених вітках з джерелами струму.

Приклад.

Для схеми (рис. 2.2.6) визначити струм у вітці з опором R_3 методом еквівалентного генератора.



$$\begin{aligned} E_1 &= 10 \text{ В} \\ E_2 &= 7 \text{ В} \\ R_1 &= 50 \text{ Ом} \\ R_2 &= 100 \text{ Ом} \\ R_3 &= 100 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Рис. 2.2.6

Розв’язання.

При розімкнутій вітці “1-2” з опором R_3 схема має такий вигляд (рис.2.2.7):

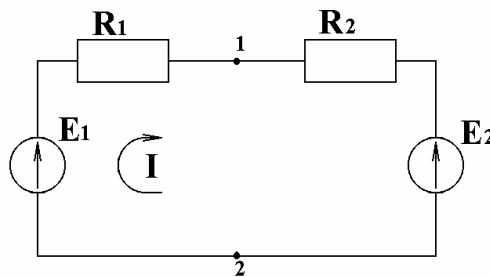


Рис. 2.2.7

Визначаємо напругу між точками “1” і “2”:

$$\begin{aligned} U_{xx} &= \varphi_1 - \varphi_2 = IR_2 + E_2, \\ I &= \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{10 - 7}{50 + 100} = 0,02 \text{ А}, \\ U_{xx} &= 0,02 \cdot 100 + 7 = 9 \text{ В}. \end{aligned}$$

Визначаємо $R_{вх}$ відносно точок “1”-“2”:

$$R_{BX} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{50 \cdot 100}{50 + 100} = 33,3 \text{ Ом}$$

Струм через опір R_3 визначаємо за формулою:

$$I_3 = \frac{U_{XX}}{R_{BX} + R_3} = \frac{9}{33,3 + 100} = 0,0675 \text{ А.}$$

2.3. Програма роботи

- 2.3.1. Виміряти ЕРС джерел електричної енергії.
- 2.3.2. Окремо виміряти струм у вітках кола кожного джерела.
- 2.3.3. Виміряти струм у вітках розгалуженого кола при двох ввімкнутих у коло джерелах енергії.

2.4. Необхідне обладнання

- | | |
|---|---------|
| 2.4.1. Стенд з опорами | - 1 шт. |
| 2.4.2. Вольтметр | - 1 шт. |
| 2.4.3. Універсальне джерело живлення | - 1 шт. |
| 2.4.4. Комплект з'єднувальних проводів. | |

2.5. Порядок виконання роботи

- 2.5.1. Ознайомитися з робочою схемою і зібрати коло (рис. 2.5.1).
- 2.5.2. Після перевірки схеми на джерелі живлення встановити задані значення ЕРС E_1 і E_2 при розімкнених вимикачах Q_1 і Q_2 .
- 2.5.3. Визначити струми у вітках схеми методом накладання (рис. 2.5.1), для чого:

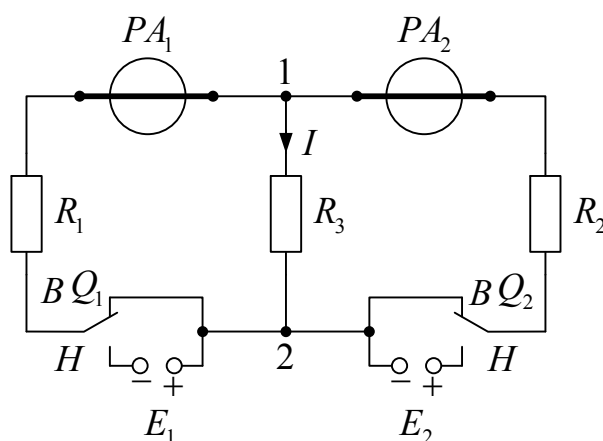


Рис. 2.5.1

- a) встановити перемикач Q_1 у верхнє положення, а перемикач Q_2 - у нижнє. При цьому живлення кола здійснюється від джерела E_1 . Записати покази амперметрів PA_1 , PA_2 . Результати вимірювань занести в таблицю 2.5.1.

- б) встановити перемикач Q2 у нижнє положення, а перемикач Q1 - у верхнє положення. При цьому живлення кола здійснюється від джерела E2. Записати покази амперметрів PA1, PA2 в таблицю 2.5.1.
- в) встановити перемикачі Q1 і Q2 у нижнє положення і при живленні кола від джерел E1 і E2 зробити вимірювання струмів амперметрами PA1 і PA2, і результати занести у таблиці 2.5.1 і 2.5.2. Струм I3 для кожного досліду визначається за першим законом Кірхгофа. Струми I1, I2, I3 порівнюють з розрахованими методом накладання.
- 2.5.4. За даними параметрами схеми (рис. 2.5.2) визначають струми у вітках методом контурних струмів, методом накладання і методом вузлових потенціалів. Одержані розрахунковим шляхом струми записують у таблицю 2.5.2.
- 2.5.5. Методом еквівалентного генератора для схеми (рис.2.5.2) визначити струм у заданій вітці.

Таблиця 2.5.1

EPC	Виміри		Розрахунки
	I ₁	I ₂	I ₃
	A	A	A
E ₁			
E ₂			
E ₁ , E ₂			

Таблиця 2.5.2

№ п.п.	Методи розрахунку	I ₁ , A	I ₂ , A	I ₃ , A
1.	Метод контурних струмів			
2.	Метод вузлових потенціалів			
3.	Метод накладання:			
4.	Метод еквівалентного генератора			

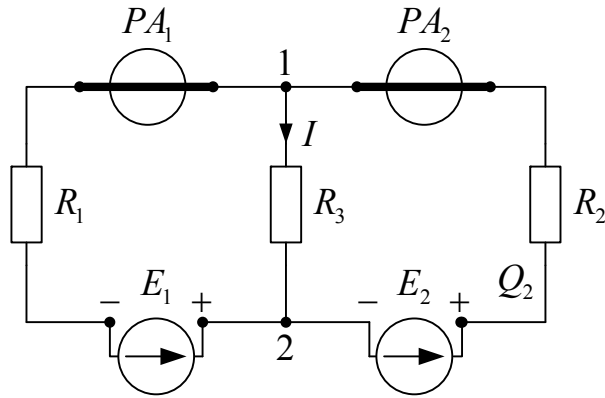


Рис. 2.5.2

2.6. Контрольні запитання

- 2.6.1. Охарактеризуйте основні етапи розрахунку електричних кіл методом контурних струмів.
- 2.6.2. Сформулюйте принцип і метод накладання.
- 2.6.3. Покажіть, що метод двох вузлів є частинним випадком метода вузлових потенціалів.
- 2.6.4. Як визначити струм у вітці методом еквівалентного генератора?
- 2.6.5. Як визначити параметри еквівалентного генератора дослідним і розрахунковим шляхом?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1. Мета роботи

Вивчення основних характеристик лінії електропередачі постійного струму за допомогою фізичної моделі.

3.2. Основні теоретичні положення

Нерозгалужена лінія електропередачі постійного струму являє собою двопроводну лінію, на початку якої підключено джерело, а в кінці - приймач електричної енергії, за допомогою цієї лінії енергія передається від джерела до приймача.

В умовах лабораторії дослідження лінії ведеться на фізичній моделі, електрична схема якої зображена на рис. 3.2.1.

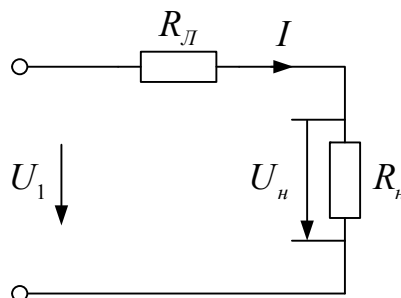


Рис. 3.2.1

де U_1 - напруга джерела;
 R_L - опір лінії;
 U_H - напруга на навантаженні;
 R_H - опір навантаження.

Розглянемо режим роботи лінії передачі при незмінній напрузі на початку лінії. Струм лінії визначається за законом Ома:

$$I = \frac{U_1}{R_L + R_H}, \quad (3.2.1)$$

Опір R_H може змінюватися від нуля до нескінченності. При $R_H = 0$ струм у лінії $I_k = \frac{U_1}{R_L}$ зветься струмом короткого замикання, а режим роботи лінії -

режимом короткого замикання. При $R_H = \infty$ струм у лінії дорівнює нулю, лінія при цьому розімкнена і такий режим зветься режимом холостого ходу. При зміні R_H від 0 до ∞ потужність змінюється за законами параболи. Напруга на затискачах приймача нижче напруги на початку лінії і відрізняється на величину падіння напруги ΔU у лінії.

$$U_H = U_1 - \Delta U = U_1 - IR_L, \quad (3.2.2)$$

При сталих U_1 і R_L напруга U_H залежить від струму I . Закон зміни $U_H = f(I)$ відповідає прямій лінії (рис. 3.2.2).

При $R_H = \infty$ струм $I = 0$, U_H має найбільше значення $U_H = U_1$.

При $R_H = 0$ струм I дорівнює струму короткого замикання. $I = I_K$ і $U_H = 0$.

$$U_H = U_1 - I_K R_L = U_1 - \frac{U_1}{R_L} R_L = 0 \quad (3.2.3)$$

Потужність джерела електричної енергії P_1 залежить від напруги джерела U_1 і струму I , що тече крізь нього:

$$P_1 = U_1 I, \quad (3.2.4)$$

Закон зміни $P_1 = f(I)$ представляє собою пряму лінію. Найменше значення $P_1 = 0$ при холостому ході лінії, а найбільше $P_1 = U_1 I_K = \frac{U_1^2}{R_L}$ – при короткому замиканні. Витрати потужності пропорційні квадрату струму і опору лінії.

$$\Delta P = I^2 R_L, \quad (3.2.5)$$

Залежність $\Delta P = f(I)$, являє собою вітку параболи. Для побудови графіка $\Delta P = f(I)$ необхідно мати хоча б три значення струму I , наприклад, $I = 0$,

$I = \frac{I_K}{2}$, $I = I_K$. Тоді при $I = 0$, $\Delta P = 0$; при $I = \frac{I_K}{2}$, $\Delta P = \frac{I_K^2 R_L}{4}$; при $I = I_K$,

$$\Delta P = I^2 R_L = \frac{U_1^2}{R_L}. \quad (3.2.6)$$

Потужність, що споживається приймачем електричної енергії P_H , визначається згідно з рівнянням:

$$P_H = P_1 - \Delta P = U_1 I - I^2 R_L. \quad (3.2.7)$$

Закон зміни потужності P_H у функції від струму I , тобто $P_H = f(I)$, має вигляд параболи (рис.3.2.2). Найменших значень $P_H=0$ набуває при холостому ході і короткому замиканні.

$$I = 0, \quad P_H = 0;$$

$$I = I_K, \quad P_H = U_1 I_K - I_K^2 R_L = \frac{U_1 U_1}{R_L} - \frac{U_1^2 R_L}{R_L^2} = 0. \quad (3.2.8)$$

У першому випадку струм $I = 0$, а у другому напруга $U_H = 0$. Максимальне значення потужності, що може бути передане по лінії від джерела до приймача, має місце при значенні струму $I = \frac{I_K}{2}$.

Для дослідження кривої $P_H = f(I)$ визначають, при якому значенні струму вона досягає максимального значення:

$$\frac{dP_H}{dI} = \frac{d(U_1 I - I^2 R_L)}{dI} = U_1 - 2IR_L = 0, \quad (3.2.9)$$

$$U_1 = 2IR_{\text{Л}}, I = \frac{U_1}{2R_{\text{Л}}} = \frac{I_{\text{К}}}{2}.$$

Таким чином, $P_{\text{Н}}$ набуває свого максимального значення $P_{\text{Нmax}}$ при струмі, який дорівнює половині значення струму короткого замикання, при цьому опір приймача $R_{\text{Н}}$ дорівнює опорі $R_{\text{Л}}$ лінії.

$$I = \frac{U_1}{2R_{\text{Л}}} = \frac{U_1}{R_{\text{Л}} + R_{\text{Н}}}, \quad (3.2.10)$$

тобто $R_{\text{Н}} = R_{\text{Л}}$.

Виходячи з цього, визначаємо максимальне значення потужності, що може бути передане по лінії від джерела до приймача:

$$P_{\text{Нmax}} = U_1 \frac{I_{\text{К}}}{2} - \frac{I_{\text{К}}^2}{4} R_{\text{Л}} = \frac{U_1^2}{2R_{\text{Л}}} - \frac{U_1^2}{4R_{\text{Л}}} = \frac{U_1^2}{4R_{\text{Л}}}. \quad (3.2.11)$$

Коефіцієнт корисної дії лінії передачі η визначається як відношення потужності приймача $P_{\text{Н}}$ до потужності джерела P_1 .

$$\eta = \frac{P_{\text{Н}}}{P_1} = \frac{U_1 I - I^2 R_{\text{Л}}}{U_1 I} = 1 - \frac{I R_{\text{Л}}}{U_1} \quad (3.2.12)$$

Закон зміни ККД в залежності від струму теж наведено на рис. 3.2.2.

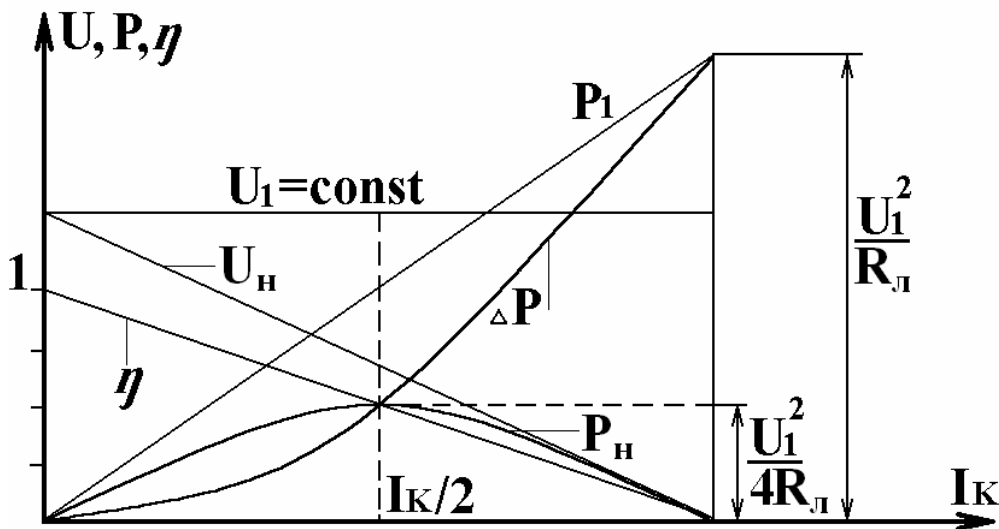


Рис. 3.2.2.

При $U_1 = const$ і $R_{\text{Л}} = const$ ККД зменшується із збільшенням струму у лінії, тобто $\eta = 1$ при холостому ході лінії ($I = 0$) і $\eta = 0$ при короткому замиканні лінії ($I = I_{\text{К}}$).

В режимі передачі максимальної потужності від джерела до приймача, коли $R_{\text{Н}} = R_{\text{Л}}$, коефіцієнт корисної дії дорівнює $\eta = 0,5$. Це означає, що тільки 50 % потужності джерела електричної енергії використовується приймачем, а решта потужності витрачається на нагрівання проводів і являє собою витрати потужності у лінії. При невеликих потужностях, що передаються по лініях

(лінії зв'язку, пристрої автоматики), ККД не має практичного значення, головне для цих ліній – отримання максимальної потужності струму у приймачі. Досягається це шляхом зрівняння або узгодження опору лінії і приймача.

3.3. Програма роботи

3.3.1. Провести дослідження фізичної моделі лінії передачі постійного струму при незмінній напрузі на початку лінії.

3.4. Необхідне обладнання

- | | |
|---|---------|
| 3.4.1. Лабораторний стенд | – 1 шт. |
| 3.4.2. Реостат | – 1 шт. |
| 3.4.3. Вольтметр 150-300 В | – 2 шт. |
| 3.4.4. Амперметр 1 А | – 1 шт. |
| 3.4.5. Комплект з'єднувальних проводів. | |

Примітка: при складанні схеми резистори R_1 і R_2 на лабораторному стенді модулюють опори проводів лінії, а резистори R_3, R_4, R_5, R_6, R_7 - навантаження.

3.5. Порядок виконання роботи

- 3.5.1. Після складання схеми (рис.3.5.1) та її перевірки викладачем встановлюють задану напругу на початку лінії і підтримуються це значення за допомогою реостата під час досліду однаковим.
- 3.5.2. Дослід починають з холостого ходу, коли всі тумблери вимкнені.

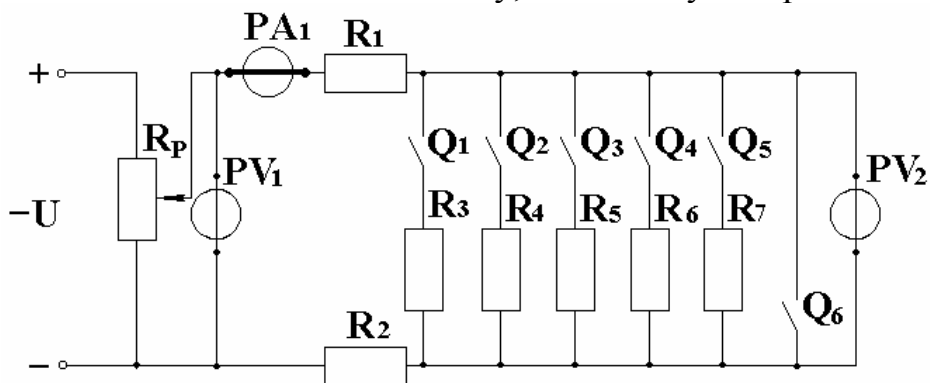


Рис. 3.5.1

3.5.3. Збільшуючи навантаження, тобто кількість ввімкнутих резисторів, записують покази приладів в таблицю 3.5.1. Останнє вимірювання роблять при короткому замиканні у кінці лінії, вмикаючи тумблер Q_6 .

Таблиця 3.5.1

U_1, B	I, A	U_2, B	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$\Delta P, Вт$	$\eta, B.o.$

Опори резисторів R_1 і R_2 визначають при короткому замиканні в кінці лінії.

3.5.4. Використовуючи дані досліду і розрахунків будують залежності

$$U_2 = f(I), P_1 = f(I), P_2 = f(I), \Delta P = f(I), \eta = f(I).$$

3.6. Контрольні запитання

- 3.6.1. За рахунок чого відбуваються втрати потужності в лінії?
- 3.6.2. При якому значенні струму потужність найбільша і чому це так?
- 3.6.3. Що називається коефіцієнтом корисної дії споживача і як він залежить від струму?
- 3.6.4. Що таке узгоджене навантаження і в яких лініях використовується такий режим роботи?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ З ПОСЛІДОВНИМ З'ЄДНАННЯМ РЕЗИСТОРА, КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ І КОНДЕНСАТОРА

4.1. Мета роботи

Метою роботи є визначення елементів R , L , C кола, дослідження співвідношень між цими елементами, розрахунок кола за визначеними параметрами та дослідна перевірка цього розрахунку при послідовному з'єднанні резистора, котушки індуктивності і конденсатора.

4.2. Основні теоретичні положення

Розглянемо коло, що складається з послідовно з'єднаних елементів R , L , C (рис. 4.2.1).

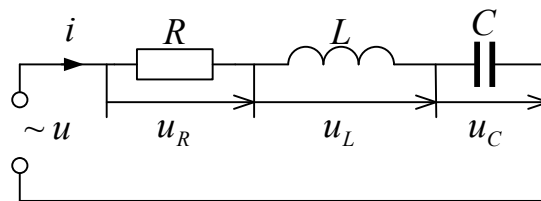


Рис. 4.2.1

Нехай у колі тече деякий струм $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ і відомі параметри R, L, C . Треба визначити напругу на ділянках кола u_R, u_L, u_C а також напругу, прикладену до всього кола, u .

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$u = u_R + u_L + u_C,$$

де $u_R = Ri = R \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i),$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos(\omega t + \psi_i) = \omega L I_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}),$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t + \psi_i) dt = \frac{1}{C\omega} I_m \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}).$$

У останньому виразі стала інтегрування дорівнює нулю, так як у напрузі на конденсаторі відсутня стала складова. Для розв'язання задачі будемо користуватись методом комплексних амплітуд або інакше символічним методом.

У комплексній формі рівняння $u = u_R + u_L + u_C$ запишеться таким чином:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C,$$

Підставивши у це рівняння значення комплексних напруг одержимо:

$$\underline{U} = R\underline{I} + j\omega L\underline{I} + \frac{1}{j\omega C}\underline{I}, \text{ або } \underline{U} = \underline{I} \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right].$$

Відношення комплексної напруги до комплексного струму називається комплексним опором:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{Ue^{j\psi_u}}{Ie^{j\psi_i}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} = Ze^{j\varphi}$$

або $\underline{Z} = Ze^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R + jX;$

де $R = Z \cos \varphi$ – активний опір;

$X = Z \sin \varphi$ – реактивний опір.

Тоді модуль комплексного опору буде дорівнювати $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, а $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$.

Для кола (рис. 4.2.1) будемо мати:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C) = R + jX,$$

де $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Для подальшого розв'язання задачі треба підставити комплексні величини струмів і напруг у рівняння, складені за другим законом Кірхгофа:

$$Ue^{j\psi_u} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} e^{j\varphi} Ie^{j\psi_i}.$$

Тоді будемо мати

$$U = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} I.$$

Враховуючи, що $U_m = \sqrt{2}U$, запишемо вираз для миттєвого значення цієї напруги:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

При періодичних процесах розраховують середнє значення миттєвої потужності за період T , яка називається активною потужністю:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi.$$

Множник $\cos \varphi$ називається коефіцієнтом потужності ($\cos \varphi \leq 1$). Поряд з активною потужністю введено поняття реактивної $\theta = UI \sin \varphi$ і повної $S = UI$ потужностей.

4.3. Програма роботи

- 4.3.1. Визначити параметри елементів схеми.
- 4.3.2. Виконати досліди кола при послідовному з'єднанні елементів R-L, R-C, R-L-C.
- 4.3.3. Виконати розрахунки, користуючись результатами дослідів.

4.4. Необхідне обладнання

- | | |
|---|---------|
| 4.4.1. Лабораторний стенд | - 1 шт. |
| 4.4.2. Автотрансформатор ЛАТР-1 | - 1 шт. |
| 4.4.3. Амперметр | - 1 шт. |
| 4.4.4. Вольтметр | - 2 шт. |
| 4.4.5. Ватметр | - 1 шт. |
| 4.4.6. Комплект з'єднувальних проводів. | |

4.5. Порядок виконання роботи

4.5.1. Для визначення параметрів елементів кола R , L , C зібрати схему (рис. 4.5.1). До затискачів 1-2 схеми по черзі під'єднують елементи R , L , C , а потім їх сполучення: $R-L$, $R-C$, $R-L-C$. У кожному випадку схема перевіряється викладачем, після чого автотрансформатором установлюється така напруга, щоб величина струму в колі становила $0,5$ А.

Котушки індуктивності та ємності кожній бригаді встановлює викладач. Напруги на окремих елементах схеми вимірюються переносним вольтметром. Після кожного дослідження автотрансформатором напругу зменшувати до нуля.

При кожній зміні в схемі її дані вимірювань занести у таблицю 4.5.1, виконати необхідні розрахунки і побудувати векторні діаграми для кожного пункту таблиці 4.5.1.

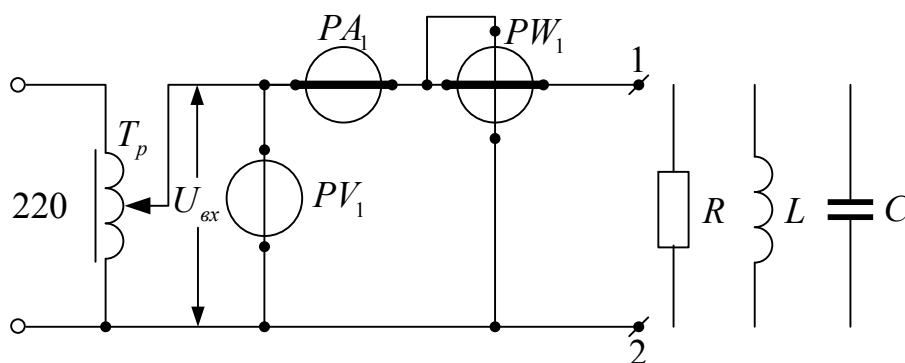


Рис. 4.5.1

Таблиця 4.5.1

№ п/п	Доследне коло	Виміри						Обчислення											
		U_{BX}, B	U_R, B	U_K, B	U_C, B	$P, Вт$	I, A	$Z_{CX}, Ом$	$R, Ом$	$R_{CX}, Ом$	$Z_K, Ом$	$R_K, Ом$	$X_L, Ом$	$L, Гн$	$X_C, Ом$	$C, мкФ$	$\cos\varphi_K$	φ_K	φ
		2	3	4	5	7	6	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1.	R						0,5												
2.	L						0,5												
3.	C						0,5												
4.	C-R						0,5												
5.	L-R						0,5												
6.	R-L-C						0,5												

4.5.2. Загальні розрахункові формули для схеми з послідовним з'єднанням R , L , C або варіантів з'єднання елементів.

$Z_{CX} = \frac{U_{CX}}{I};$ $U_{CX} = U_{BX}$ $X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2};$	$R = \frac{U_R}{I};$ $X_L = \omega \cdot L;$	$R_{CX} = \frac{P}{I^2};$ $L = \frac{X_L}{\omega}$	$R_K = R_{CX} - R;$ $X_C = \frac{U_C}{I};$	$Z_K = \frac{U_K}{I};$ $C = \frac{10^6}{\omega \cdot X_C};$
$\cos\varphi_K = \frac{R_K}{Z_K};$	$\varphi_K = \arccos \frac{R_K}{Z_K};$	$X = X_L - X_C ;$	$tg\varphi = \left \frac{X_L - X_C}{R_{CX}} \right $	
$\varphi = \arctg \frac{X}{R_{CX}};$		$X = \sqrt{Z_{CX}^2 - R_{CX}^2};$		

В наведених розрахункових формулах:

Z_{CX} – повний опір схеми (комплекс повного опору) – Ом

X – реактивний опір схеми – Ом

X_L – реактивний опір котушки індуктивності – Ом

X_C – реактивний опір ємності – Ом

Z_K – повний опір котушки індуктивності – Ом

R_{CX} – активний опір всього кола – Ом

R_K – активний опір котушки індуктивності – Ом

R – величина під'єданого в схему опору R – Ом

U_{BX} – вхідна напруга кола – В

U_R, U_L, U_C – спад напруги на елементах R, L, C – В

I – величина струму в колі – А

P – потужність, що розсіюється на активних елементах схеми – Вт

L – значення індуктивності котушки – Гн

C – величина ємності конденсатору – мкФ

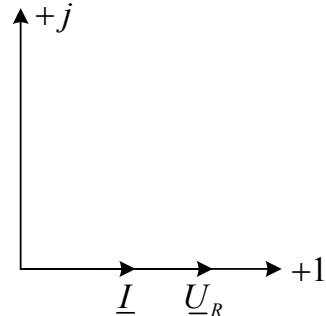
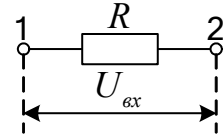
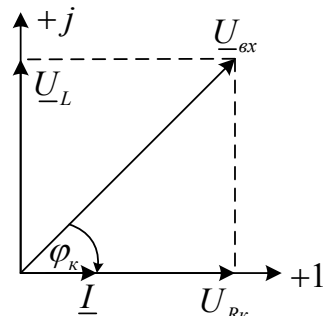
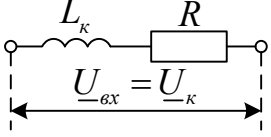
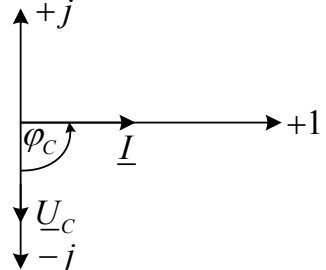
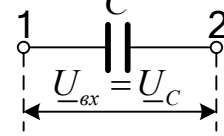
φ_K – кут зсуву між напругою на котушці U_K та струмом I в колі – град

φ – кут зсуву між вхідною напругою U_{BX} та струмом I в колі – град

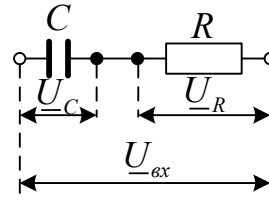
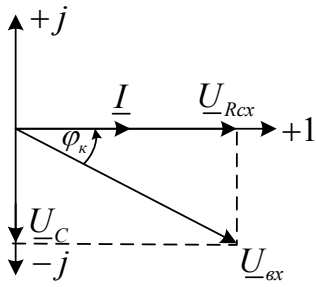
ω – кутова частота синусоїдного струму – $\frac{1}{\text{сек}}$

f – частота синусоїдного струму – Гц

4.5.3. Приклади розрахунків та побудови векторних діаграм

<p>1) R</p> 	 <p>$Z_{CX} = R_{CX} = R; U_{BX} = U_R; R = \frac{P}{I^2}; \cos \varphi = \frac{R}{Z_{CX}} = \frac{R}{R} = 1;$ $\varphi = \arccos 1; \varphi = 0^\circ$</p>
<p>2) L</p> 	 <p>$Z_{CX} = Z_K = \frac{U_{BX}}{I} = \frac{U_K}{I}; R_{CX} = R_K = \frac{P}{I^2}; U_{RK} = I \cdot R_K;$ $Z_{CX} = R_K + jX_L; X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; U_L = I \cdot X_L;$ $X_L = \omega \cdot L; L = \frac{X_L}{\omega}; \omega = 2\pi f; f = 50 \text{ Гц};$ $\cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_{CX}}; \varphi_K = \arccos \frac{R_K}{Z_{CX}}$</p>
<p>3) C</p> 	 <p>$Z_{CX} = -jX_C; R_{CX} = 0; U_{BX} = U_C; X_C = \frac{U_C}{I};$ $C = \frac{10^6}{X_C \cdot \omega} \text{ мкФ}; \omega = 2\pi f; f = 50 \text{ Гц};$ $\cos \varphi = \frac{R_{CX}}{Z_{CX}} = \frac{0}{Z_{CX}}; \varphi = \arccos 0 \rightarrow \varphi = -\frac{\pi}{2} (-90^\circ)$</p>

4) C-R

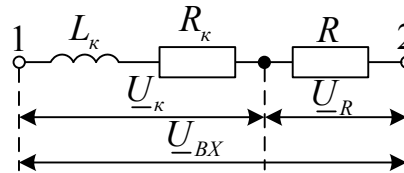
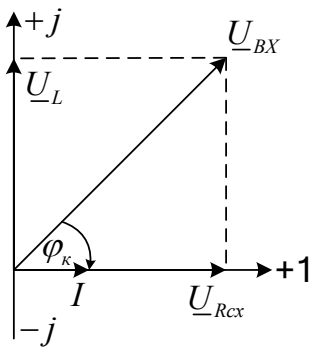


$$Z_{CX} = \sqrt{R_{CX}^2 + X_C^2}; \quad Z_{CX} = \frac{U_{BX}}{I}; \quad R_{CX} = R = \frac{U_R}{I} = \frac{P}{I^2};$$

$$X_C = \frac{U_C}{I}; \quad \omega = 2\pi f; \quad C = \frac{10^6}{X_C \cdot \omega} \text{ мкФ}; \quad f = 50 \text{ Гц};$$

$$\cos \varphi = \frac{R_{CX}}{Z_{CX}}; \quad \varphi = \arccos \frac{R_{CX}}{Z_{CX}};$$

5) L-R

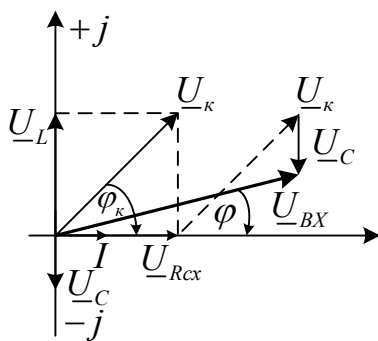


$$R_{CX} = \frac{P}{I^2}; \quad R_{CX} = R + R_K; \quad R_K = R_{CX} - R; \quad Z_{CX} = \frac{U_{BX}}{I}$$

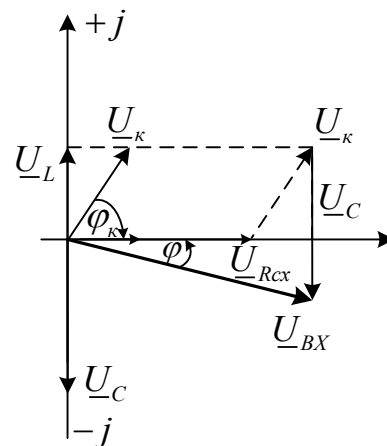
$$U_{R_{CX}} = U_R + U_{R_K}; \quad X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \quad \cos \varphi_K = \frac{R_{CX}}{Z_{CX}};$$

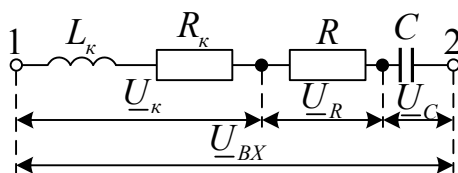
$$\varphi_K = \arccos \frac{R_{CX}}{Z_{CX}}; \quad L = \frac{X_L}{\omega}$$

6a) R-L-C ($U_L > U_C$)



6б) R-L-C ($U_L < U_C$)





$$R_{CX} = \frac{P}{I^2}; R_{CX} = R + R_K; R = \frac{U_R}{I}; R_K = R_{CX} - R; Z_{CX} = \frac{U_{BX}}{I};$$

$$Z_{CX} = R_{CX} + j(X_L - X_C); X_L - X_C = X = \sqrt{Z_{CX}^2 - R_{CX}^2}; Z_K = \frac{U_K}{I}; U_C = X_C \cdot I;$$

$$X_C = \frac{U_C}{I}; C = \frac{10^6}{X_C \cdot \omega} \text{ мкФ}; X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; L = \frac{X_L}{\omega}; \cos \varphi_K = \frac{R_K}{Z_K}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R_{CX}} \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R_{CX}}$$

4.6. Контрольні запитання

- 4.6.1. Який опір зветься активним, а який – реактивним?
- 4.6.2. Як залежить ємнісний опір від ємності конденсатора і частоти струму?
- 4.6.3. Як залежить індуктивний опір котушки від її індуктивності і частоти струму?
- 4.6.4. Яке значення змінного струму показують прилади електромагнітної системи?
- 4.6.5. Дайте пояснення процесу проходження синусоїдного струму через котушку індуктивності.
- 4.6.6. Дайте пояснення процесу проходження струму через конденсатор.
- 4.6.7. Дайте фізичну інтерпретацію P, Q, S .
- 4.6.8. Який вигляд мають векторні діаграми струму і напруги для котушки індуктивності і конденсатора?
- 4.6.9. Накреслити трикутники опорів, напруг, потужностей.
- 4.6.10. Що називають кутом зсуву фаз між струмом і напругою і як його визначити?
- 4.6.11. Запишіть закон Ома для кола з послідовним з'єднанням активного опору, котушки індуктивності і ємності.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ З ПАРАЛЕЛЬНИМ І ЗМІШАНИМ З'ЄДНАННЯМ РЕЗИСТОРА, КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ І КОНДЕНСАТОРА

5.1. Мета роботи

Дослідна перевірка основних методів розрахунку лінійних електричних кіл однофазного синусоїдного струму при паралельному і змішаному з'єднанні резистора, котушки індуктивності і конденсатора на фізичній моделі.

5.2. Основні теоретичні положення

Розглянемо електричне коло при паралельному з'єднанні приймачів (рис. 5.2.1)

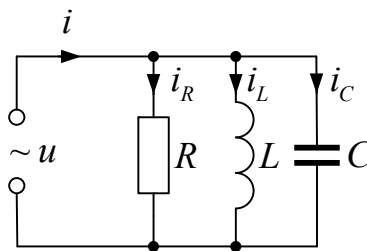


Рис. 5.2.1

Нехай до кола прикладена напруга $u = U_m \sin(\omega + \psi_u)$. Значення R, L, C задані. Треба визначити струми у вітках та нерозгалуженій частині кола.

Запишемо за першим законом Кірхгофа рівняння для миттєвого значення струму у нерозгалуженій частині кола:

$$i = i_R + i_L + i_C,$$

або в комплексній формі для діючих значень:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C. \quad (5.2.1)$$

Застосовуючи закон Ома у комплексній формі, одержимо значення комплексів струмів для кожної вітки:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= \frac{U}{R} = \frac{U}{R} e^{j\psi_u}; \\ \underline{I}_L &= \frac{U}{j\omega L} = \frac{U}{\omega L} e^{j(\psi_u - \frac{\pi}{2})}; \\ \underline{I}_C &= \frac{U}{\frac{1}{j\omega C}} = j\omega C U e^{j\psi_u} = \omega C U e^{j(\psi_u + \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

З одержаних рівнянь видно, що:

- струм в активному опорі збігається з напругою за фазою;
- струм на індуктивності відстає від напруги за фазою на кут $\frac{\pi}{2}$;
- струм на ємності випереджає за фазою напругу на кут $\frac{\pi}{2}$.

Одержавши значення комплексів дійсних струмів запишемо миттєві значення цих струмів у вигляді функцій часу:

$$\begin{aligned} i_R &= \sqrt{2}I_R \sin(\omega t + \psi_u), \text{ де } I_R = \frac{U}{R}; \\ i_L &= \sqrt{2}I_L \sin(\omega t + \psi_u - \frac{\pi}{2}), \text{ де } I_L = \frac{U}{\omega L}; \\ i_C &= \sqrt{2}I_C \sin(\omega t + \psi_u + \frac{\pi}{2}), \text{ де } I_C = U\omega C. \end{aligned} \quad (5.2.3)$$

Знайдемо вираз струму у нерозгалуженій частині. Для цього підставимо значення комплексів струмів у рівняння, складене для них за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I} = \frac{U}{R} + \frac{U}{j\omega L} + \frac{U}{\frac{1}{j\omega C}} = U \left[\frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \right]. \quad (5.2.4)$$

З цього виразу визначаємо комплексну провідність:

$$\underline{Y} = \frac{\underline{I}}{\underline{U}} = \frac{1}{R} - j \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = g - j(b_L - b_C), \quad (5.2.5)$$

де $g = \frac{1}{R}$; $b_L = \frac{1}{\omega L}$; $b_C = \omega C$ називають відповідно активною, індуктивною та ємнісною провідностями.

Повна реактивна провідність дорівнює: $b = b_L - b_C$.

Таким чином запишемо, що

$$\underline{I} = \underline{U}\underline{Y} = U e^{j\psi_u} \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2} e^{-j\varphi}. \quad (5.2.6)$$

З цього виходить, що

$$I = U \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)^2}; \quad (5.2.7)$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i \quad (5.2.8)$$

де φ – це кут зсуву фаз між напругою та струмом.

Таким чином, миттєве значення струму дорівнює:

$$i = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \psi_i).$$

Розглянемо приклад розрахунку електричного кола для змішаного з'єднання приймачів (рис. 5.2.2).

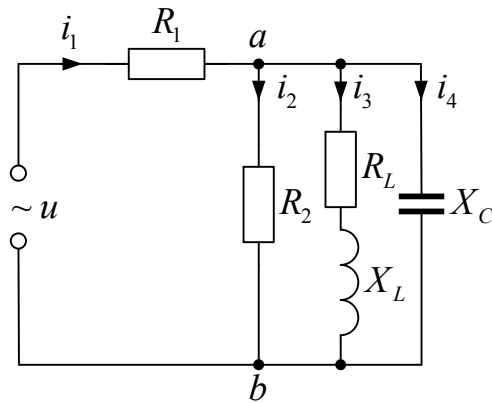


Рис. 5.2.2

Знайдемо провідність паралельно з'єднаних приймачів:

$$\underline{Y}_{ab} = \underline{Y}_R + \underline{Y}_L + \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_R} + \frac{1}{\underline{Z}_L} + \frac{1}{\underline{Z}_C} \quad (5.2.9)$$

Визначаємо комплексний опір ділянки а-в:

$$\underline{Z}_{ab} = \frac{1}{\underline{Y}_{ab}} = \frac{\underline{Z}_R \underline{Z}_L \underline{Z}_C}{\underline{Z}_R \underline{Z}_L + \underline{Z}_R \underline{Z}_C + \underline{Z}_L \underline{Z}_C}, \quad (5.2.10)$$

Загальний опір кола: $\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ab}$.

Струм у нерозгалуженій частині: $\underline{I}_1 = \frac{U}{\underline{Z}}$.

Струм у вітках ділянки паралельного з'єднання елементів:

$$\underline{I}_2 = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_R}; \quad \underline{I}_3 = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_L}; \quad \underline{I}_4 = \frac{U_{ab}}{\underline{Z}_C} \quad (5.2.11)$$

де $\underline{U}_{ab} = \underline{I} \underline{Z}_{ab}$.

Розрахунки перевіряються за допомогою першого закону Кірхгофа:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_4. \quad (5.2.12)$$

і другого закону Кірхгофа:

$$\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_{ab}. \quad (5.2.13)$$

5.3. Програма роботи

- 5.3.1. Визначити параметри елементів кола.
- 5.3.2. Провести дослідження кола з паралельним з'єднанням елементів $R-L-C$.
- 5.3.3. Провести розрахунок електричного кола при змішаному з'єднанні елементів.

5.4. Необхідне обладнання

- | | |
|---------------------------------|---------|
| 5.4.1. Лабораторний стенд | - 1 шт. |
| 5.4.2. Автотрансформатор ЛАТР-1 | - 1 шт. |
| 5.4.3. Амперметр | - 2 шт. |

5.4.4. Вольтметр

- 2 шт.

5.4.6. Комплект з'єднувальних проводів.

5.5. Порядок виконання роботи

5.5.1. Зібрати електричне коло згідно схеми, наведеної на рис. 5.5.1. без R_1 .

5.5.2. Автотрансформатором встановити вхідну напругу 30 В.

5.5.3. Переносним амперметром PA_2 виміряти струми у кожній вітці і струм в нерозгалуженій частині амперметром PA_1 . Покази амперметрів записати в таблицю 5.5.1 і визначити параметри елементів кола.

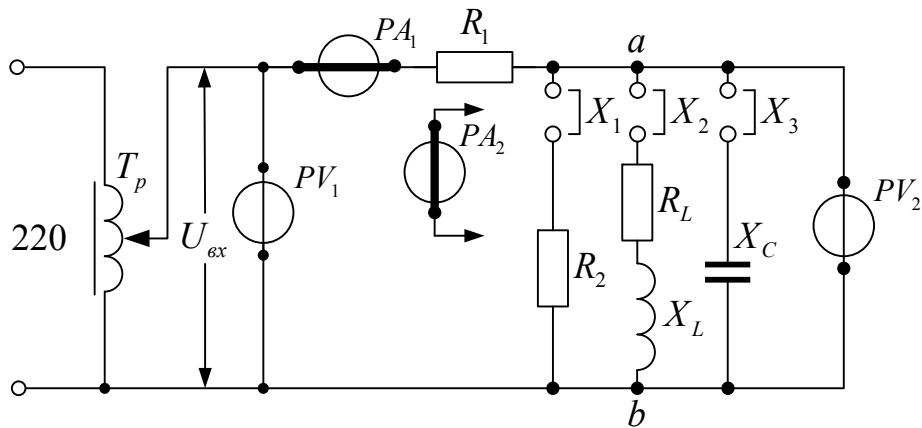


Рис. 5.5.1

Таблиця 5.5.1

№ п/п	Назва елементів	Паралельне з'єднання			Змішане з'єднання			
		U ₁	I	Опір	U ₁	I	Опір	U ₂
		В	А	Ом	В	А	Ом	В
1.	Резистор R_2							
2.	Котушка індуктивності							
3.	Ємність							
4.	Нерозгалужена частина кола							

5.5.4. За даними таблиці 5.5.1 побудувати векторну діаграму.

5.5.5. У нерозгалужену частину ввімкнути резистор R_1 , встановити напругу 100 В, зняти покази амперметра PA_1 і переносного PA_2 , вольтметра PV_2 . Результати вимірів записати у таблицю 5.5.1.

5.5.6. Визначити опір резистора R_1 , розрахувати струми у колі і записати у таблицю 5.5.2.

Таблиця 5.5.2

№ п/п	Назва елементів кола	Паралельне з'єднання	Змішане з'єднання
		I, A	I, A
1.	Резистор R_1		
2.	Резистор R_2		
3.	Котушка індуктивності		
4.	Конденсатор		
5.	Нерозгалужена частина кола		

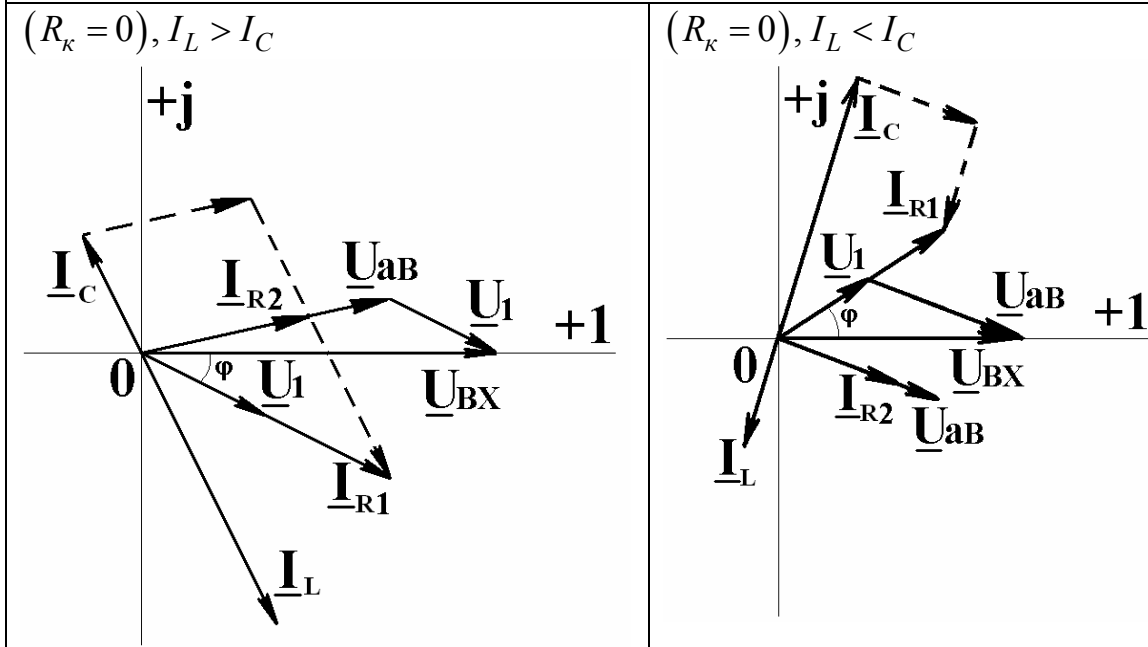
5.5.7. Побудувати векторну діаграму для змішаного з'єднання.

5.5.8. Види векторних діаграм наведені в таблиці 5.5.3.

Таблиця 5.5.3.

Паралельне з'єднання	
<p>1) $R-L (R_k = 0)$</p>	<p>2) $R-C$</p>
<p>3) $R-L-C (R_k = 0), I_L > I_C$</p>	<p>$(R_k = 0), I_L < I_C$</p>

Змішане з'єднання



Примітка: при змішаному з'єднанні, комплекси напруг та струмів матимуть різні кути відносно координатної сітки $(+1, +j)$, але завжди струми I_L та I_C будуть знаходитись в протифазі.

5.6. Контрольні запитання

- 5.6.1. Як визначити повну провідність кола при паралельному з'єднанні елементів?
- 5.6.2. Що таке трикутник провідностей?
- 5.6.3. Побудуйте векторні діаграми для послідовного, паралельного і змішаного з'єднання елементів і дайте пояснення.
- 5.6.4. На чому базується символічний метод розрахунку кіл?
- 5.6.5. Як розрахувати коло з послідовним, паралельним, змішаним з'єднанням без використання метода комплексних амплітуд?
- 5.6.6. Як визначити активну і реактивну провідності?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ НАПРУГ

6.1. Мета роботи.

Дослідження явищ, які виникають в електричному колі з послідовним з'єднанням конденсатору та котушки індуктивності і одержання резонансу напруг.

6.2. Основні теоретичні положення.

В електричному колі з послідовним з'єднанням конденсатору та котушки індуктивності (рис.6.2.1) при певних умовах може мати місце явище резонансу напруг, тобто явище, коли напруга на індуктивності буде дорівнювати напрузі на ємності.

Якщо в колі є активний опір, то прикладена напруга при резонансі буде дорівнювати падінню напруги на активному опорі, тобто $\underline{U}_{BX} = \underline{U}_a = \underline{I}R$, тому що напруги на індуктивності та ємності знаходяться в протифазі.

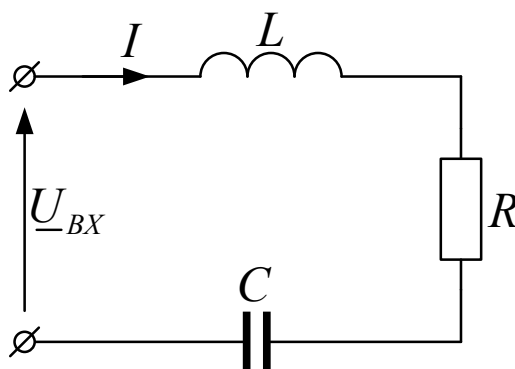


Рис. 6.2.1.

З цієї формули видно, що при резонансі напруг напруга на вході і струм в колі збігаються за фазою. Векторна діаграма при резонансі напруг має вигляд (рис. 6.2.2.)

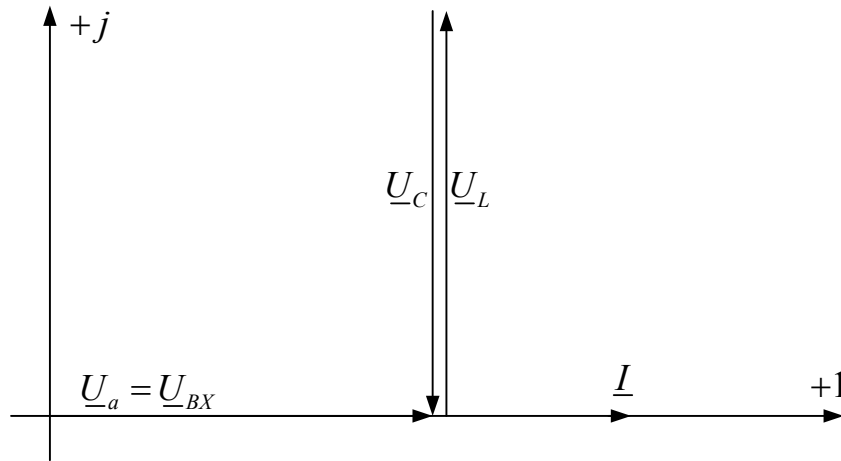


Рис. 6.2.2.

За другим законом Кірхгофа для нашого кола можна записати:

$$\underline{U}_{BX} = \underline{I}R + j(X_L - X_C)\underline{I} = \underline{I}R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)\underline{I}, \quad 6.2.1$$

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

звідси знаходимо
$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_{BX}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad 6.2.2$$

Так як при резонансі напруг

$$\underline{U}_{L_o} = \underline{U}_{C_o},$$

тобто
$$\underline{I}_o j\omega L = \underline{I}_o \left(\frac{1}{j\omega C}\right), \quad 6.2.3$$

де \underline{I}_o – значення струму при резонансі;

то умовою резонансу напруг є рівність індуктивного та ємнісного опорів. При цьому, вхідний реактивний опір дорівнює нулю і опір кола має чисто активний характер. З рівняння 6.2.3 знайдемо кутову частоту:

$$\omega = \omega_o = 1/\sqrt{LC}$$

Кутова частота, при якій настає резонанс, зветься резонансною кутовою частотою або власною частотою контуру. Враховуючи, що у режимі резонансу напруг $\underline{U}_{L_o} = \underline{U}_{C_o}$, струм у колі набуває максимального значення і розраховується за формулою $\underline{I}_o = \frac{\underline{U}_{BX}}{R}$. Напруга на індуктивності та ємності визначається множенням \underline{U}_{BX} на відношення реактивних і активних опорів:

$$\underline{U}_{L_o} = \underline{U}_{BX} \frac{X_{L_o}}{R}; \quad \underline{U}_{C_o} = \underline{U}_{BX} \frac{X_{C_o}}{R}.$$

Зважаючи на те, що котушка індуктивності має не тільки індуктивний, але й активний опір, то вольтметр, підключений до неї, покаже не чисто індуктивну напругу U_L , а напругу U_K , тому резонанс напруг визначають не по

рівності показників вольтметрів на котушці та ємності, а по показнику амперметра.

В рівняннях

$$U_{L_0} = \omega_0 L I_0 = \rho I_0; \quad U_{C_0} = \frac{1}{\omega_0 C} \cdot I_0 = \rho I_0,$$

де $\rho = \sqrt{L/C}$ - хвильовий опір.

У випадку, якщо $X_L > R$ і $X_C > R$, реактивна складова напруга буде більше прикладеної напруги, що приведе до перенапруги на індуктивності та ємності.

Відношення

$$\frac{U_{L_0}}{U_{BX}} = \frac{U_{C_0}}{U_{BX}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\rho I_0}{R I_0} = \frac{\rho}{R} = Q$$

називають добротністю контуру, а величину, зворотну до добротності – коефіцієнтом згасання контуру.

$$d = \frac{1}{Q} = \sqrt{\frac{R}{\rho}}.$$

При резонансі напруг індуктивна складова потужності кола дорівнює ємнісній складовій.

Реактивна потужність індуктивності: $Q_{L_0} = I_0^2 \cdot X_{L_0}$

Реактивна потужність ємності: $Q_{C_0} = I_0^2 \cdot X_{C_0}$

Реактивна потужність кола: $Q = Q_L - Q_C = 0$

Активна потужність кола: $P = U_{BX} \cdot I_0 = I_0^2 R$

Досягнути резонансу напруг можна шляхом зміни індуктивності котушки, ємності конденсатора, а також шляхом зміни частоти напруги живлення.

6.3. Потрібне обладнання.

6.2.1. Автотрансформатор	1 шт.
6.2.2. Вольтметри	3 шт.
6.2.3. Амперметр	1 шт.
6.2.4. Лабораторний стенд	1 шт.
6.2.5. Комплект з'єднувальних проводів.	

6.4. Порядок виконання роботи

6.4.1. Зібрати схему за рис. 6.4.1 і після її перевірки керівником включити живлення.

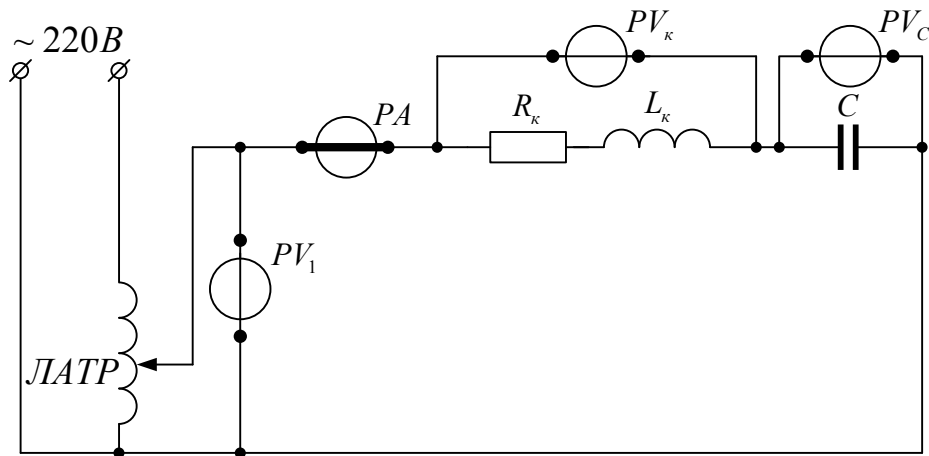


Рис. 6.4.1.

6.4.2. На лабораторному стенді встановити постійну індуктивність, що вказана викладачем. При постійній напрузі не більше 50 В (або тій, що вкаже викладач) змінювати ємність на лабораторному стенді, показники приладів записувати в таблицю 6.4.1. Після резонансу, який визначається за максимальним показом амперметра, провести ще ряд вимірів.

Таблиця 6.4.1

№№ ПП	$L = const$ $C \neq const$				Розраховано	
	Uвх	I	Uк	Uс	Xс	C
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						

$$X_c = \frac{U_c}{I} \text{ (Ом)}; \quad C = \frac{1}{X_c \cdot \omega} \text{ (Ф)}.$$

За даними таблиці побудувати графік $I = f(C)$

6.4.3. Встановити на лабораторному стенді постійну ємність, яку вкаже викладач, і змінювати індуктивність шляхом переключення регулятора на лабораторному стенді. Записати показники приладів до і після резонансу в таблицю 6.4.2.

$L \neq const$ $C = const$

№№ ПП	Виміряно				Розраховано
	U _{ВХ}	I	U _К	U _С	Z _К
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
6.					

$$Z_K = \frac{U_K}{I}$$

За даними таблиці 6.4. 2 побудувати графік $I = f(Z_K)$.

6.5. Запитання до захисту роботи.

- 6.5.1. Що називається резонансом напруг?
- 6.5.2. В яких колах виникає резонанс напруг?
- 6.5.3. Умови резонансу напруг.
- 6.5.4. Що таке хвильовий опір?
- 6.5.5. Дати пояснення згасанню і добротність контуру.
- 6.5.6. Дати визначення який вигляд має векторна діаграма до, в момент та після резонансу напруг?
- 6.5.7. Які засоби досягнення резонансу напруг?
- 6.5.8. Записати закон Ома для схеми з R, L, C у різних режимах роботи.
- 6.5.9. Як визначається потужність кола у різних режимах роботи?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ СТРУМІВ

7.1. Мета роботи

Дослідження явищ, які виникають в розгалуженому електричному колі змінного струму, в одну вітку якого включено конденсатор, а у другу – індуктивна котушка. Здобуття резонансу струмів, коли змінюються значення ємності та індуктивності.

7.2. Основні теоретичні положення.

Резонанс струмів може виникнути у розгалуженому колі, в одну вітку якого включено конденсатор, а в другу – котушка індуктивності. Резонанс струмів – це таке явище, коли реактивні складові струмів у вітках по модулю рівні і протилежно спрямовані. Струм у нерозгалуженій частині кола I_p буде при цьому мінімальним. Реактивні складові струмів у вітках $I_{Lp} = I_{Cp}$

Але
$$\underline{I}_{Lp} = \underline{U} \cdot b_L$$

де $b_L = X_L / Z_1^2$ - реактивна провідність першої вітки;

$$\underline{I}_{Cp} = \underline{U} \cdot b_C$$

де $b_C = X_C / Z_2^2$ - реактивна провідність другої вітки.

Тоді маємо $\underline{U} \cdot b_L = \underline{U} \cdot b_C$

$$\text{або } b_L = b_C; \quad X_L / Z_1^2 = X_C / Z_2^2; \quad Z_1 = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}; \quad Z_2 = \sqrt{R_c^2 + X_c^2}.$$

Для схеми рис.7.2.1 при резонансі маємо:

$$\frac{\omega L}{R_k^2 + (\omega L)^2} = \omega C$$

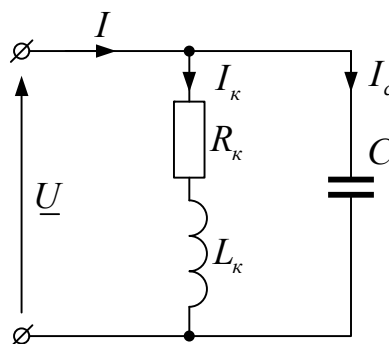


Рис. 7.2.1

Отже, умовою резонансу струмів є рівність реактивних провідностей, що досягається зміною індуктивності, ємності або частоти струму. При резонансі струмів струм у нерозгалуженій ділянці кола сходиться за фазою з напругою. При цьому кут зсуву фаз між струмом і напругою визначається за формулою:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b}{g} = \frac{b_L - b_C}{g} = 0;$$

Це є умовою того, що струм і напруга сходяться за фазою. Активна провідність котушки визначається за формулою:

$$g_K = \frac{R_K}{R_K^2 + (\omega L)^2}.$$

Як було вказано, при резонансі струмів (рис.7.2.1/ струм нерозгалуженої частини кола буде мінімальним, так як $b = b_L - b_C = 0$ і визначається за формулою: $I_p = UY = U\sqrt{g^2 + b^2} = U \cdot g$.

Так як амперметри, що включені у паралельні вітки, вимірюють повні струми у вітках, а не їх реактивні складові, то за рівністю показів амперметрів вважати про наступ резонансу струмів не можна. Резонанс струмів визначається по мініальному струму в нерозгалуженій частині кола.

У схемах такої конфігурації (рис.7.2.1) частота струму визначається формулою:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_K}{\rho^2}}; \quad \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Струм котушки у комплексному вигляді:

$$\underline{I}_L = \underline{U} \cdot g_K - j\underline{U} \cdot b_L = \underline{U}(g_K - jb_L) = \sqrt{(U \cdot g_K)^2 + (U \cdot b_L)^2} e^{-j \operatorname{arctg} \frac{b_L}{g_K}}$$

Струм ємності у комплексному вигляді:

$$\underline{I}_C = \underline{U} j b_C = \underline{U} j \omega_p C$$

Струм в нерозгалуженій частині схеми:

$$\underline{I}_p = \underline{I}_L + \underline{I}_C$$

$$Q = \frac{I_L}{I_p} = \frac{I_C}{I_p} \quad - \text{добротність контуру}$$

При резонансі струмів реактивні потужності котушки і конденсатора однакові:

$$Q_L = Q_C = \underline{U}^2 \cdot b_L = \underline{U}^2 \cdot b_C$$

у колі відбувається обмін енергії між магнітним полем котушки індуктивності та електричним полем конденсатора. При цьому струми у вітках перевищують струм у нерозгалуженій частині кола. Векторна діаграма при резонансі струмів для схеми рис. 7.2.1 має вигляд (рис.7.2.2):

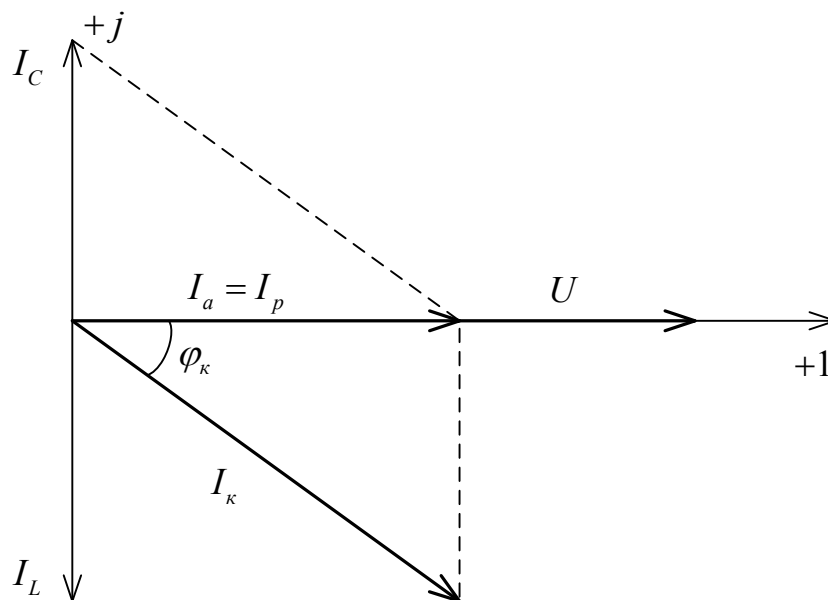


Рис. 7.2.2

7.3. Потрібне обладнання

- | | |
|---|-------|
| 7.3.1. Автотрансформатор. | 1 шт. |
| 7.3.2. Вольтметр. | 1 шт. |
| 7.3.3. Амперметри. | 3 шт. |
| 7.3.4. Лабораторний стенд. | 1 шт. |
| 7.3.5. Комплект з'єднувальних проводів. | |

7.4. Порядок виконання роботи.

7.4.1. Зібрати схему, вказану на рис.7.4.1, і після перевірки її викладачем, включити живлення.

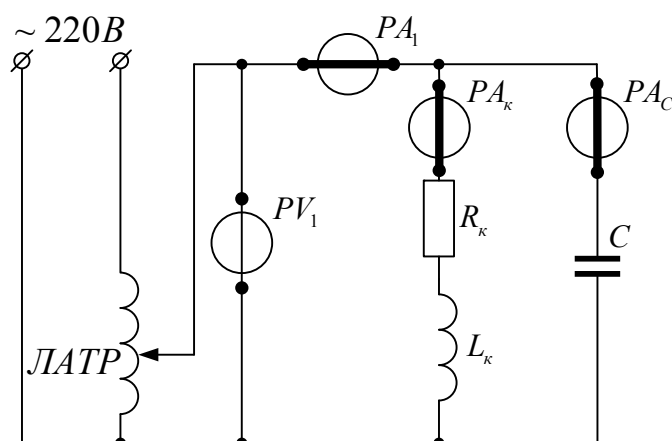


Рис. 7.4.1

7.4.2. На лабораторному стенді встановити перемикачем індуктивність, вказану викладачем, і при постійній напрузі 50 В (або вказаній викладачем) змінювати перемикачем ємність конденсатора до одержання резонансу, який

визначається по мінімальному показнику амперметра. Після резонансу провести ще кілька вимірів.

Показники записати в таблицю 7.4.1.

Таблиця 7.4.1

$$L = const \quad C \neq const$$

№№ п.п.	Виміряно				Розраховано	
	$U_{вх}$	I	I_k	I_c	X_c	C
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						
6.						

$$X_c = \frac{U_{ВХ}}{I_C} \quad C = \frac{1}{X_C \cdot \omega}$$

За даними таблиці 7.4.1 побудувати графік $I = f(C)$

7.4.3. На лабораторному стенді встановити перемикачем ємність, вказану викладачем, і при постійній напрузі 50 В змінювати індуктивність до одержання резонансу. Зробити ще декілька вимірів після резонансу. Показники приладів записати в таблицю 7.4.2.

Таблиця 7.4.2

$$C = const \quad L \neq const$$

№№ п.п.	Виміряно				Розраховано
	$U_{вх}$	I	I_k	I_c	Z_k
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

$$Z_k = \frac{U_{вх}}{I_k}$$

За даними таблиці 7.4.2 побудувати графік $I = f(Z_k)$

Примітка: Криві графіків мають вгнуту форму.

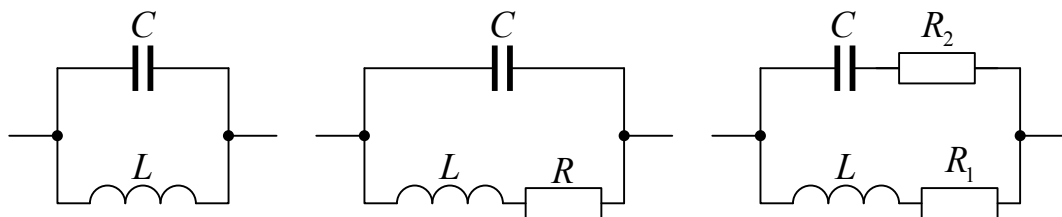
7.5. Запитання до захисту роботи

7.5.1. В якому колі виникає резонанс струмів? Умови резонансу струмів.

7.5.2. Яким чином можна досягти резонансу струмів?

7.5.3. Чому дорівнює резонансна частота при резонансі струмів?

7.5.4. Накреслити векторні діаграми до схем:



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАСИВНОГО ЧОТИРИПОЛЮСНИКА

8.1 Мета роботи.

Визначення параметрів чотириполюсника дослідним шляхом.

8.2 Основні теоретичні положення.

Приймачі електричної енергії підключаються до джерел живлення через лінії передач, трансформатори, стабілізатори та інші проміжні кола, які у загальному вигляді мають два вхідних і два вихідних затискача. Звичайно до вхідних затискачів підключається джерело живлення, а до вихідних – навантаження. Електричне коло довільної конфігурації, що не містить джерел живлення і має два вхідних (1-1') та два вихідних (2-2') затискачів, називається пасивним чотириполюсником (рис. 8.2.1):

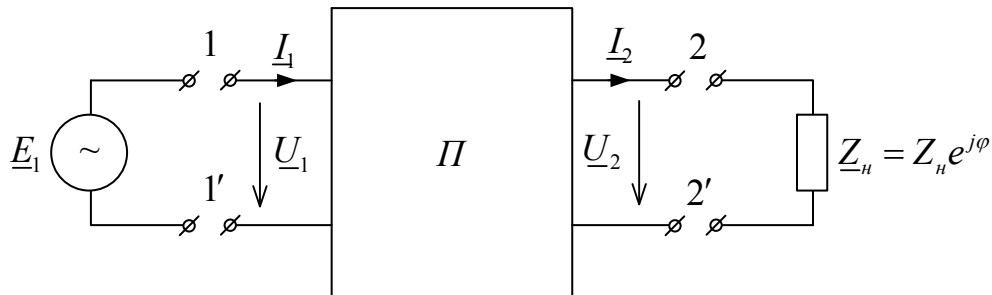


Рис. 8.2.1

Якщо поміняти місцями призначення джерела та приймача енергії струми джерела і приймача не зміняться, то такий чотириполюсник називається симетричним.

Головними рівняннями пасивного лінійного чотириполюсника, що зв'язують напругу \underline{U}_1 і струм \underline{I}_1 на вході з напругою \underline{U}_2 і струмом \underline{I}_2 на виході, є рівняння:

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \underline{U}_2 + \underline{B} \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C} \underline{U}_2 + \underline{D} \underline{I}_2$$

Величини \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} і \underline{D} називаються коефіцієнтами чотириполюсника і зв'язані між собою співвідношенням:

$$\underline{A} \underline{D} - \underline{B} \underline{C} = 1$$

Лабораторна робота містить в собі дві частини:

- визначення коефіцієнтів чотириполюсника на основі здобутих із дослідних даних параметрів Т-образної або Π-образної схеми заміщення;
- визначення коефіцієнтів чотириполюсника на основі параметрів схем заміщення, здобутих із дослідів холостого ходу (х.х.) і короткого замикання (к.з.).

Т-образна схема заміщення (рис. 8.2.2)

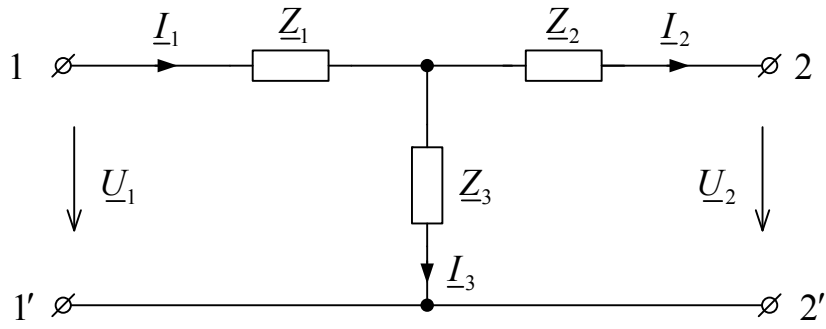


Рис. 8.2.2

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} \text{ (безр.);}$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \text{ (Ом);}$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_3} \text{ (Сим);}$$

$$\underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \text{ (безр.).}$$

П-подібна схема заміщення (рис. 8.2.3):

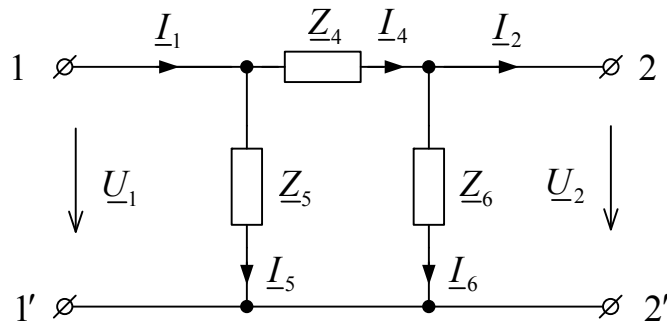


Рис. 8.3.3

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_6}; \quad \underline{B} = \underline{Z}_4;$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_5 + \underline{Z}_6}{\underline{Z}_5 \cdot \underline{Z}_6};$$

$$\underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_4}{\underline{Z}_5}.$$

Коефіцієнти чотирьохполосника можна визначити із дослідів х.х. та к.з. за формулами:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1\kappa}}{(\underline{Z}_{1x} - \underline{Z}_{1\kappa}) \cdot \underline{Z}_{2\kappa}}}; \quad \underline{B} = \underline{A} \cdot \underline{Z}_{2\kappa};$$

$$\underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1x}}; \quad \underline{D} = \frac{\underline{B}}{\underline{Z}_{1\kappa}}; \quad \underline{Z}_{1x} = \frac{U_{1x}}{I_{1x}};$$

$$Z_{1к} = U_{1к} / I_{1к}; \quad Z_{2к} = U_{2к} / I_{2к};$$

$$\varphi_{1x} = \arccos \frac{P_{1x}}{U_{1x} \cdot I_{1x}}; \quad \varphi_{1к} = \arccos \frac{P_{1к}}{U_{1к} \cdot I_{1к}}; \quad \varphi_{2к} = \arccos \frac{P_{2к}}{U_{2к} \cdot I_{2к}};$$

$$\underline{Z}_{1x} = Z_{1x} e^{j\varphi_{1x}}; \quad \underline{Z}_{1к} = Z_{1к} \cdot e^{j\varphi_{1к}}; \quad \underline{Z}_{2к} = Z_{2к} \cdot e^{j\varphi_{2к}};$$

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1$$

8.3 Потрібне обладнання.

8.3.1 Автотрансформатор	1 шт.;
8.3.2 Вольтметр	2 шт.;
8.3.3 Амперметр	2 шт.;
8.3.4 Ватметр	1 шт.;
8.3.4 Лабораторний стенд	1 шт.;
8.3.5 Комплект з'єднувальних проводів.	

8.4 Порядок виконання роботи.

- 8.4.1. Зібрати схему, приведену на рис. 8.4.1. Після перевірки схеми викладачем включити живлення.
- 8.4.2. Для визначення комплексних опорів схеми \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 і \underline{Z}_3 провести досліди.
- 8.4.3. Щоб визначити параметри котушки \underline{Z}_1 треба закортити котушку \underline{Z}_3 і виміряти U_1 , I_1 , P_1 ;
- 8.4.4. Для визначення параметрів котушки \underline{Z}_2 треба закортити \underline{Z}_1 , відключити котушку \underline{Z}_3 , замкнути ключ "К" і виміряти U_1 , I_1 , P_1 .
- 8.4.5. При визначенні параметрів котушки \underline{Z}_3 замикають котушку \underline{Z}_1 і відключають котушку \underline{Z}_2 і виміряють U_1 , I_1 , P_1 .

Результати вимірів записати у таблицю 8.4.1

Таблиця 8.4.1

№ п/п	Виміряно				Розраховано			
	Параметри	$U_1(B)$	$I_1(A)$	$P_1 (Вт)$	$Z = U / I (Ом)$	$R = P / I^2 (Ом)$	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} (Ом)$	$\underline{Z} = R + jX (Ом)$
1.	Z_1							
2.	Z_2							
3.	Z_3							

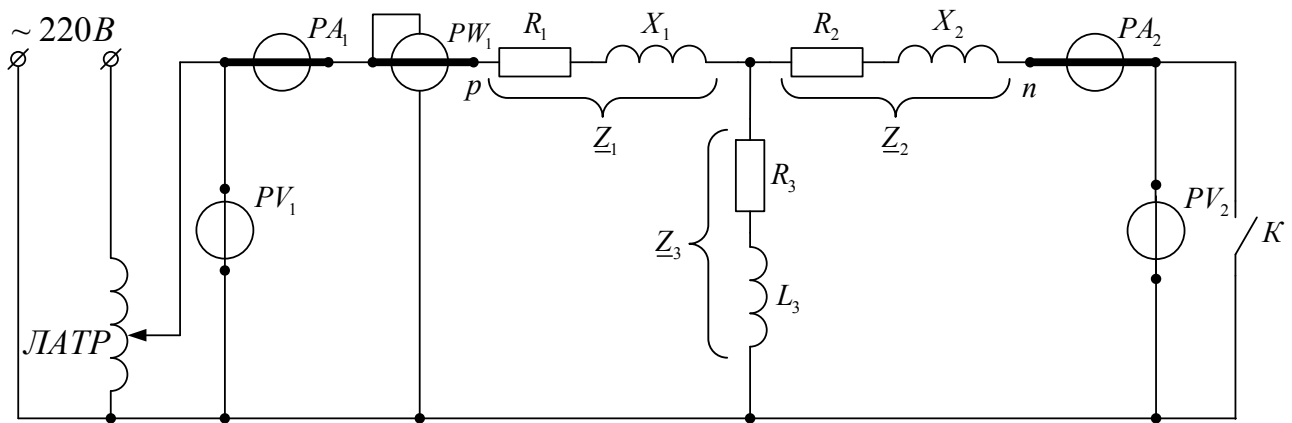


Рис. 8.4.1

8.4.3. Користуючись даними таблиці 8.4.1 провести розрахунок коефіцієнтів чотириполусника.

$$\underline{A} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} = 1 + \frac{R_1 + jX_1}{R_3 + jX_3}; \quad \underline{C} = \frac{1}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{R_3 + jX_3};$$

$$\underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 + \frac{(R_1 + jX_1) \cdot (R_2 + jX_2)}{R_3 + jX_3};$$

$$\underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = 1 + \frac{R_2 + jX_2}{R_3 + jX_3}; \quad \underline{AD} - \underline{BC} = 1$$

3.4.4. Провести досліди х.х. і к.з. при напрузі 50-60 В для прямого та зворотного живлення схеми. Для оберненого живлення амперметр PA_1 підключити до точки “n”, амперметр PA_2 до точки “p”.

Результати вимірів записати в таблицю 8.4.2 і 8.4.3

Таблиця 8.4.2

Пряме живлення схеми									
	Холостий хід				Коротке замикання				
U_{1X} В	I_{1X} А	P_{1X} Вт	U_{2X} В	I_{2X} А	U_{1K} В	I_{1K} А	P_{1K} Вт	I_{2K} А	U_{2K} В

Таблиця 8.4.3

Зворотне живлення схеми									
	Холостий хід				Коротке замикання				
U_{1X} В	I_{1X} А	P_{1X} Вт	U_{2X} В	I_{2X} А	U_{1K} В	I_{1K} А	P_{1K} Вт	I_{2K} А	U_{2K} В

Примітки:

- а) при прямому і оберненому живленні: холостий хід – ключ “К” розімкнутий; коротке замикання – ключ “К” замкнутий;
- б) при правильно знятих показниках у симетричних чотириполюсників повинні здійснюватися такі вимоги:

$$\text{х.х.} - I_{1X} = I_{2X}; \quad P_{1X} = P_{2X}; \quad U_{2X} = U_{1X};$$

$$\text{к.з.} - I_{1K} = I_{2K}; \quad P_{1K} = P_{2K}; \quad U_{2K} = U_{1K};$$

8.4.8 За даними таблиць 8.4.2 та 8.4.3 розраховуються коефіцієнти чотириполюсника.

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{Z_{1X} e^{j\varphi_{1X}} \cdot Z_{1K} e^{j\varphi_{1K}}}{(Z_{1X} e^{j\varphi_{1X}} - Z_{1K} e^{j\varphi_{1K}}) Z_{2K} e^{j\varphi_{2K}}}}$$

$$\underline{B} = A \cdot Z_{2K} e^{j\varphi_{2K}}; \quad \underline{C} = A / Z_{1X} e^{j\varphi_{1X}}; \quad \underline{D} = \underline{B} / Z_{1K} e^{j\varphi_{1K}}$$

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1$$

8.5. Питання до захисту роботи.

- 8.5.1. Якими схемами заміщується пасивний чотириполюсник?
- 8.5.2. Основні рівняння пасивного лінійного чотириполюсника?
- 8.5.3. Привести формули, що зв'язують коефіцієнти чотириполюсника і комплексні опори Т-образної схеми заміщення.
- 8.5.4. Привести формули, що зв'язують коефіцієнти чотириполюсника і комплексні опори П-образної схеми заміщення.
- 8.5.5. Як визначають коефіцієнти чотириполюсника за даними дослідів х.х. і к.з.?
- 8.5.6. Застосування чотириполюсника в практиці енергопостачання.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ТРИФАЗНІЙ СИСТЕМІ ЗІРКОЮ

9.1. Мета роботи

9.2. Основні теоретичні положення

Джерелом трифазної системи ЕРС є трифазний синхронний генератор, який містить нерухому частину – статор та обертову частину – ротор (рис. 9.2.1).

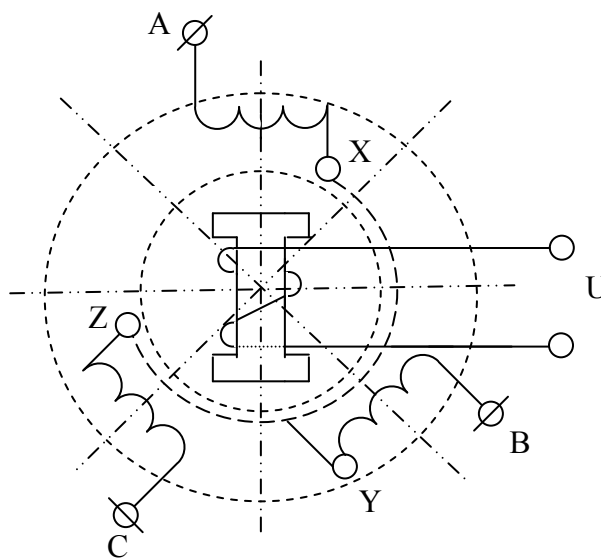


Рис. 9.2.1

На статорі змонтовані три обмотки /катушки/ А-Х, В-У, С-З, які зсунуті одна відносно другої на кути 120° .

Ротор також має свою обмотку, яка живиться від джерела постійного струму. Щоб мати трифазну систему ЕРС на зажимах А, В і С, ротор генератора необхідно обертати автономним двигуном з постійною кутовою швидкістю.

Якщо кінці статорних обмоток (Х, У, Z) та опорів навантажень фаз з'єднані відповідно в один вузол, то таке з'єднання називається "зіркою".

Трифазні системи можуть бути симетричними і несиметричними.

Якщо значення ЕРС в фазах А, В, С та кути зсуву між фазами однакові, то така система ЕРС називається симетричною.

Якщо комплексні опори фаз приймачів рівні за модулем і ідентичні за характером, то такі споживачі є симетричними.

У випадку, коли до симетричної системи ЕРС підключені симетричні споживачі, маємо трифазну симетричну систему.

Трифазні системи можуть бути три- і чотирьохпровідні.

На рис. 9.2.2 приведена трифазна чотирьохпровідна схема:

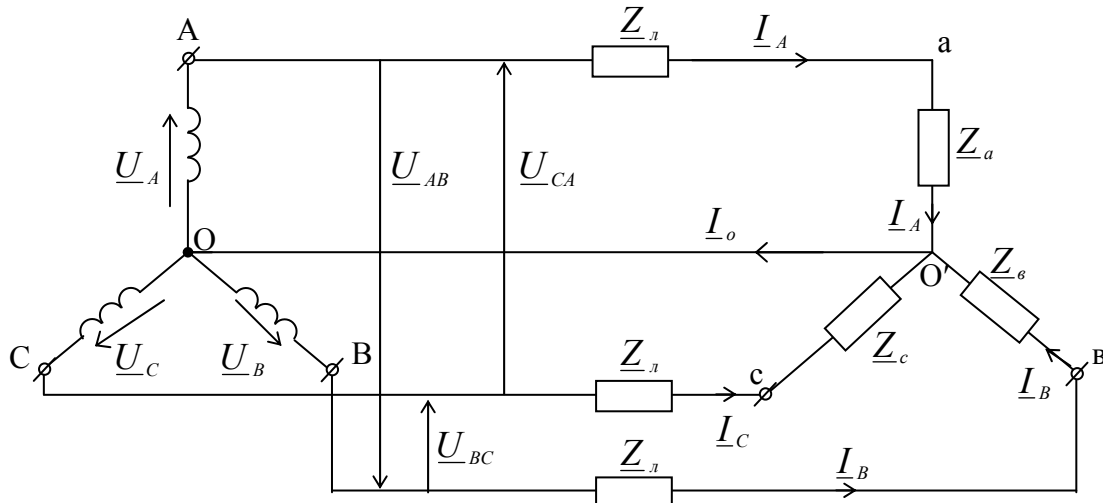


Рис. 9.2.2

Напруга між двома лінійними проводами називається лінійною, а напруга між лінійними та нульовим проводами (або нульовим вузлом генератора /приймача/) називається фазною напругою.

\underline{U}_{AB} , \underline{U}_{BC} , \underline{U}_{CA} – лінійні напруги генератора.

\underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C – фазні напруги генератора.

\underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c , \underline{U}_{av} , \underline{U}_{bv} , \underline{U}_{cv} – відповідно фазні та лінійні напруги приймача.

Миттєві значення симетричної системи ЕРС генератора јписуються рівняннями:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t + \psi); \\ e_B &= E_m \sin(\omega t + \psi - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + \psi - 240^\circ); \end{aligned}$$

Графічне зображення ЕРС генератора показано на рис.9.2.3.

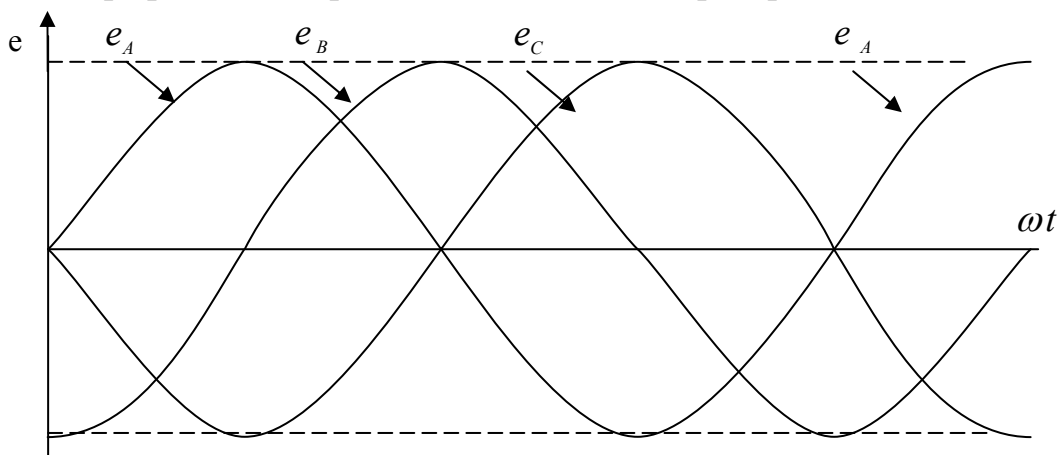


Рис. 9.2.3

Система комплексних значень ЕРС може бути записана у наступній

формі і представлена векторною діаграмою (рис. 9.2.4).

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= E e^{j\psi}; \\ \underline{E}_B &= E e^{j(\psi - 120^\circ)} = E e^{j(\psi + 240^\circ)}; \\ \underline{E}_C &= E e^{j(\psi + 120^\circ)} = E e^{j(\psi - 240^\circ)}\end{aligned}$$

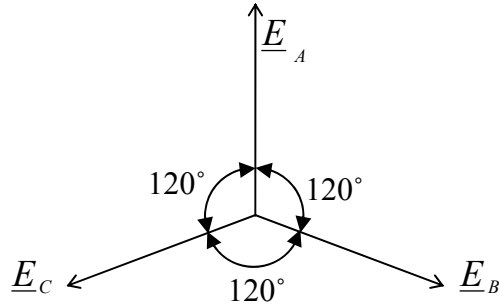


Рис. 9.2.4

У трифазній системі існують відношення між лінійними та фазними напругами:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Зв'язок між лінійними та фазними напругами для симетричної системи визначається формулами:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A \sqrt{3} e^{j30^\circ}, B; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B \sqrt{3} e^{j30^\circ}, B; \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C \sqrt{3} e^{j30^\circ}, B.\end{aligned}$$

Струм лінійний дорівнює струмові фазному: $\underline{I}_L = \underline{I}_\phi$.

Геометрична сума струмів у нульовому проводі дорівнює нулю.

$$\underline{I}_O = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

Тому симетричні трифазні системи можуть нормально працювати без нульового проводу.

Струми у фазах навантаження визначаються за законом Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_L}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_L}.$$

У несиметричному трифазному колі наявність нульового проводу обов'язкова, тому що нульовий провід знижує асиметрію фазних напруг, які розподіляються пропорційно величинам опорів у фазах навантаження. При цьому між нульовими точками генератора і приймача утворюється вузлова напруга (напруга зміщення нейтралі), що визначається формулами:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{O'O} &= \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_O}, \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_L}; \\ \underline{Y}_B &= \frac{1}{\underline{Z}_B + \underline{Z}_L}; \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C + \underline{Z}_L}; \quad \underline{Y}_O = \frac{1}{\underline{Z}_O}.\end{aligned}$$

Струми в лініях визначаються:

$$\underline{I}_A = (\underline{U}_A - \underline{U}_{o'o}) \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = (\underline{U}_B - \underline{U}_{o'o}) \underline{Y}_B;$$

$$\underline{I}_C = (\underline{U}_C - \underline{U}_{o'o}) \underline{Y}_C; \quad \underline{I}_O = \underline{U}_{o'o} \cdot \underline{Y}_O.$$

Діюче значення потужності трифазної системи при рівномірному навантаженні фаз визначається за формулами:

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

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

$$S = 3U_\phi I_\phi; \quad S = \sqrt{3} U_L I_L.$$

9.3. Потрібне обладнання

9.3.1. Лабораторний стенд.

9.3.2. Амперметр 1 шт.

9.3.3. Вольтметр 1 шт.

9.3.4. Комплект з'єднувальних проводів.

9.3.5. Трифазний трансформатор 220/60 В 1 шт.

9.4. Порядок виконання роботи

9.4.1. Зібрати схему, вказану на рис. 9.4.1. Після перевірки схеми викладачем включити живлення.

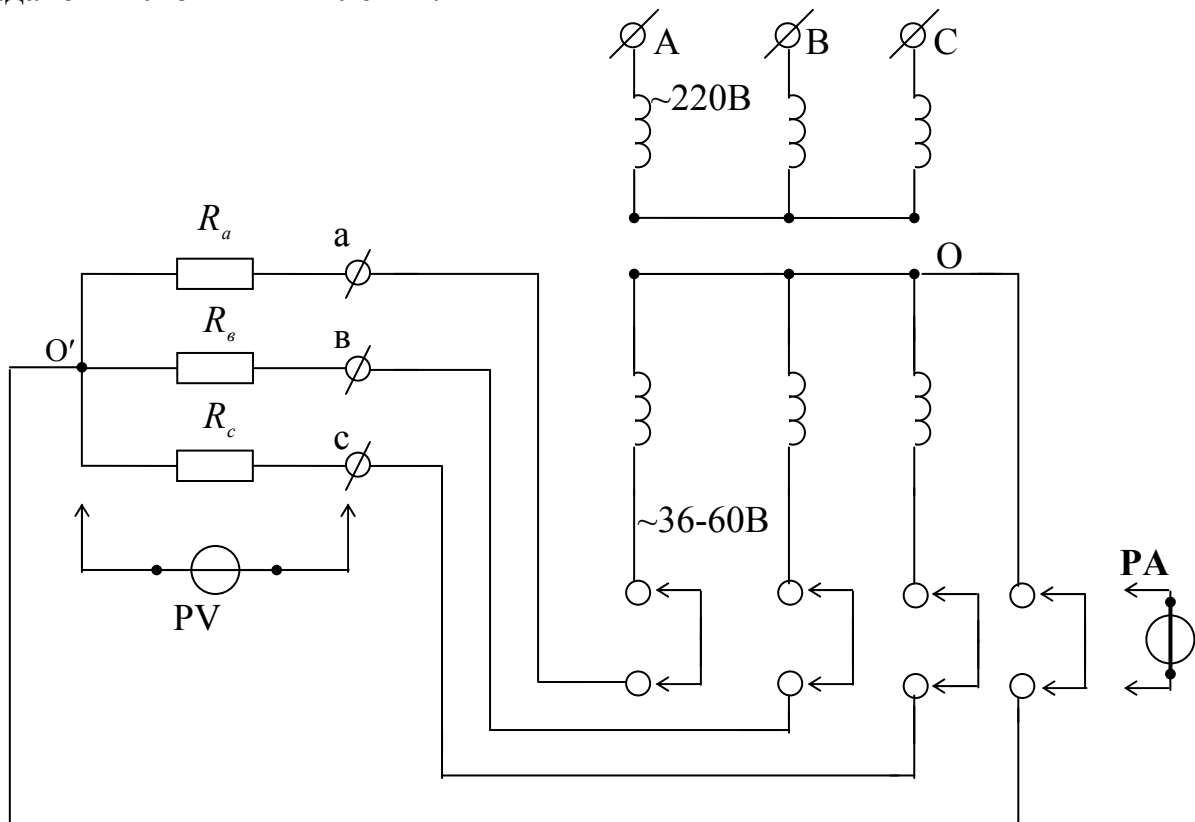


Рис. 9.4.1

4.4.2. При рівномірному навантаженні фаз виміряти фазні та лінійні напруги, фазні (лінійні) струми. Результати записати в таблицю 9.4.1.

Таблиця 9.4.1

№ пп	Режими роботи системи	U_a	U_b	U_c	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	I_a	I_b	I_c	I_o
1.	Рівномірне навантаження фаз										
2.	Нерівномірне навантаження фаз										
3.	Обрив фази										
4.	Нерівномірне навантаження без О-проводу										

9.4.3. За результатами таблиці 9.4.1 п.1 побудувати векторну діаграму (рис. 9.4.2), враховуючи, що $U_a = U_b = U_c = U_\phi$;

$$U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} = U_L \quad ; \quad I_a = I_b = I_c = I_\phi \quad ; \quad I_o = 0.$$

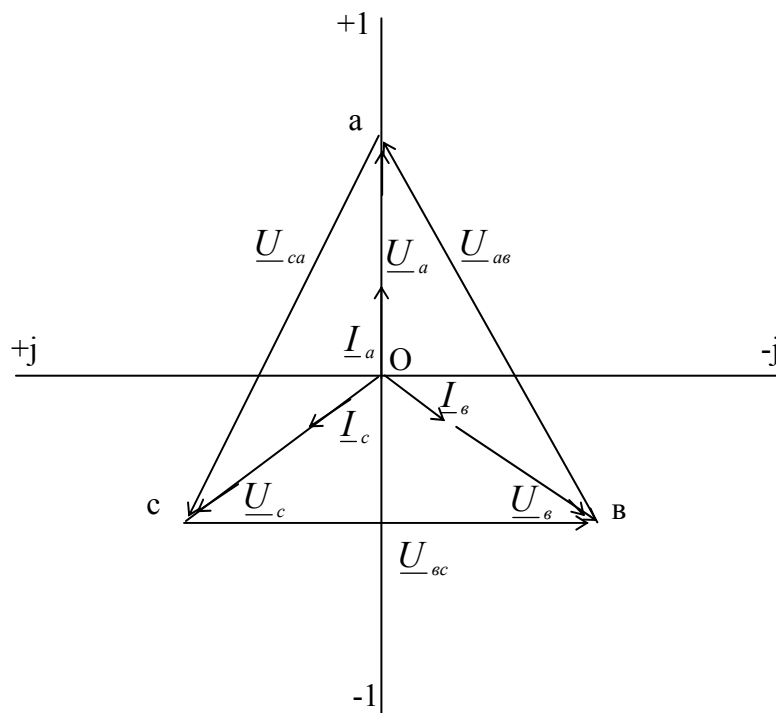


Рис. 9.4.2

9.4.4. Шляхом змінення кількості включених в фази резисторів утвердити нерівномірне навантаження. Виміряти фазні та лінійні напруги, фазні та нульовий струми. Результати записати в таблицю 9.4.1.

За результатами таблиці 9.4.1 п. 2 побудувати векторну діаграму (рис. 9.4.3), враховуючи, що значення напруг не змінились, а струми визначаються асиметрією навантажень. Так, наприклад, якщо опір фази "В" зменшити, то $I_a = I_c < I_B$.

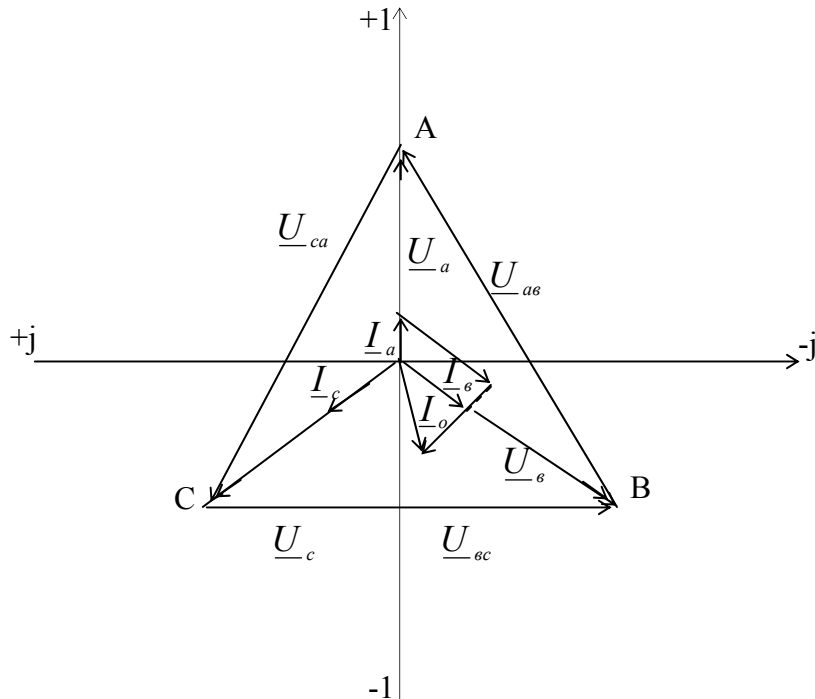


Рис. 9.4.3

9.4.5. В роз'ємній колодці (або на клеммах а, в, с) зробити обрив однієї із фаз навантаження і виконати ті ж виміри. Результати записати в таблицю 9.4.1.

Роздивимось, наприклад, випадок обриву фази "А" при симетрії навантажень в фазах "В" і "С". Схема перетворюється в однофазне коло з нульовим проводом, параметри у схемі приймають значення:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= 0 & \underline{U}_A &= 0 \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_C & \underline{U}_C &= \underline{U}_\phi \\ \underline{I}_O &= \underline{I}_B + \underline{I}_C & \underline{U}_B &= \underline{U}_\phi \end{aligned}$$

Векторна діаграма для цього випадку має вигляд (рис. 9.4.4):

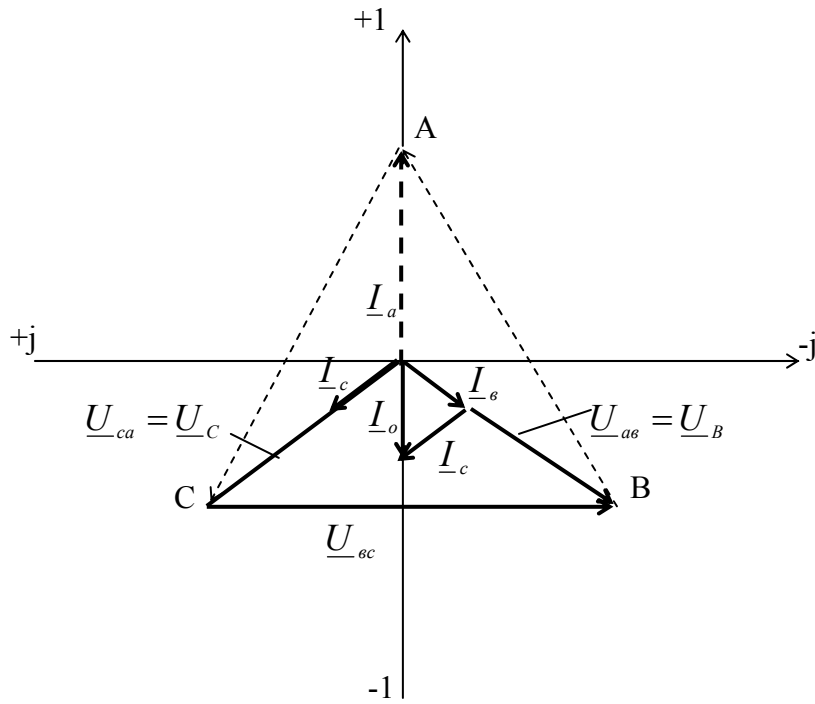


Рис. 9.4.4

9.4.6. Шляхом змінення кількості включених в фази резисторів утворити нерівномірне навантаження в схемі без нульового проводу. Дані вимірів записати в таблицю 9.4.1.

Векторна діаграма (рис. 9.4.5) для випадку нерівномірного навантаження в фазі "В" / $R_b < R_a = R_c$ / має вигляд:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_{BC} = \underline{U}_{CA} \\ \underline{U}_{AO'} &= \underline{U}_{CO'} > \underline{U}_{BO'} \\ \underline{I}_A &= \underline{I}_C < \underline{I}_B \end{aligned}$$

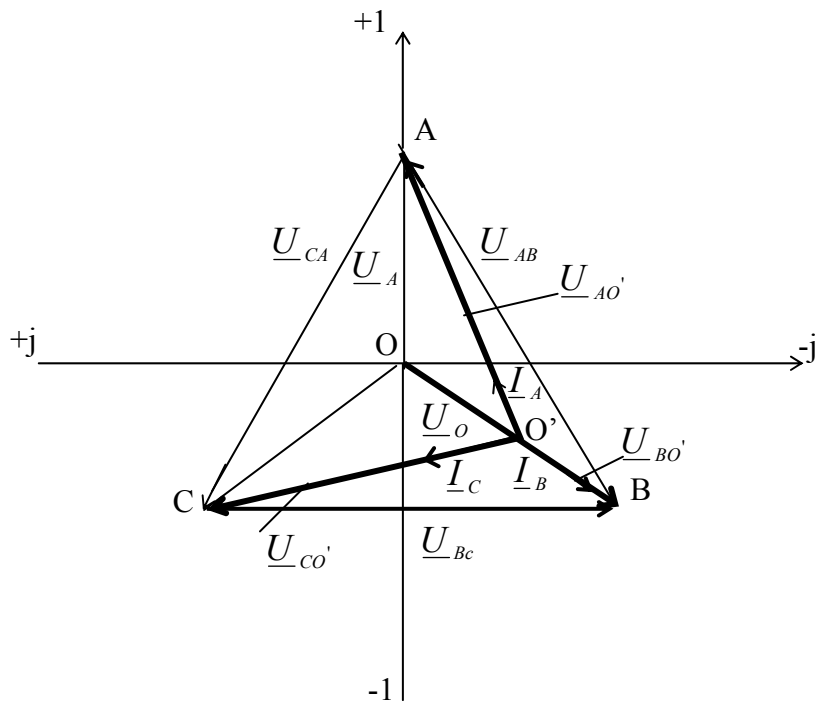


Рис. 9.4.5

9.5. Запитання до захисту роботи

- 9.5.1. Що називається трифазною системою ЕРС?
- 9.5.2. Чим відрізняється симетрична система ЕРС від несиметричної?
- 9.5.3. Відношення між лінійними та фазними напругами і струмами.
- 9.5.4. Розрахунок вузлової напруги.
- 9.5.5. Розрахунок струмів в фазах навантаження при симетричному і несиметричному приймачах.
- 9.5.6. Формули активної, реактивної і повної потужності при з'єднанні фаз в "зірку".
- 9.5.7. В якому разі можлива нормальна робота схеми без нульового проводу?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ТРИФАЗНІЙ СИСТЕМІ ТРИКУТНИКОМ

10.1. Мета роботи

Дослідження режимів роботи трифазного кола при з'єднанні приймачів енергії трикутником.

10.2. Основні теоретичні положення.

Якщо приймач трифазного струму підключити до джерела так, щоб кінець першого опору з'єднувався з початком другого опору, (точка в), кінець другого опору з'єднувався з початком третього опору (точка с), а кінець третього опору – з початком першого опору (точка а), і до точок а, в, с під'єднати проводи до джерела, то будемо мати з'єднання приймачів трикутником (рис. 10.2.1).

Струми в лінійних проводах називаються лінійними $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$, струми в фазах навантаження називаються $\underline{I}_{av}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ – фазними.

Для симетричного навантаження мають місце співвідношення

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{av} \sqrt{3} e^{-j30^\circ};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} \sqrt{3} e^{-j30^\circ};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} \sqrt{3} e^{-j30^\circ}.$$

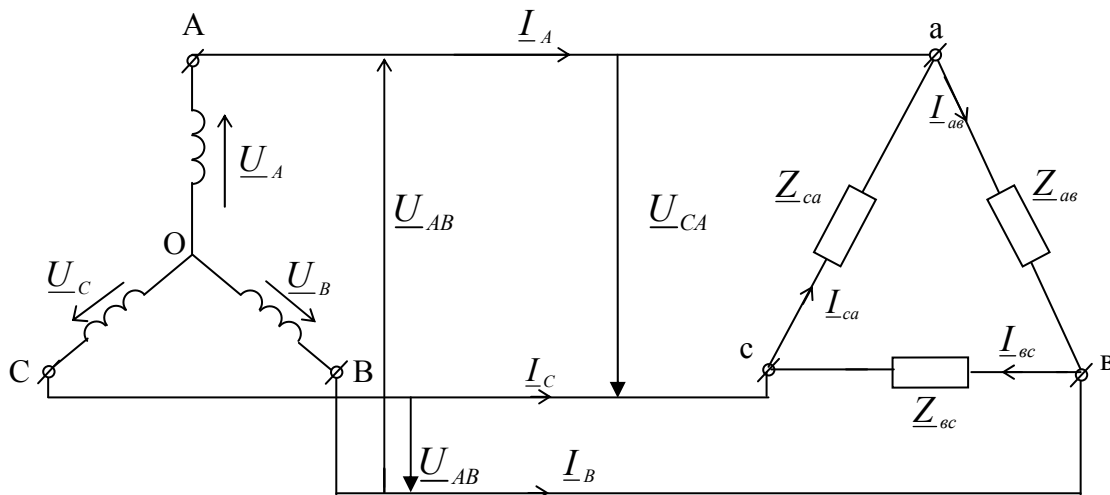


Рис. 10.2.1

При активно-індуктивному навантаженні в фазах приймача, з'єданого в трикутник, фазні струми розраховуються за формулами:

$$\underline{I}_{av} = \frac{\underline{U}_{AB}}{R + j\omega L} = \frac{U_{AB}}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I_{av} e^{j\psi_i};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{R + j\omega L} = \frac{U_{BC}}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I_{bc} e^{j\psi_i};$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{R + j\omega L} = \frac{U_{CA}}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I_{ca} e^{j\psi_i}.$$

Векторна діаграма при активно індуктивному навантаженні в фазах має вигляд (рис. 10.2.2).

У випадку, коли в фази трикутника включені різні за значенням і (або) характером опори, то такий приймач називається несиметричним.

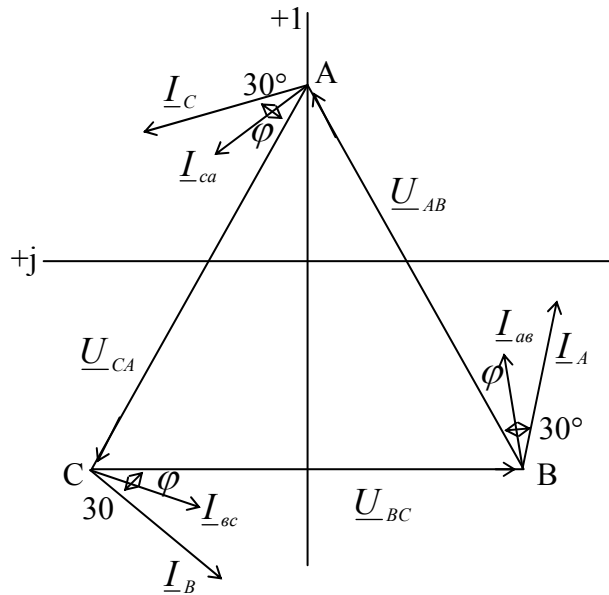


Рис. 10.2.2

При цьому лінійні напруги дорівнюють фазним $\underline{U}_{Л} = \underline{U}_{\phi}$, а співвідношення між лінійними та фазними струмами визначаються як:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{aB} - \underline{I}_{cA},$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{aB},$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{cA} - \underline{I}_{bc}.$$

У випадку несиметричного активно-індуктивного навантаження в фазах трикутника струми в фазах розраховуються:

$$\underline{I}_{aB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{R_{aB} + j\omega L_{aB}} = \frac{U_{AB}}{Z_{aB}} e^{j(\psi_u - \varphi_1)} = I_{aB} e^{j\psi_{aB}};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{R_{bc} + j\omega L_{bc}} = \frac{U_{BC}}{Z_{bc}} e^{j(\psi_u - \varphi_2)} = I_{bc} e^{j\psi_{bc}};$$

$$\underline{I}_{cA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{R_{cA} + j\omega L_{cA}} = \frac{U_{CA}}{Z_{cA}} e^{j(\psi_u - \varphi_3)} = I_{cA} e^{j\psi_{cA}}.$$

Векторна діаграма буде мати вигляд, рис. 10.2.3.

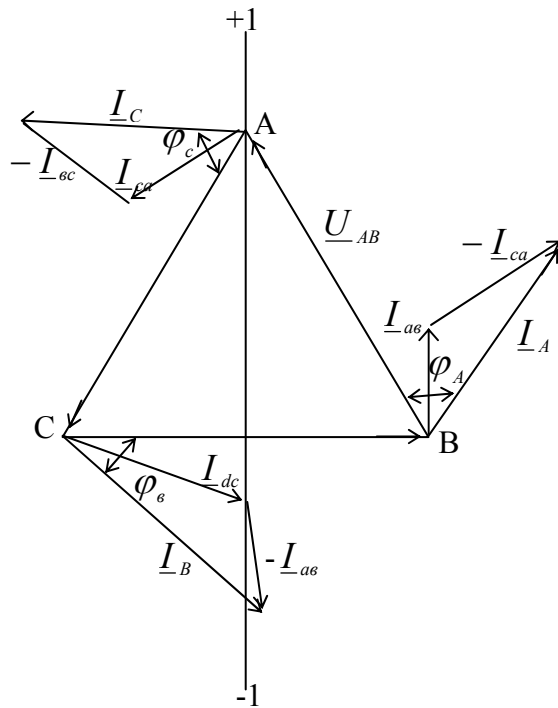


Рис. 10.2.3

При симетричному активному характері навантаження фаз фазні струми за модулем рівні і за фазою співпадають з вектором напруг, лінійні струми також рівні за модулем і відстають від фазних струмів на кути 30° .

У випадку несиметричного навантаження фаз активним опорами фазні струми набувають за модулем різні значення і співпадають з векторами напруг, лінійні струми також будуть мати різні величини і відставати від фазних струмів на відповідні кути.

10.3. Необхідне обладнання

10.3.1. Лабораторний стенд	1 шт.
10.3.2. Амперметр	4 шт.
10.3.3. Вольтметр	1 шт.
10.3.4. Комплект з'єднувальних проводів.	

10.4. Порядок виконання роботи

- 10.4.1. Зібрати схему відповідно рис. 10.4.1.
- 10.4.2. Після перевірки схеми викладачем включити живлення.
- 10.4.3. При рівномірному активному навантаженні фаз виміряти фазні та лінійні струми, лінійні напруги. Результати записати в таблицю 10.4.1.

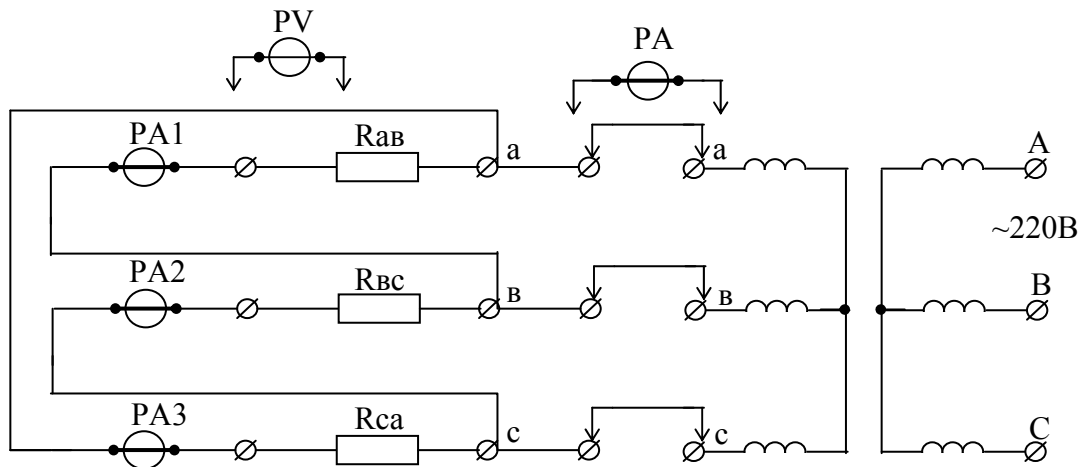


Рис. 10.4.1

Таблиця 10.4.1

№ п.п.	Режими роботи схеми	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}	I_{ab}	I_{bc}	I_{ca}	I_A	I_B	I_C
1.	Рівномірне навантаження фаз									
2.	Нерівномірне навантаження фаз									
3.	Обрив фазного проводу									

У випадку рівномірного активного навантаження фаз $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$, $I_A = I_B = I_C$.

Векторна діаграма (рис. 10.4.2) має вигляд:

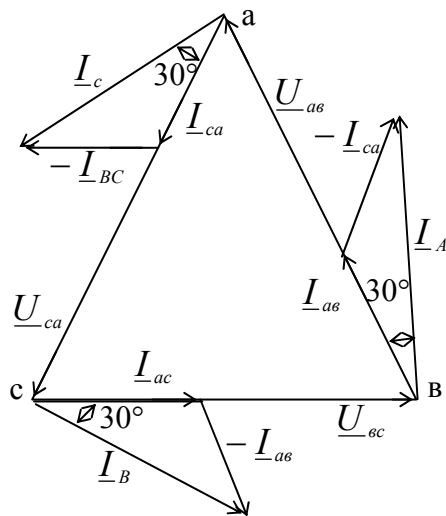


Рис. 10.4.2

10.4.4. Утворити нерівномірне навантаження фаз, підключив резистори більшого (меншого) опору, виконати ті ж вимірювання, результати записати в таблицю 10.4.1.

При нерівномірному активному навантаженні, коли $R_{av} \neq R_{bc} \neq R_{ca}$, фазні та лінійні струми також приймають різні значення, тобто $I_{av} \neq I_{bc} \neq I_{ca}$, $I_A \neq I_B \neq I_C$.

Векторна діаграма (рис. 10.4.3) має вигляд:

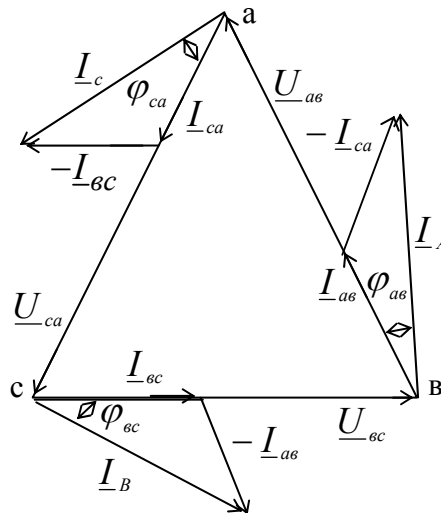


Рис. 10.4.3

10.4.5. При рівномірному навантаженні обірвати один з фазних проводів і виконати ті ж вимірювання. Результати записати в таблицю 10.4.1.

При обриві одного з фазних проводів схема перетворюється в послідовне з'єднання двох опорів з середньою точкою.

Розірвемо, наприклад, фазний провід опору R_{av} . При цьому значення лінійних напруг не змінюються, тобто $U_{av} = U_{bc} = U_{ca} = U_{л}$.

Струми розподіляться наступним чином:

$$\begin{aligned} I_{av} &= 0, \\ I_A &= I_{ab} - I_{ca} = -I_{ca}, \\ I_B &= I_{bc} - I_{ab} = I_{bc}, \\ I_C &= I_{ca} - I_{bc}. \end{aligned}$$

Отже, в схемі будуть протікати два фазні струми, тобто один фазний струм дорівнює нулю.

Векторна діаграма цього випадку має вигляд (рис. 10.4.4).

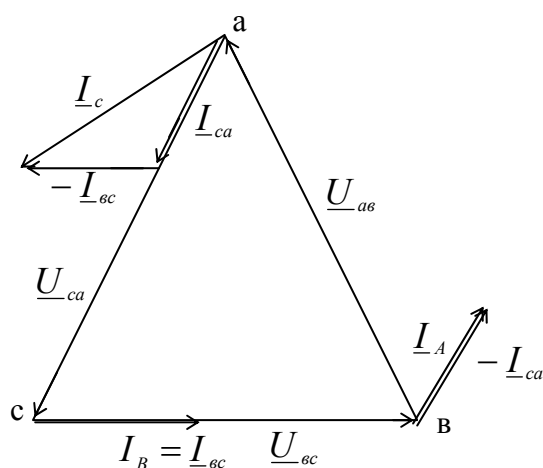


Рис. 10.4.4

10.4.6. За даними таблиці 10.4.1 побудувати векторні діаграми для розглянутих режимів роботи схеми.

10.5. Питання до захисту роботи

- 10.5.1. Що називається з'єднанням навантаження трикутником?
- 10.5.2. Чим відрізняються схеми симетричного і несиметричного трикутників?
- 10.5.3. Записати співвідношення між лінійними та фазними струмами, лінійними та фазними напругами в схемах симетричних і несиметричних трикутників.
- 10.5.4. Привести розрахунок фазних та лінійних струмів симетричних і несиметричних навантажень, з'єднаних трикутником.
- 10.5.5. Розглянути побудову векторних діаграм струмів і напруг активного та активно-індуктивного симетричного і несиметричного навантажень, з'єднаних трикутником.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З R-L ТА R-C ЕЛЕМЕНТАМИ ПРИ ВМИКАННІ НА ПОСТІЙНУ НАПРУГУ

11.1. Мета роботи

Ознайомитись на практиці з перехідними процесами, які виникають в електричних колах з R-L та R-C елементами при вмиканні їх на постійну напругу. Визначити закономірність зміни струмів у колах та напруги на його елементах.

11.2. Основні теоретичні положення

Перехідним (комутаційним) називають процес переходу електричного колу від одного сталого режиму до іншого. Перехідні процеси виникають у електричних колах при підключенні чи відключенні зовнішніх ЕРС (періодичних чи постійних), а також при будь-якій зміні параметрів елементів кола. Ці процеси здійснюються дуже швидко і закінчуються за долі секунди, але струми та напруги у колах в цей проміжок часу досягають значень більших ніж при нормальних сталих режимах, що може привести до пошкодження окремих елементів кола.

При аналізі перехідних процесів використовують два закони комутації:

Перший – струм через індуктивність безпосередньо до комутації $i(o_-)$ дорівнює струму через цю саму індуктивність безпосередньо після комутації $i(o_+)$, тобто струм через індуктивність стрибком змінитися не може, але напруга на індуктивності може змінитися стрибком.

$$i(o_-) = i(o_+)$$

Другий - напруга на ємності безпосередньо до комутації $u_C(o_-)$ дорівнює напрузі на ній безпосередньо після комутації $u_C(o_+)$

$$u_C(o_-) = u_C(o_+),$$

тобто напруга на ємності стрибком змінитися не може, але струм, що тече через ємність змінюється стрибком.

Електричне коло з R – L (рис. 11.3.1) при вмиканні на постійну напругу описується диференціальним рівнянням, яке складається для після комутаційної схеми:

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} = U ;$$

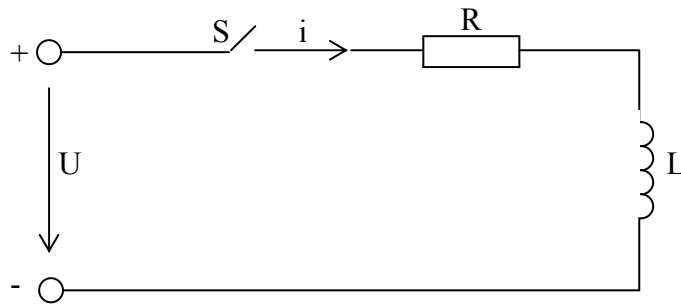


Рис. 11.3.1

Рішення цього рівняння шукаємо у вигляді:

$$i = i_{np} + i_{віль};$$

де i – повний струм, який дійсно має місце у схемі, це реально існуючий струм, який вимірюється і зміну якого за часом можна бачити на екрані осцилографа

i_{np} – примушене (стале) значення струму у колі.

$$i_{np} = \frac{U}{R};$$

$i_{віль}$ – вільна (згасаюча) складова струму, яка обумовлена електромагнітними процесами, які виникають у колі при відсутності зовнішніх джерел енергії.

$$i_{віль} = -\frac{U}{R}e^{-t/\tau}$$

Примушені та вільні складові струмів та напруг мають допоміжну роль, вони є тими розрахунковими компонентами, сума яких дає дійсне значення струмів та напруг, які існують у колі за час перехідного процесу.

Повні струми та напруги у колі при комутаційному процесі змінюються згідно законів:

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-t/\tau});$$

$$u_R = U(1 - e^{-t/\tau});$$

$$u_L = Ue^{-t/\tau}$$

$\tau = \frac{L}{R}$ – постійна часу кола, яка вимірюється в секундах.

Графічна залежність перехідного струму та напруги в $R-L$ колі зображена на рис. 11.3.2.

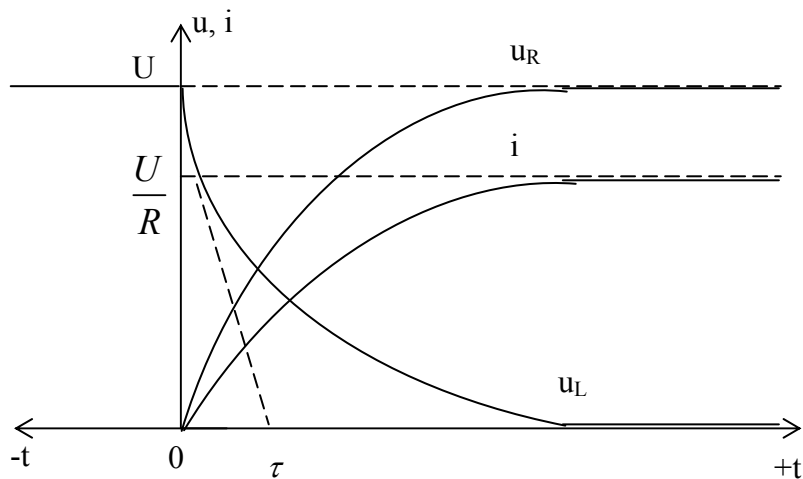


Рис. 11.3.2

Перехідний процес практично закінчується за час $3-5\tau$.

Електричне коло з R-C (рис. 11.3.3) при вмиканні на постійну напругу описується диференціальним рівнянням

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U$$

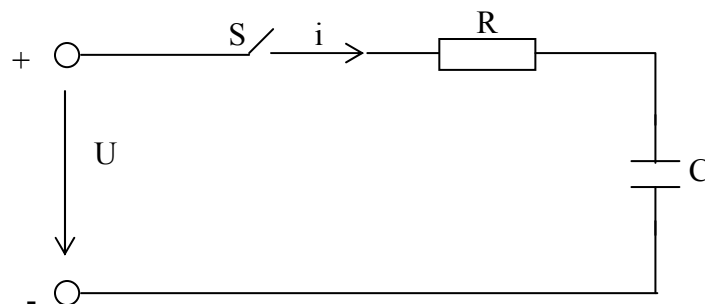


Рис. 11.3.3

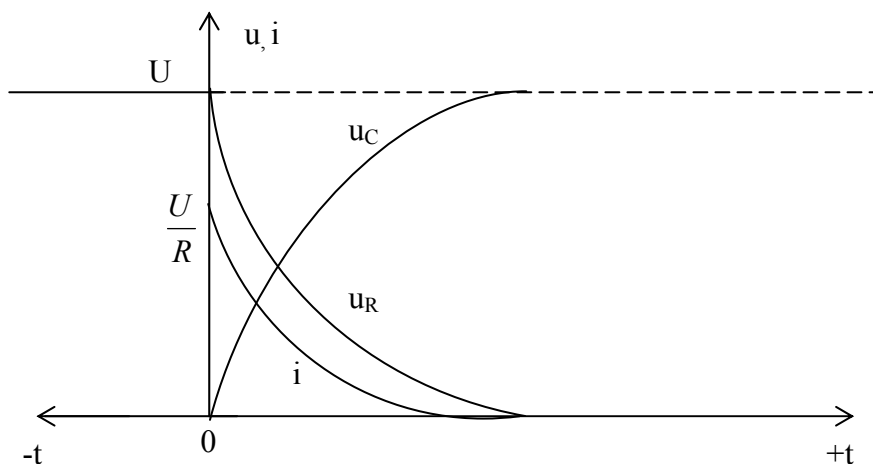
Повні струми та напруги у колі при комутаційному процесі змінюються згідно законів:

$$i_C = \frac{U}{R} e^{-t/\tau},$$

$$u_R = U e^{-t/\tau},$$

$$u_C = U (1 - e^{-t/\tau}).$$

Графічна залежність перехідного струму та напруги в R-C колі зображена на рис. 1.3.4.



Напруга на ємності збільшується поступово, відбувається заряд конденсатора, який буде тим повільніший, чим більша буде стала часу кола τ .

З енергетичної точки зору процес вмикання кола $R-C$ на постійну напругу цікавий тим, що при будь яких значеннях R та C половина енергії, яка надходить від джерела живлення за період комутаційного процесу перейде у тепло, а друга половина запасасться у електричному колі конденсатора.

Необхідно звернути увагу на аналогію у зміні струму в колі $R-L$ та напруги u_C у колі $R-C$.

11.3. Необхідне обладнання

11.2.1. Лабораторна установка:

- котушка індуктивності;
- конденсатори;
- опори;
- поляризоване реле типу РП-5.

11.2.2. Універсальне джерело живлення:

- змінної напруги $0 \div 30$ В;
- постійної напруги $0 \div 15$ В.

11.2.3. Електронний осцилограф.

11.2.4. Комплект з'єднуючих проводів.

11.4. Порядок виконання роботи.

11.4.1. Зібрати електричну схему (рис. 11.4.1).

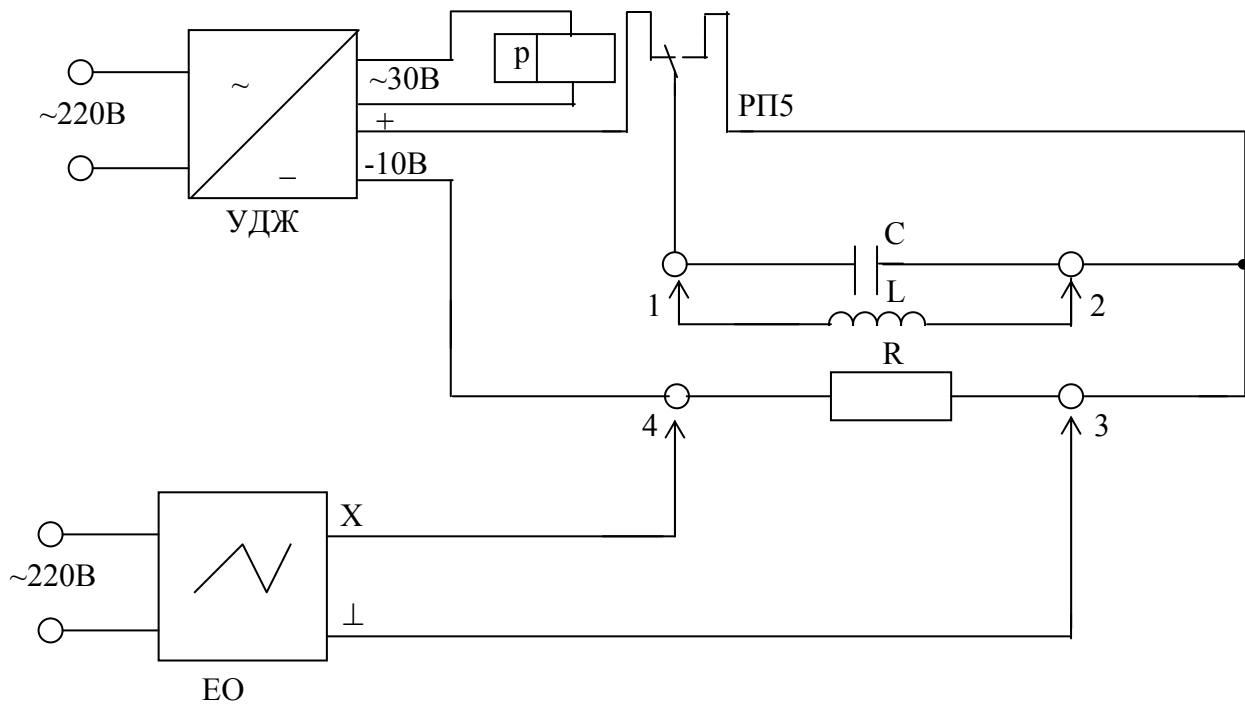


Рис. 11.4.1

- 11.4.2. Після перевірки зібраної схеми викладачем ввімкнути змінну напругу 220 В, при цьому подається напруга на універсальне джерело живлення та на осцилограф.
- 11.4.3. Встановити на джерелі живлення напругу 10 В для живлення $R - C$ та $R - L$ кіл.
- 11.4.4. Підключити послідовно вхід осцилографа до точок 1-2 та 3-4 та зняти осцилограми напруги на конденсаторі та активному опорі.
- 11.4.5. Замість конденсатора підключити індуктивну котушку.
- 11.4.6. Послідовно підключаючи вхід осцилографа до точок 1-2 та 3-4 зняти осцилограми зміни струму, який тече через котушку, та напруги на ній та активному опорі R .
- 11.4.7. Розрахувати та побудувати графіки перехідного струму для кіл $R - C$ та $R - L$ для різних значень τ . Параметри елементів, які необхідні для розрахунку, приведені на стенді (або видаються викладачем).

11.5. Питання до здачі роботи

- 11.5.1. Який процес у електричному колі зветься перехідним, та чому він виникає?
- 11.5.2. Яка тривалість перехідного процесу?
- 11.5.3. Початкові умови при перехідних процесах.
- 11.5.4. Сформулюйте закони комутації.
- 11.5.5. Поясніть осцилограми напруг та струмів.
- 11.5.6. Вивести формули для визначення перехідних струмів та напруг.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ З R-L-C ЕЛЕМЕНТАМИ ПРИ ВМИКАННІ НА ПОСТІЙНУ НАПРУГУ

12.1 Мета роботи

Вивчити перехідні процеси, які виникають в електричних колах з послідовним з'єднанням R-L-C елементів при зміні їх параметрів, при вмиканні на постійну напругу.

Визначити закономірність зміни струмів у колі при різних режимах роботи.

12.2 Основні теоретичні положення

Розглянемо послідовне коло з активним опором, індуктивністю та ємністю, підключене до джерела напруги.

Електричне коло (рис. 12.2.1.) при вмиканні на постійну напругу описується диференціальним рівнянням, яке складається для після комутаційної схеми за другим законом Кірхгофа,

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = U,$$

де i – струм перехідного режиму, який далі називатимемо перехідним струмом або просто струмом.

У сталому режимі струм у колі (рис. 12.2.1) $i_{np} = 0$, а напруга на ємності $u_{C np} = U$, але у процесі комутації (при зміні параметрів кола R-L-C) характер перехідного процесу змінюється. Визначити характер перехідного процесу можливо знаючи корні характеристичного рівняння.

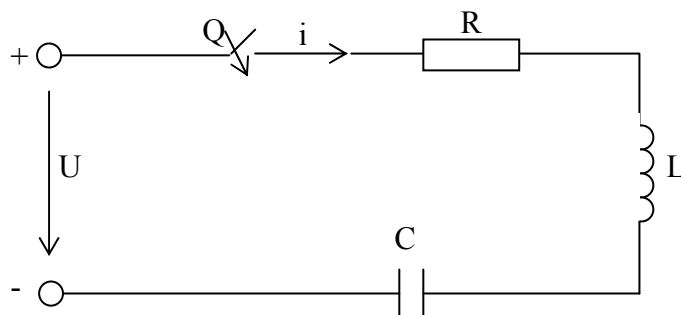


Рис. 12.2.1

Для даного кола характеристичне рівняння має такий вигляд:

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0$$

рішення якого визначає значення його коренів

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

Характер перехідного процесу буде залежить від співвідношення між параметрами R-L-C тобто від того якими будуть корені характеристичного рівняння – дійсні чи уявні (комплексні). Можливі три випадки:

1. $R > 2\sqrt{L/C}$ – корені характеристичного рівняння дійсні, нерівні, негативні;
2. $R = 2\sqrt{L/C}$ – корені характеристичного рівняння дійсні, негативні, рівні;
3. $R < 2\sqrt{L/C}$ – корені характеристичного рівняння комплексні спряжені.

Розглянемо який буде характер перехідного процесу у кожному з цих випадків.

1. $R > 2\sqrt{L/C}$

Повні струми та напруги у перехідному режимі будуть визначатися такими виразами:

$$i = \frac{U}{L(p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t})$$

$$u_C = \frac{U}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t})$$

$$u_L = U - \frac{U}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t})$$

Графічні залежності струмів та напруг у цьому випадку приведені на рис. 12.2.2.

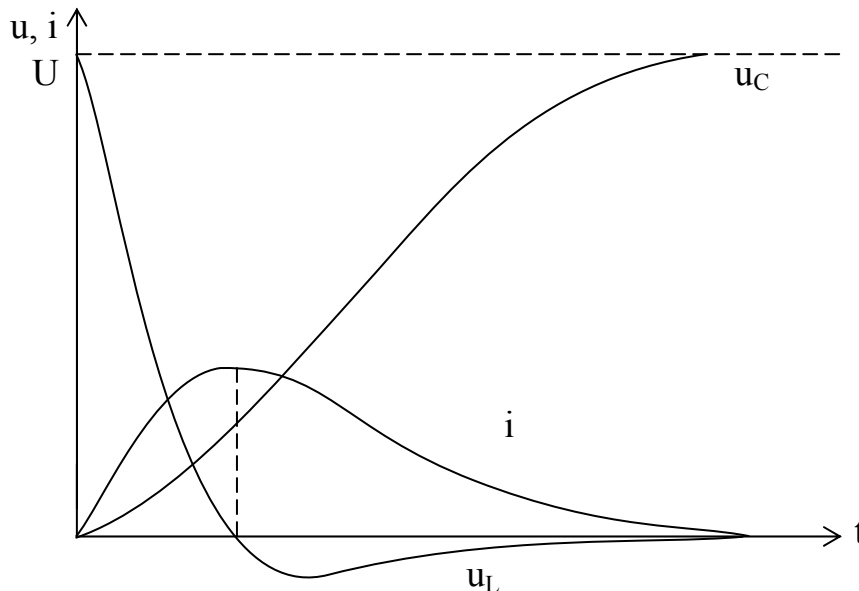


Рис. 12.2.2

Напруга на ємності повільно збільшується від нуля до напруги джерела живлення U , причому точка перелому кривої u_C існує лише у той час, коли струм досягає свого максимального значення. Напруга на індуктивності

спочатку зменшується потім проходить через нуль у той час коли струм досягає свого максимального значення, а далі зменшується до нуля.

Складові струму змінюються по експоненційному закону, але струм не змінює знака. Такий заряд зветься аперіодичним (тобто не має місця перезаряд конденсатору).

$$2. R = 2\sqrt{L/C}$$

Повні струми та напруги у цьому випадку мають вигляд:

$$i = \frac{U}{L} t e^{Pt}; \quad u_L = U e^{Pt} (1 + pt); \quad u_C = U - U(1 - pt) e^{Pt}$$

У цьому випадку має місце граничний випадок аперіодичного заряду конденсатору. Найменше значення активного опору, коли процес ще є аперіодичним, зветься критичним опором.

3. $R < 2\sqrt{L/C}$ – це випадок періодичного (тобто заряду-розряду конденсатора) характеру перехідного процесу. Повні струми та напруги у цьому випадку мають вигляд:

$$i = \frac{U}{\omega_3 L} e^{-\delta t} \sin \omega_3 t$$

$$u_L = U \frac{\omega_0}{\omega_3} e^{-\delta t} \cos(\omega_3 t + \beta)$$

$$u_C = U - U \frac{\omega_0}{\omega_3} e^{-\delta t} \cos(\omega_3 t - \beta)$$

де ω_3 – частота згасаючих коливань у контурі;

$$\omega_3 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

ω_0 – власна резонансна частота контуру;

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$\delta = \frac{R}{2L}$ – декремент згасання;

$$\beta = \arctg \frac{\delta}{\omega_3} \text{ – кут зсуву фаз між } i(t) \text{ та } u_C(t).$$

Ці залежності графічно зображені на рис. 12.2.3.

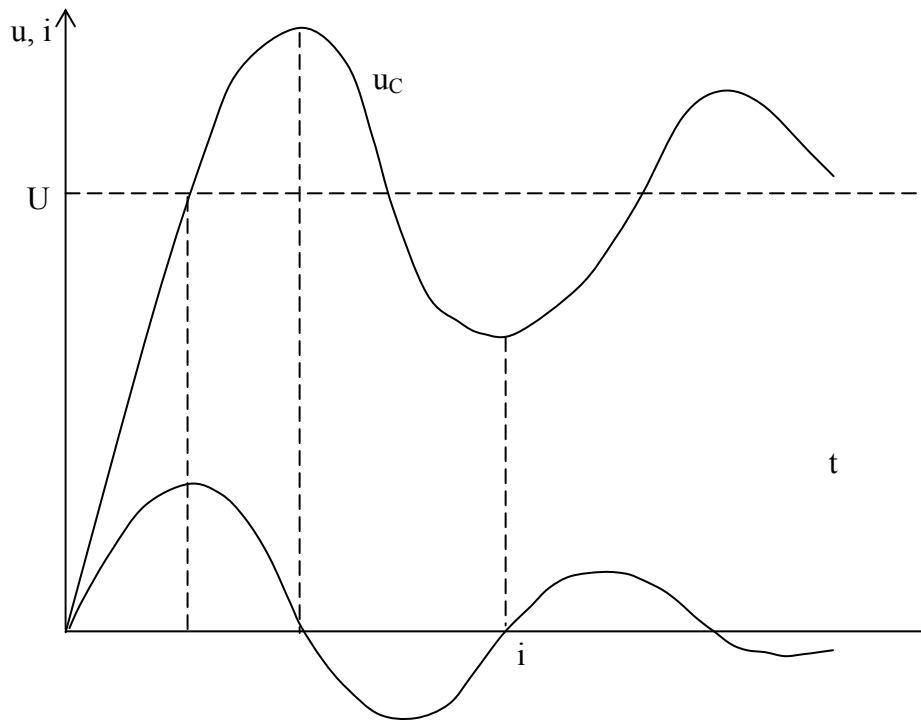


Рис. 12.2.3

Як бачимо із рис. 12.2.3 залежності струмів та напруг мають характер згасаючих коливань, амплітуда яких зменшується за експонентою.

Енергетичний процес умовно полягає у коливанні енергії між електричним полем конденсатора та магнітним полем котушки.

12.3. Необхідне обладнання.

12.3.1. Лабораторна установка:

- котушка індуктивності;
- конденсатори;
- опори;
- поляризоване реле типу РП5.

12.3.2. Універсальне джерело живлення (УДЖ):

- змінної напруги $0 \div 30$ В;
- постійної напруги $0 \div 15$ В.

12.3.3. Електронний осцилограф.

12.3.4. Комплект з'єднуючих проводів.

12.4. Порядок виконання роботи.

12.4.1. Зібрати схему, зображену на рис. 12.4.1.

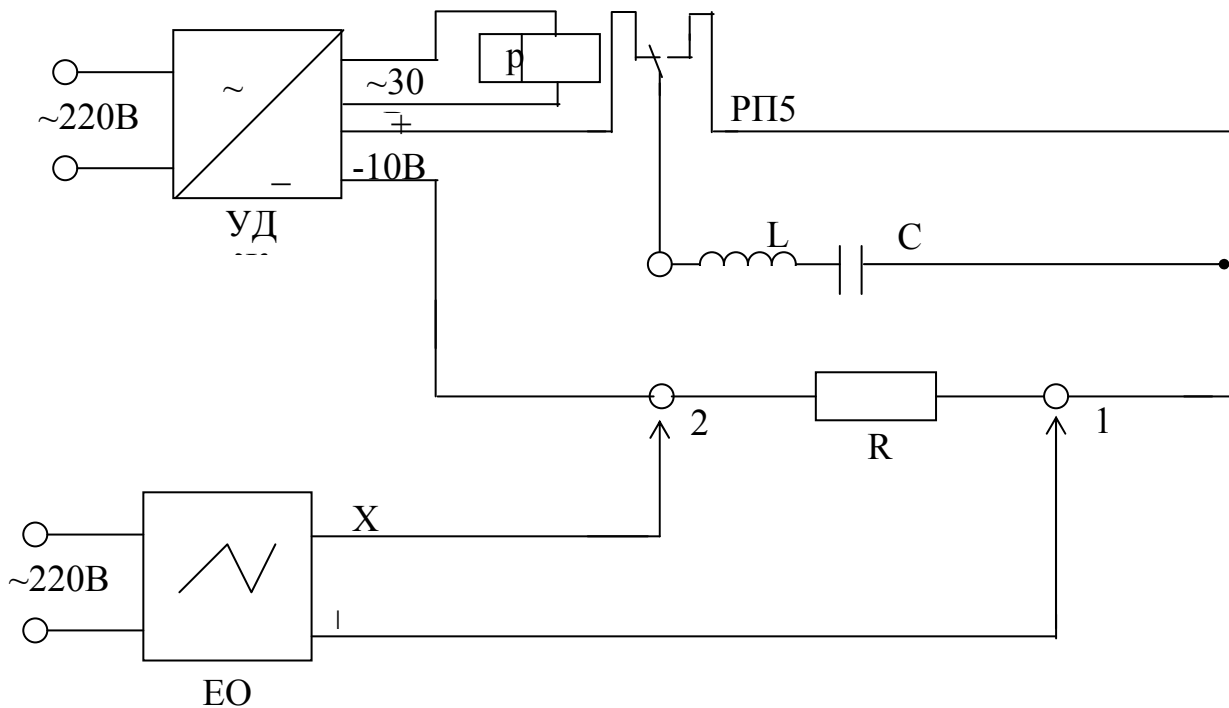


Рис. 12.4.1

- 12.4.2. Після перевірки зображеної схеми викладачем ввімкнути змінну напругу 220 В та підключити електронний осцилограф і універсальне джерело живлення.
- 12.4.3. Встановити на затискачах джерела постійну напругу 10 В для живлення кола R-L-C.
- 12.4.4. Приєднати до точок 1-2 вхід осцилографа та змінювати значення опорів та ємностей для усіх трьох випадків:
- $$R > 2\sqrt{L/C}; \quad R < 2\sqrt{L/C}; \quad R = 2\sqrt{L/C}.$$
- 12.4.5. Розрахувати та побудувати графіки перехідних напруг для індуктивності та ємності для різних значень часу по параметрах, які приведені на стенді (або які вкаже викладач).

12.5 Питання до здачі роботи.

- 12.5.1. Який процес у електричному колі зветься перехідним?
- 12.5.2. Чим перехідний процес викликається?
- 12.5.3. Тривалість перехідного процесу.
- 12.5.4. Для якої схеми (до чи після комутації) складається диференціальне рівняння?
- 12.5.5. Який буде характер перехідного процесу, коли корені характеристичного рівняння дійсні різні? Дійсні рівні? Комплексно-спряжені?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

13.1. Мета роботи

Визначення експериментальним шляхом хвильового опору та коефіцієнта розповсюдження хвилі для кіл з розподіленими параметрами.

13.2. Основні теоретичні положення

У лінії електропередач невеликої довжини при частоті 50 Гц та напругах до 35 кВ можна нехтувати струмами, які виникають за рахунок ємностей між проводами (струми зміщення) та провідностей ізоляції (струми, які протікають через ізолятори), та струмами, які обумовлені явищем електричного розряду поблизу поверхні проводу.

При значних напругах у електротехніці та значних частотах у техніці електрозв'язку, а також при значній довжині лінії електропередач нехтувати струмами зміщення, та стікання недопустимо, тобто, струми у проводах мають різне значення у різних перетинах лінії.

Струм у проводах лінії викликає падіння напруги у активному опорі проводів та створює змінне магнітне поле, яке у свою чергу наводить вздовж усієї лінії ЕРС самоіндукції.

Тому напруга між проводами також буде не однаковою вздовж лінії.

Для того щоб врахувати зміну струму та напруги вздовж лінії необхідно рахувати, що кожний будь який малий елемент довжини лінії має опір та індуктивність, а між проводами – провідність та ємність, тобто треба розглядати лінію як коло з розповсюдженими параметрами.

Прийmemo допущення, що опір, індуктивність, провідність та ємність рівномірно розповсюджені вздовж лінії, що є деякою ідеалізацією умов, які мають місце у дійсності.

Така лінія має назву – однорідної. При синусоїдній напрузі джерела живлення напруга та струм у лінії є функцією двох незалежних змінних: довжини лінії – X , яка визначає місце спостереження, та часу – t , який визначає момент спостереження.

Параметри лінії, які відносяться до одиниці її довжини, зветься первинними параметрами, вони завжди відомі:

R_0 – опір прямого та зворотнього проводів по відношенню до одиниці довжини;

L_0 – індуктивність петлі, яка виникає за рахунок прямого та зворотнього проводів, по відношенню до одиниці довжини;

G_0 – провідність між проводами по відношенню до одиниці довжини;

C_0 – ємність між проводами, по відношенню до одиниці довжини.

Лінії передач, фізична довжина яких сумірна з довжиною хвилі λ , звуться довгими (у електричному понятті).

При достатньо високих частотах практично будь-яке протяжне електричне коло буде довгим. Наприклад, при частоті $f = 3 \cdot 10^9$ Гц ($\lambda = 10$ см) коло довжиною у декілька сантиметрів ($\ell = 5$ см) треба розглядати як довге.

Довгу лінію можливо розглядати, як безліч з'єднаних послідовно нескінченно малих елементів довжиною ΔX , кожний з яких має опір R_0 , індуктивність L_0 , провідність G_0 та ємність C_0 (рис. 13.3.1).

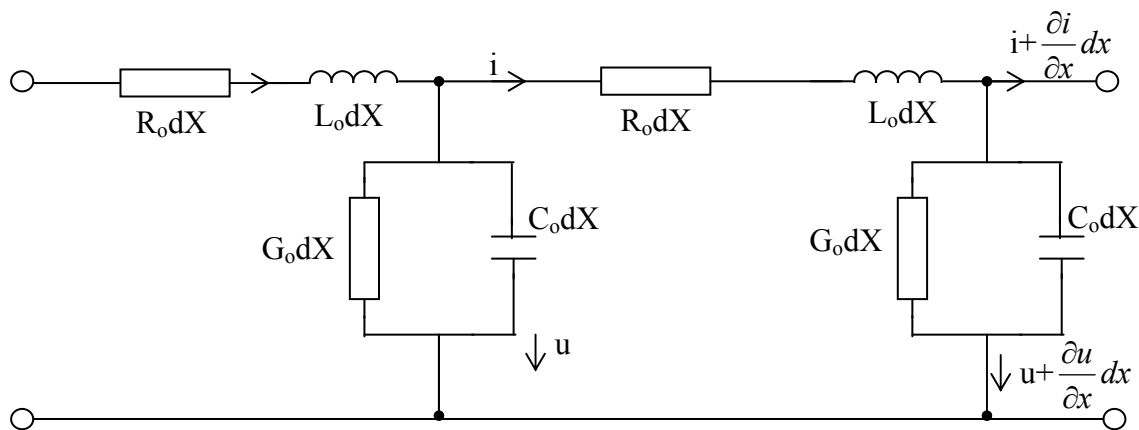


Рис. 13.3.1

Таку лінію можливо описати рівняннями у часткових похідних, які мають назву телеграфних:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t};$$

$$-\frac{\partial i}{\partial t} = G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}$$

Якщо напруга джерела синусоїдна, то при розрахунку такої лінії можна використовувати символічний метод і від рівнянь у часткових похідних перейти до звичайних диференціальних рівнянь відносно комплексів струму та напруги.

$$-\frac{dU}{dx} = (R_0 + j\omega L_0) \underline{I};$$

$$-\frac{dI}{dx} = (G_0 + j\omega C_0) \underline{U}$$

$$-\frac{dU}{dx} = \underline{Z}_0 \underline{I};$$

$$-\frac{dI}{dx} = \underline{Y}_0 \underline{U}$$

де $\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$ – комплекс опору одиниці довжини лінії;
 $\underline{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ – комплекс провідності одиниці довжини лінії.

Розв'язавши рівняння другого порядку відносно \underline{I} та \underline{U} одержимо такий вираз для комплексу напруги у будь якій точці лінії, якщо відомі напруга та струм на початку лінії.

$$\underline{U} = \frac{1}{2}(\underline{U}_1 + \underline{I}_1 \underline{Z}_X) e^{-\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_1 - \underline{I}_1 \underline{Z}_X) e^{\gamma x}$$

де $\underline{Z}_X = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}$ – хвильовий (характеристичний) опір лінії;

$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$ – коефіцієнт розповсюдження хвилі напруги чи струму;

$$\gamma = \beta + j\alpha$$

β – коефіцієнт згасання, який характеризує згасання падаючої хвилі напруги (струму) на одиницю довжини лінії;

α – коефіцієнт фази, який характеризує зміну фази падаючої хвилі напруги (струму) на одиницю довжини лінії;

\underline{Z}_B, γ – вторинні параметри лінії.

Якщо ми знаємо значення напруги та струму у кінці лінії ($X = \ell$), то вирази для напруги та струму у будь-якій точці лінії мають такий вигляд:

$$\underline{U} = \frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_X) e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_X) e^{-\gamma x}$$

$$\underline{I} = \frac{1}{\underline{Z}_X} \left[\frac{1}{2}(\underline{U}_2 + \underline{I}_2 \underline{Z}_X) e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\underline{U}_2 - \underline{I}_2 \underline{Z}_X) e^{-\gamma x} \right]$$

Ці рівняння для напруги \underline{U} та струму \underline{I} є рівняннями симетричного чотириполюсника.

Як і будь який чотириполюсник, лінія може бути представлена T – подібними чи Π – подібними симетричними еквівалентними схемами.

Використовуючи теорію чотириполюсника, на основі даних експерименту холостого ходу та короткого замикання можна визначити хвильовий опір \underline{Z}_X та коефіцієнт розповсюдження γ .

$$\underline{Z}_X = \sqrt{\underline{Z}_{1K} \cdot \underline{Z}_{10}}, \quad \text{th} \gamma \ell = \sqrt{\underline{Z}_{1K} / \underline{Z}_{10}},$$

де \underline{Z}_{10} – комплекс опору лінії у режимі холостого ходу;

\underline{Z}_{1K} – комплекс опору лінії у режимі короткого замикання.

13.3. Необхідне обладнання

13.3.1. Лабораторна установка;

13.3.2. Котушка індуктивності;

13.3.3. Конденсатор;

- 13.3.4. Автотрансформатор ЛАТР-1 1 шт.;
- 13.3.5. Амперметр 0,5-1А 2 шт.;
- 13.3.6. Вольтметр 150-300В 1 шт.;
- 13.3.7. Вмикач 1 шт.;
- 13.3.8. Комплект з'єднуючих проводів.

13.4. Порядок виконання роботи

13.4.1. Задані первинні параметри лінії, її довжина та частота джерела напруги:

$$R_0 = 1,62 \text{ Ом/км}, \quad L_0 = 1,37 \cdot 10^{-8} \text{ Гн/км}, \quad G_0 = 0,692 \cdot 10^{-6} \text{ См./км},$$

$$C_0 = 1,66 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/км}, \quad \ell = 300 \text{ км}, \quad f = 50 \text{ Гц}.$$

За первинними параметрами розрахувати \underline{Z}_X , γ та записати їх значення у табл. 13.4.1.

13.4.2. Зібрати електричну схему, згідно рис. 13.4.1.

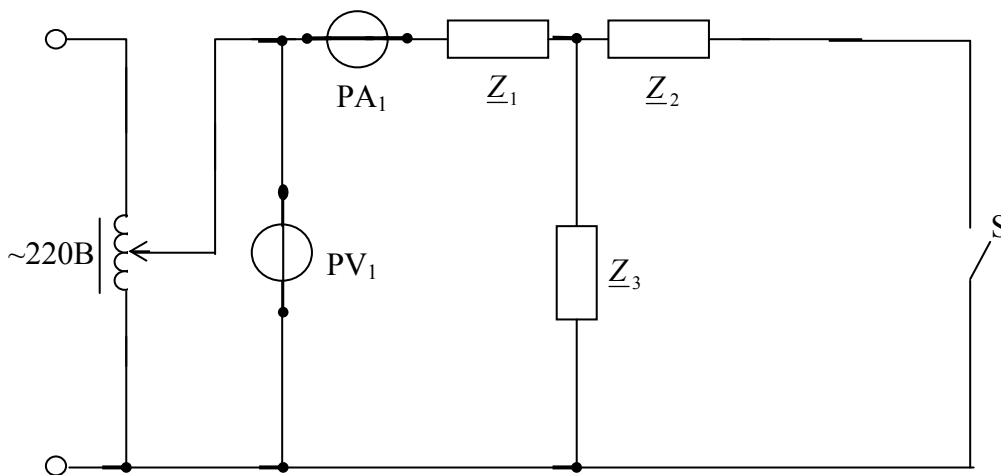


Рис. 13.4.1

13.4.3. Після її перевірки керівником при розімкненому вимикачі Q, зняти показники приладів PV_1 , PA_1 та записати їх значення відповідно у стовпці таблиці 13.4.1.

Таблиця 13.4.1.

U_{10}	I_{10}	$U_{1К}$	$I_{1К}$
В	А	В	А

13.4.4. Замкнути вмикач Q, зняти показники приладів PA_1 , PV_1 та записати їх відповідно у 3 та 4 стовбці табл. 13.4.1.

13.4.5. Згідно даних табл. 13.4.1 розрахувати \underline{Z}_X , γ (експериментальні значення). Результати розрахунку записати у табл. 13.4.2.

При розрахунку \underline{Z}_X та γ згідно експериментальних даних урахувати, що I_{10} випереджає U_{10} на $62^\circ 45'$, а U_{1K} випереджає I_{1K} на $4^\circ 30'$.

Примітка:

Експериментальне значення \underline{Z}_X та γ розраховується згідно формул:

$$\begin{aligned} Z_{10} &= U_{10} / I_{10}; & Z_{1K} &= U_{1K} / I_{1K} \\ Z_X &= \sqrt{Z_{1K} \cdot Z_{10}}; & th\gamma &= \sqrt{Z_{1K} / Z_{10}} \end{aligned}$$

Таблиця 13.4.2.

Вторинні параметри лінії	\underline{Z}_X	γ
Розрахункові		
Експериментальні		

13.5. Запитання до здачі роботи

- 13.5.1. Які лінії мають назву електричних кіл з розповсюдженими параметрами?
- 13.5.2. Яка лінія має назву однорідної?
- 13.5.3. Які величини відносяться до первинних, які до вторинних параметрів лінії?
- 13.5.4. Як розраховується хвильовий опір лінії?
- 13.5.5. Що таке коефіцієнт фази? Коефіцієнт згасання?
- 13.5.6. Як вираховується коефіцієнт розповсюдження?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 14

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ. ФЕРОРЕЗОНАНС НАПРУГ

14.1. Мета роботи

Дослідження явищ, які виникають у нелінійних колах при послідовному з'єднанні реактивної котушки з лінійною ємністю.

14.2. Основні теоретичні положення

Нелінійні електричні кола змінного струму це такі електричні кола, які мають один чи декілька нелінійних елементів (реактивна котушка, діод, тріод та ін.)

Проходженню змінного струму чинять опір не тільки резистивні але індуктивні та ємнісні елементи. У зв'язку з цим нелінійні елементи для змінного струму можливо розподілити на три групи: резистивні, індуктивні та ємнісні. Кожну з цих груп можливо розподілити на керовані та некеровані.

Під нелійними індуктивними елементами розуміють індуктивні котушки, які намотані на осердя з феромагнітного матеріалу, для яких залежність магнітного потоку від струму, що тече через котушку, нелінійна. Реактивний опір таких котушок при протіканні змінного струму, залежить від величини струму.

Резонанс напруг виникає у колі з послідовним з'єднанням котушки індуктивності та ємності, але на відміну від лінійного кола у нелінійному колі при зміні величини напруги на вході кола може виникнути ферорезонанс.

Ферорезонанс напруг виникає при умові коли індуктивний та ємнісний опір будуть рівними, тобто зсув по фазі між першими гармоніками струму та напруги буде дорівнювати нулю.

Розглянемо електричне коло з послідовним з'єднанням реактивної котушки, ємності та резистора (рис. 14.2.1).

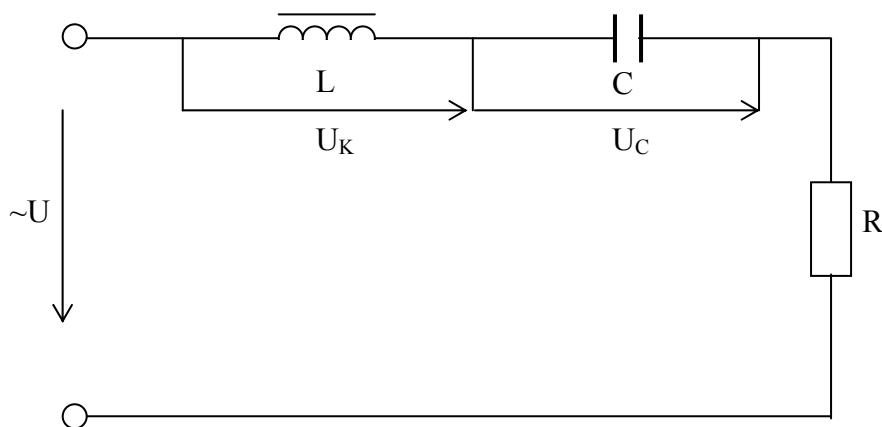


Рис. 14.2.1

Побудуємо для такого кола результуючу вольт-амперну характеристику (рис. 14.2.2), ВАХ.

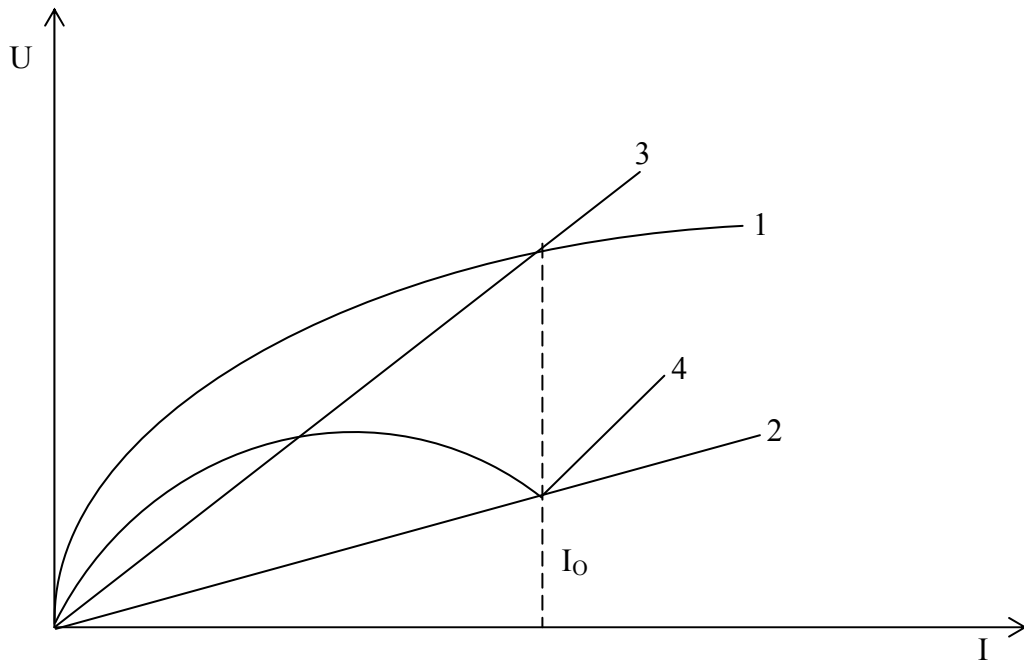


Рис. 14.2.2

- | | |
|-----------------------------|----------------------|
| 1. В.А.Х. котушки зі сталлю | $U_L(I), U_L = f(I)$ |
| 2. В.А.Х. активного опору | $U_R(I), U_R = f(I)$ |
| 3. В.А.Х. ємності | $U_C(I), U_C = f(I)$ |
| 4. Результуюча В.А.Х. | $U(I), U = f(I)$ |

Для побудови результуючої В.А.Х. довільно задаємося значенням струму I , знаходимо для нього різницю $U_L - U_C$ (враховуючи, що U_L та U_C знаходяться у протифазі), та значення U_R . Результуюче значення напруги U дорівнює гіпотенузі трикутника, який побудовано на катетах U_R та $U_L - U_C$ тобто $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$.

Векторні діаграми до резонансу (рис. 14.2.2.1), у момент резонансу (рис. 14.2.2.2) та після резонансу (рис. 14.2.2.3):

Будемо, починаючи з нуля, повільно збільшувати напругу джерела живлення. У цьому випадку траєкторія зображуючої робочої точки буде проходити від 0 через точку 1 до точки 2. Рис.14.2.3.

У разі подальшого збільшення вхідної напруги зображуюча точка стрибком переміститься від точки 2 до точки 4 і далі буде рухатися по ділянці 4-5.

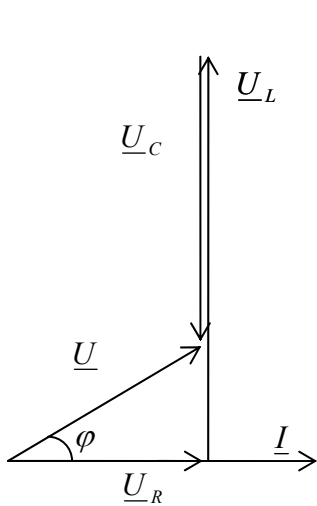


Рис. 14.2.2.1

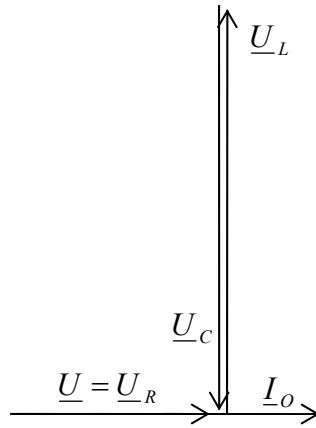


Рис. 14.2.2.2

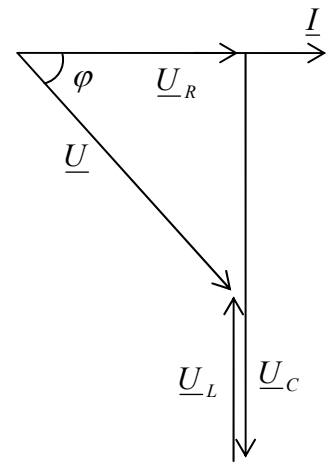


Рис. 14.2.2.3

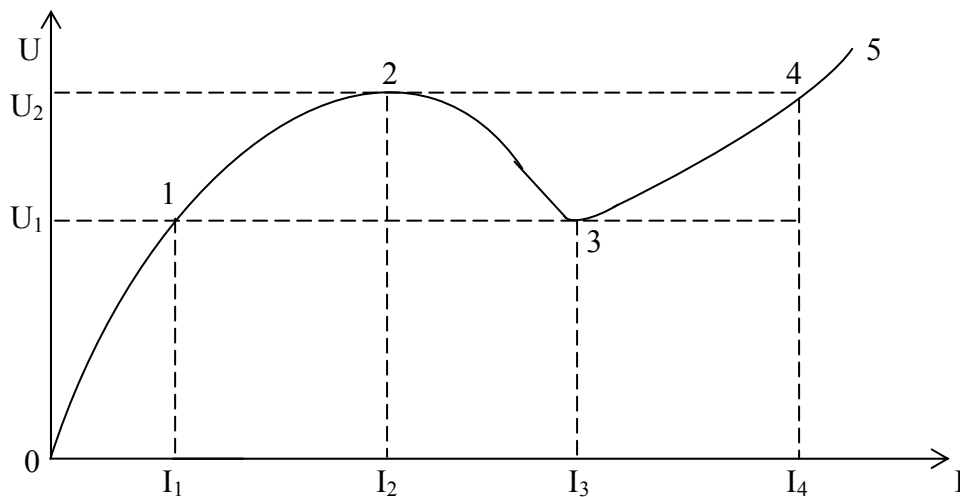


Рис. 14.2.3

При зменшенні напруги зображуюча точка буде переміщуватися від точки 5 через 4 до точки 3, а потім стрибком до точки 1, а далі від точки 1 до точки 0. Таким чином, при плавному підвищенні напруги та досягненню його значення U_2 у колі виникає стрибкоподібне збільшення струму від значення I_2 до I_4 .

У цьому випадку різко змінюється кут зсуву фаз між струмом у колі та загальною напругою, у точці 2 струм відстає від напруги ($\varphi > 0$). У точці 4 струм випереджає напругу ($\varphi < 0$). При плавному зменшенні напруги джерела живлення коли вона досягає значення U_1 струм у колі стрибком зменшується від значення I_3 до значення I_1 .

Явище різкого зміну струму у колі при незначному змінненні напруги на вході зветься тригерним ефектом у послідовному ферорезонансному колі. Якщо таке коло вмикати на напругу U , величина якої знаходиться у інтервалі між U_1 та U_2 , то у колі може стати один із двох режимів. Перший режим відповідно

знаходженню робочої точки на ділянці між точками 1 та 2, другий на ділянці між точками 3 та 4. На якому із цих двох ділянок буде робоча точка залежить від характеру перехідного процесу.

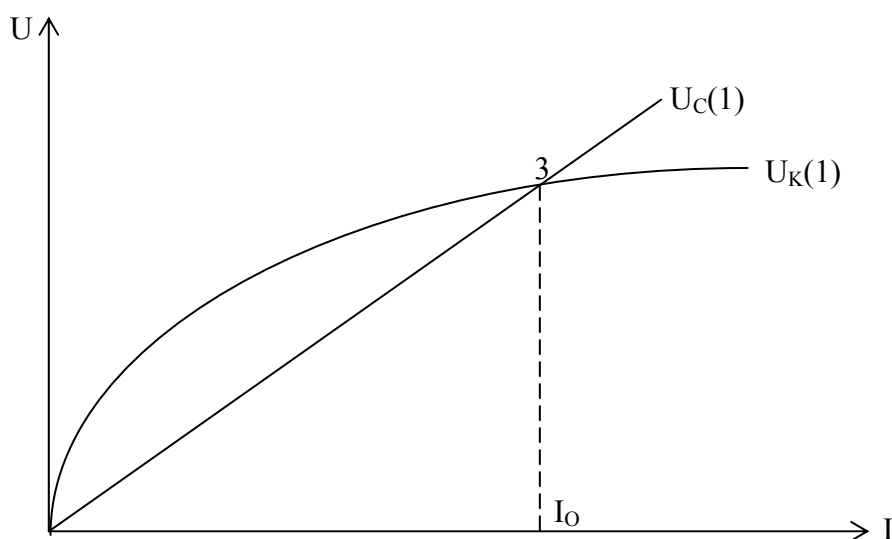


Рис. 14.2.4

Ферорезонансу напруг можливо досягнути шляхом зміни чи частоти джерела чи шляхом зміни величини ємності, чи шляхом зміни величини індуктивності котушки зі сталлю. Але на протилежність лінійним колам у випадку ферорезонансу змінення індуктивності з металевим осердям є результатом залежності індуктивності котушки зі сталлю від діючого значення струму.

14.3. Необхідне обладнання

- 14.3.1. Лабораторна установка;
- 14.3.2. Нелінійна котушка (з феромагнітним осердям);
- 14.3.3. Лінійний конденсатор;
- 14.3.4. Автотрансформатор ЛАТР 1 шт.;
- 14.3.5. Вольтметр 75-150-300-600 В 2 шт.;
- 14.3.6. Вольтметр 150 В 1 шт.;
- 14.3.7. Амперметр 0,5-1А 1 шт.;
- 14.3.8. Ватметр 150 В, 5 А 1 шт.;
- 14.3.9. Комплект з'єднуючих проводів.

14.4. Порядок виконання роботи

- 14.4.1. Згідно електричній схемі з'єднати елементи L і C прилади і апарати (рис. 14.4.1.)

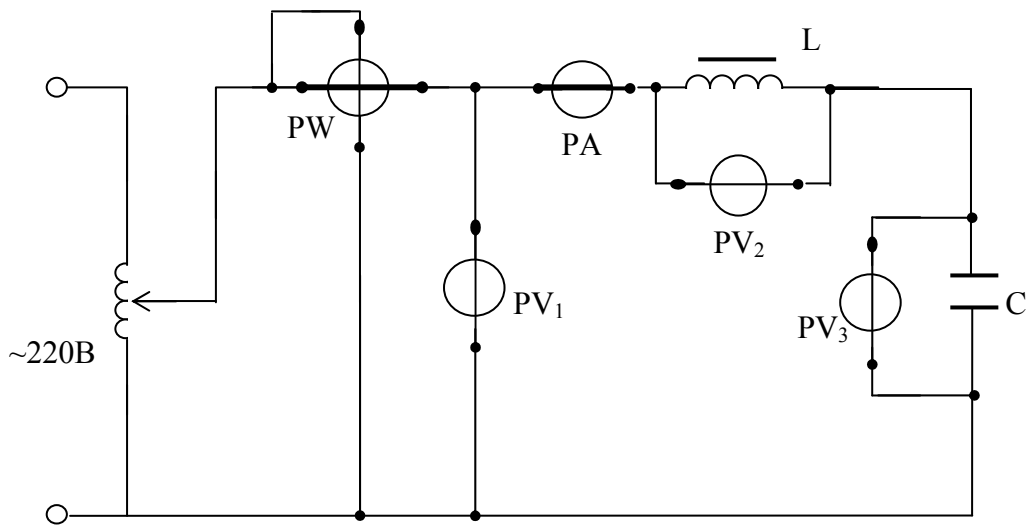


Рис. 14.4.1

- 14.4.2. Вольтметри PV_1 та PV_2 встановити на 150 В, вольтметр PV_3 на 300 В, у роботі використовувати амперметр 0,5-1 А.
- 14.4.3. Після перевірки правильності збірки схеми керівником, який проводить роботу зняти показники усіх приладів для різних значень вхідної напруги.
- 14.4.4. При підвищенні напруги (ходу вгору) має місце прямий стрибок (збільшення) струму; при зниженні напруги (хід униз) має місце зворотній стрибок (зменшення) струму.
Необхідно визначити та записати у таблиці 14.4.1. значення прямого та зворотного струму
- 14.4.5. По даним таблиці 14.4.1 побудувати графіки та дати пояснення графічним залежностям:
 $U = f(I)$, $U_L = f(I)$, $U_C = f(I)$, $P = f(I)$.

Рух вгору

Таблиця 14.4.1.

№ п/п	Вимірюване					Обчислювальне	Примітка
	$U_{1,B}$	$I_{1,A}$	$U_{L,B}$	$U_{C,B}$	$P, Вт$	$U_L - U_{C,B}$	
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

№ п/п	Вимірюване					Обчислювальне	Примітка
	$U_{1,B}$	$I_{1,A}$	$U_{L,B}$	$U_{C,B}$	$P, Вт$	$U_L - U_{C,B}$	
1.							
2.							
3.							
4.							
5.							
6.							
7.							
8.							

14.5. Запитання до здачі роботи.

14.5.1. У яких колах виникає ферорезонанс напруг?

14.5.2. Умови ферорезонансу напруг.

14.5.3. Як будується результуюча вольт амперна характеристика для кола з послідовним з'єднанням реактивної котушки та конденсатора?

14.5.4. Які особливості ферорезонансу у нелінійних колах?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 15

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ КІЛ

15.1. Мета роботи

15.1.1. Дослідження нелінійних кіл з діодами та зняття вольт-амперних характеристик.

15.2. Основні теоретичні положення

Нелінійні опори з несиметричною вольтамперною характеристикою широко використовуються для перетворення змінного струму у постійний. Вони мають односторонню провідність і називаються випрямлячами або електричними вентилями. У останній час широкого застосування здобули напівпровідникові прилади, з односторонню провідністю, у яких є так званий зворотній струм, але він у порівнянні з прямим має дуже мале значення. Вольт амперна характеристика напівпровідникового діоду приведена на рис. 15.2.1.

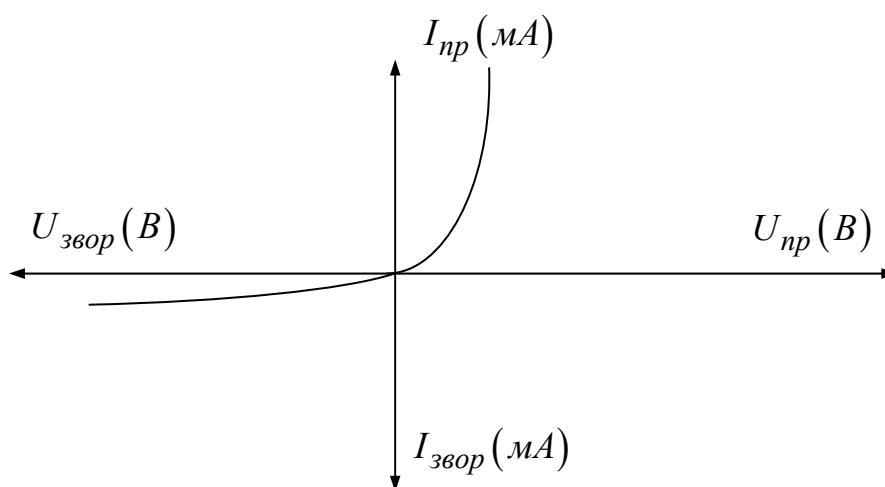


Рис. 15.2.1

Відношення величини струму при прямому живленні до величини струму через діод при зворотному живленні має назву коефіцієнта випрямлення.

$$K = \frac{I_{пр}}{I_{звор}}$$

У останній час широке розповсюдження здобули германієві та кремнієві діоди, їх особливістю є малі габарити та мала потужність, що споживається.

На рис. 15.2.2 зображена електрична схема з одним напівпровідниковим діодом, який вмикається послідовно з приймачем (опір R).

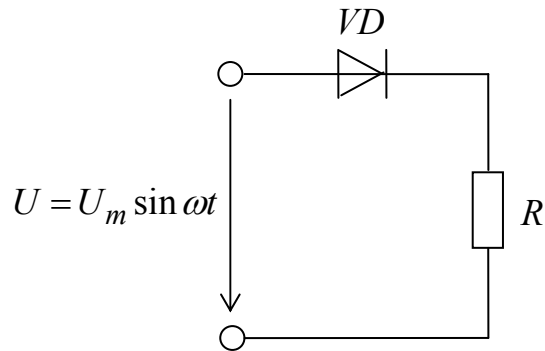


Рис. 15.2.2

До кола подається змінна напруга. Якщо опір діода у зворотному напрямку нескінченний, то струм у колі тече тільки у прямому напрямку при позитивній півхвильовій напрузі.

Графічний метод знаходження струму показано на рис. 15.2.3.

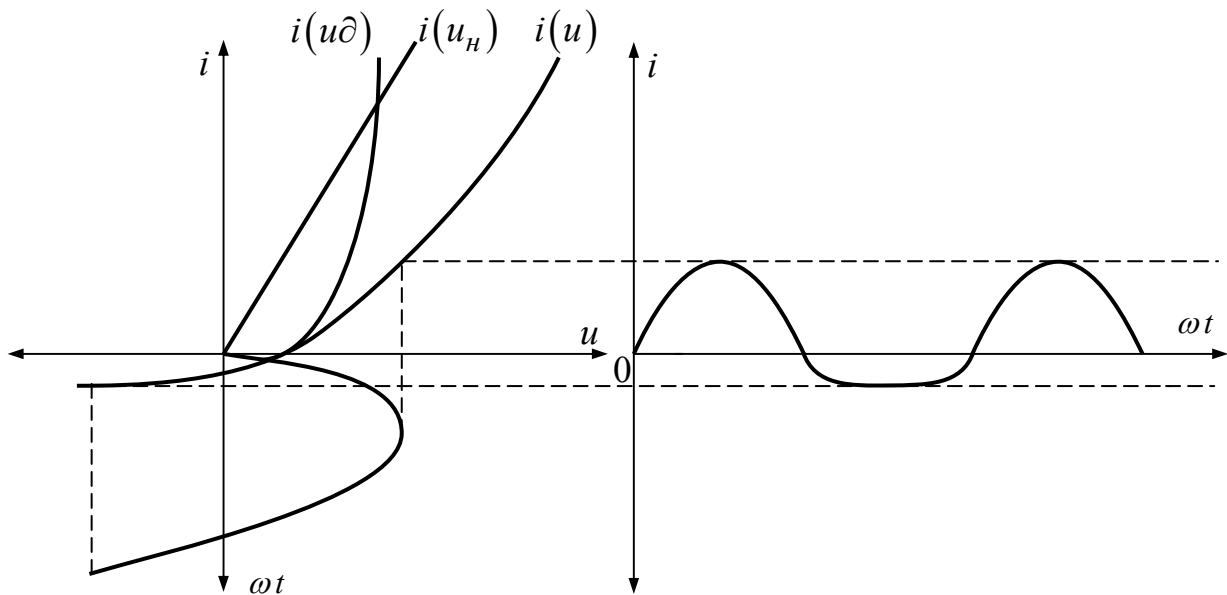


Рис. 15.2.3

$i(u_d)$ – вольтамперна характеристика діода;

$i(u_H)$ – вольтамперна характеристика лінійного опору приймача енергії;

$i(u)$ – вольтамперна характеристика кола.

Струм являє собою періодичну несинусоїдну функцію у вигляді позитивних півхвиль синусоїди (рис.15.3.4).

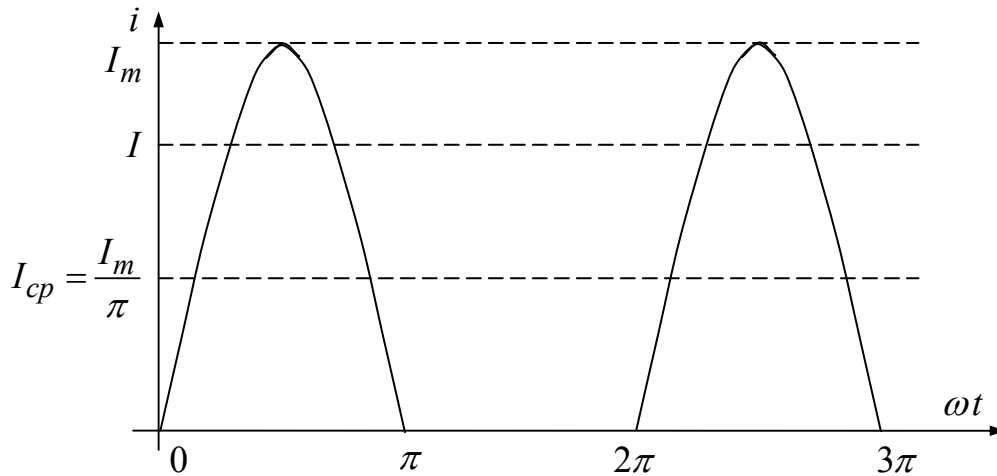


Рис. 15.2.4

Постійна складова (середнє значення) струму:

$$I_{cp} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\pi}; \quad I_{cp} = \frac{I_m}{\pi}$$

Діюче значення струму:

$$I = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d\omega t = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Таким чином, якщо послідовно з навантаженням ввімкнути амперметр, то його покази будуть залежати від системи приладу і будуть дорівнювати I_m / π (магнітоелектрична система) чи $\frac{I_m}{\sqrt{2}}$ (електромагнітна система).

Так само і для напруг, $U_{cp} = U_m / \pi$, $U = U_m / \sqrt{2}$, $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$.

Опір діоду, визначається крутизною характеристики і не є постійною величиною. Для спрощення розрахунку іноді характеристику замінюють прямою лінією, яка проходить через початок координат та точку, яка відповідає максимальному струму діода.

При такому спрощенні опір діоду постійний і характеристика лінійна.

У ряді випадків опір діоду при прямому струмові приймається за нуль, а при зворотному за нескінченність.

Такий діод розглядається, як ідеальний (рис. 15.2.5).

Максимальна напруга на діоді, у інтервалі коли діод запертий, зветься максимальною зворотною напругою.

При однопівперіодному випрямленні струм проходить через діод тільки тоді, коли він відкритий, у цьому разі пульсації струму великі. Цей недолік у значній мірі зменшується у двопівперіодному випрямлячі.

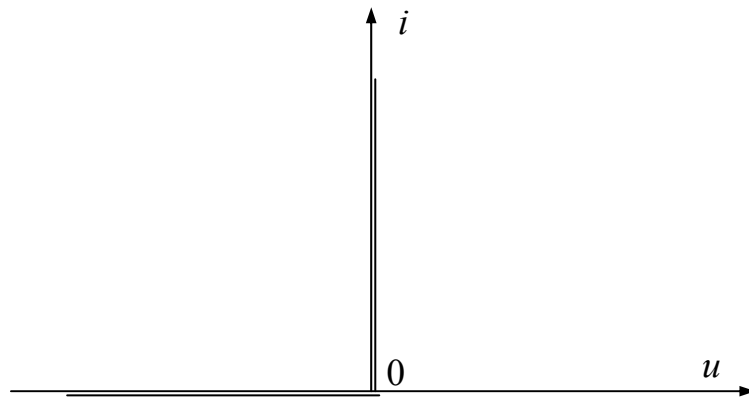


Рис. 15.2.5

Двопівперіодне випрямлення.

Для того, щоб у навантаженні був струм при обох півперіодах вхідної напруги використовують схему з двома або чотирма діодами. У схемі з двома діодами (рис. 15.2.6) в один півперіод відкритий діод VD_1 у другий півперіод діод VD_2 .

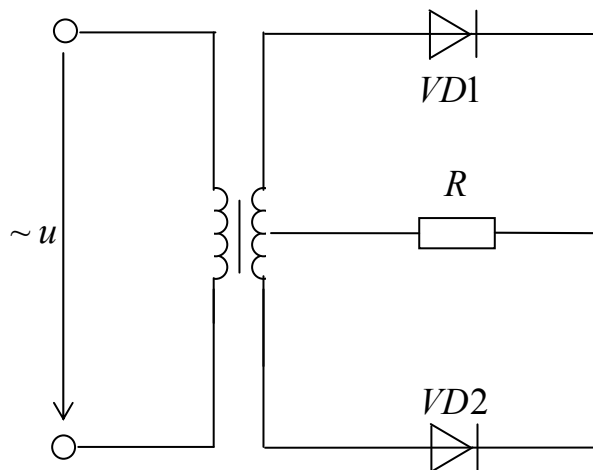


Рис. 15.2.6

Діоди вмикають так, щоб струм у навантаженні при кожному з півперіодів мав однаковий напрямок (рис. 15.2.7).

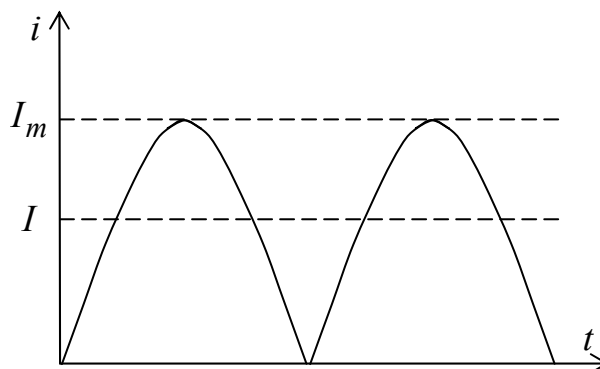


Рис. 15.2.7

Середнє та діюче значення струму та напруги у цьому випадку:

$$I = 0,707 I_m; \quad I_{cp} = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m; \quad U_{cp} = \frac{2}{\pi} U_m$$

де U_m – максимальне значення вхідної напруги на вторинній обмотці трансформатора.

Широке застосування знайшли схеми з чотирма діодами.

У схемі двопівперіодного випрямляча з чотирма діодами у кожному півперіоді струм проходить через два послідовно з'єднаних діода.

15.3. Необхідне обладнання.

- 15.3.1. Діод напівпровідниковий Д226-И – 5 шт.;
- 15.3.2. Вольтметр 150 ÷ 300В – 1 шт.;
- 15.3.3. Вольтметр електромагнітної системи 75 ÷ 150В – 1 шт.;
- 15.3.4. Вольтметр магнітоелектричної системи 30В – 1 шт.;
- 15.3.5. Амперметр електромагнітної системи 0,5А- 1 шт.;
- 15.3.6. Амперметр магнітоелектричної системи 0,5А – 1 шт.;
- 15.3.7. Реостат 30 Ом – 1 шт.;
- 15.3.8. Реостат 160 Ом – 1 шт.;
- 15.3.9. Осцилограф;
- 15.3.10.Комплект з'єднуючих проводів.

15.4. Порядок виконання роботи.

- 15.4.1. Ознайомитись з приладами для виконання роботи, та записати їх паспортні данні. Визначить номінальний струм та номінальну зворотну напругу.
- 15.4.2. Зібрати електричне коло для зняття вольтамперної характеристики випрямляча (рис. 15.4.1).

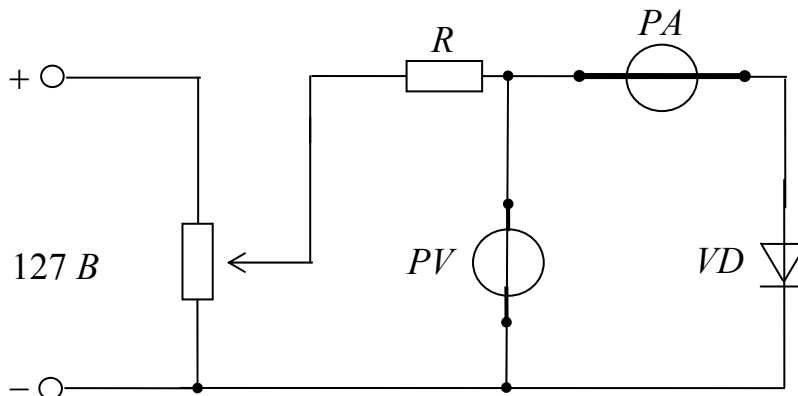


Рис. 15.4.1

- 15.4.3. Змінюючи напругу на діоді від 0 до 12В через кожні 2В, зняти вольтамперну характеристику випрямляча на прямій напрузі, при цьому струм через випрямляч, не повинен перевищувати номінальний.

15.4.4. Змінюючи напругу на діоді від 0 до 100В через кожні 10В, зняти вольтамперну характеристику випрямляча при зворотній напрузі, результати досліджень записати у табл. 15.4.1 і побудувати вольтамперну характеристику випрямляча.

Таблиця 15.4.1

При прямої напрузі		При зворотній напрузі	
$U_{пр}, B$	$I_{пр}, A$	$U_{звор}, B$	$I_{звор}, A$
0		10	
2		20	
...		...	
12		100	

15.4.5. Зібрати однопівперіодного випрямляча однофазного змінного струму (рис. 15.4.2). Після перевірки схеми керівником ввімкнути її на змінну напругу 127 В.

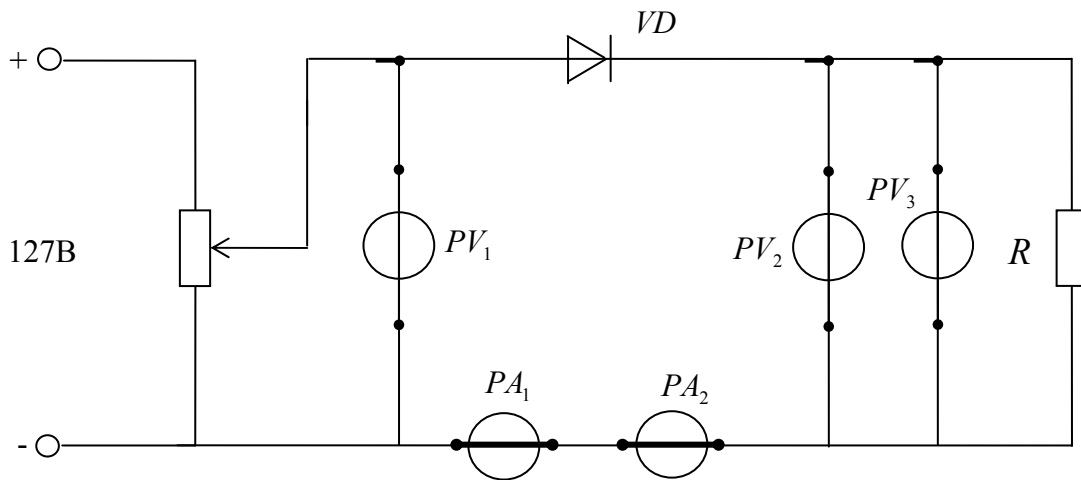


Рис. 15.4.2

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

*до лабораторних робіт по курсу
“Теоретичні основи електротехніки”*

*для студентів факультету енергетики
та комп’ютерних технологій*

Відповідальний за випуск: Васильєв С.І.

Формат паперу 60 x 84 1/16

Тираж: 300

Різограф TR 1510 80654645

Навчально-методичний центр по заочній формі навчання у закладах освіти 3-4 рівнів акредитації аграрного профілю

Адреса: 61002, м. Харків, вул.. Артема, 44, кім. 101

