

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Кафедра електроенергетики, електротехніки
та електромеханіки**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних робіт
з дисципліни**

« ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ »

Частина 1

Харків – 2017

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 20 березня 2017 р., протокол № 9.

Методичні вказівки призначено для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та 273 «Залізничний транспорт» усіх форм навчання.

Укладачі:

доценти С. М. Тихонравов,
О. Є. Зінченко,
старш. викл. Ю. І. Богатир

Рецензент

доц. М. Г. Давиденко

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

« ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ »

Частина 1

Відповідальний за випуск Зінченко О. Є.

Редактор Ібрагімова Н. В.

Підписано до друку 30.03.17 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 2,25. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ.....	4
ПРАВИЛА СКЛАДАННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. Дослідження нерозгалуженого електричного кола постійного струму та вимірювання потенціалів його точок.....	6
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. Дослідна перевірка методу двох вузлів.....	12
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. Дослідна перевірка теореми про еквівалентний генератор (активний двополюсник) і дослідження передачі енергії від активного двополюсника до пасивного.....	16
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. Дослідження нелінійних електричних кіл постійного струму.....	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5. Дослідження кола змінного струму при послідовному та паралельному з'єднанні резистора з котушкою індуктивності або конденсатором.....	31
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6. Дослідження кола при послідовному з'єднанні індуктивного і ємнісного елементів (резонанс напруг).....	41
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7. Дослідження електричного кола зі взаємною індуктивністю.....	46
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	54

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Для роботи в лабораторії студентська група поділяється на бригади з двох-чотирьох студентів. Кожна бригада виконує протягом семестру всі лабораторні роботи за планом, складеним кафедрою на поточний семестр.

Студенти повинні завчасно готуватися до наступних занять у лабораторії: вивчити відповідні розділи теоретичного курсу за конспектом лекцій і навчальною літературою, виконати необхідні попередні розрахунки, а також акуратно підготувати бланк індивідуального звіту з роботи, яка має відбутися. Студенти, які виконали всі передбачені планом лабораторні роботи і своєчасно захистили звіти з них, отримують залік з курсу лабораторних робіт.

Опрацювання результатів лабораторних експериментів та остаточне оформлення звітів студенти виконують у позааудиторний час.

Для забезпечення безпеки робіт у лабораторії та попередження псування приладів необхідно користуватися правилами, які викладено нижче.

1 При першому відвіданні лабораторії студенти повинні ретельно ознайомитися з правилами техніки безпеки та внутрішнього розпорядку, які прийняті в лабораторіях кафедри.

2 Допуск студентів у лабораторію дозволяється тільки в години, вказані в розкладі занять. Студенти, які пропустили заняття з поважних причин, виконують роботи у спеціально виділений кафедрою додатковий час.

3 Підготовленість студента до виконання чергової лабораторної роботи перевіряє викладач у процесі допускового контролю. Студенти, які отримали незадовільну оцінку, не отримують допуск до виконання чергової лабораторної роботи.

4 У лабораторії студенти працюють біля своїх стендів, дотримуючись належного порядку і тиші. Вихід з лабораторії допускається тільки з дозволу викладача.

5 При складанні електричних кіл необхідно пильнувати за тим, щоб вимірювальні прилади, що використовуються, та інші

елементи вимірювальної установки відповідали робочим величинам струмів, напруг і потужностей.

6 Перед початком роботи стрілки електровимірювальних приладів повинні бути встановлені на нуль, а прилади з кількома межами вимірювань, крім того, повинні бути ввімкнені на максимальну межу вимірювань.

7 Перш ніж до складеної вимірювальної установки буде підключено джерело живлення, необхідно показати її викладачеві для перевірки.

8 Якщо за умовами роботи треба змінити досліджуване коло, то це слід робити при знятій напрузі, а перед ввімкненням установки її треба знов показати викладачеві для перевірки.

9 Результати вимірювань студенти повинні пред'явити викладачеві, який у випадку достовірності цих результатів дає дозвіл на закінчення роботи. До отримання такого дозволу розбирати вимірювальну установку заборонено.

10 По закінченні лабораторної роботи члени кожної бригади розбирають свою вимірювальну установку, здають одержаний інвентар і приводять у порядок робоче місце.

ПРАВИЛА СКЛАДАННЯ ЗВІТІВ З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

1 Звіт складають на спеціальному бланку за установленною формою або на аркушах білого паперу формату А 4 за звітністю [5].

2 Текст звіту має бути написаний розбірливо та акуратно чорнилом або спеціальною пастою для кулькових ручок.

3 Схеми та графіки виконують за допомогою креслярських інструментів.

4 Літерні та графічні позначення мають відповідати діючим стандартам.

5 У звіті мають бути вказані:

а) прізвище та ініціали виконавця роботи, шифр його навчальної групи, дата виконання роботи;

б) номер роботи та її назва відповідно до тексту цих методичних вказівок;

в) матеріали, які вказані в розділі «Аналіз отриманих результатів» методичних вказівок з даної лабораторної роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ВИМІРЮВАННЯ ПОТЕНЦІАЛІВ ЙОГО ТОЧОК

Мета роботи:

а) на основі результатів вимірювань визначити величини параметрів джерел ЕРС, падіння напруги на елементах електричного кола та розподіл потенціалів при дії двох джерел ЕРС і порівняти ці величини з розрахунковими;

б) за допомогою вольтметра знайти обрив електричного кола, що перебуває під напругою.

1 Пояснення до роботи

У нерозгалуженому колі кожен два сусідні елементи мають один загальний затискач: у будь-який момент часу струм у кожному елементі має однакове значення, а напруга на затискачах всього з'єднання дорівнює сумі напруг на окремих елементах.

На рисунку 1.1 зображена схема нерозгалуженого кола з двома ЕРС E_1 та E_2 , де R_{01} та R_{02} – внутрішні опори джерел.

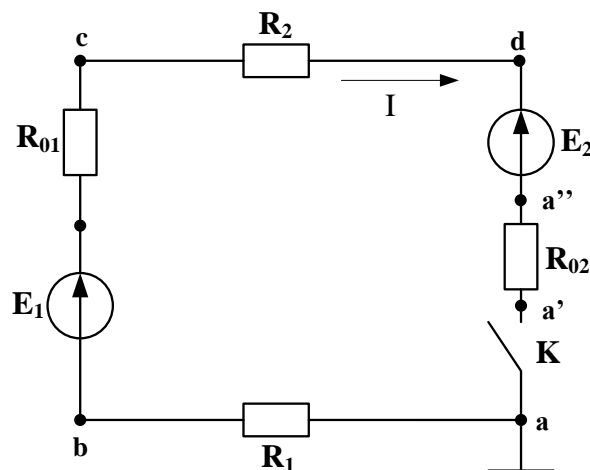


Рисунок 1.1

Нехай $E_1 > E_2$, тоді рівняння другого закону Кірхгофа має вигляд

$$E_1 - E_2 = IR_1 + IR_{01} + IR_2 + IR_{02},$$

звідки $I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_{01} + R_2 + R_{02}}$.

Для однозначного визначення кожної точки кола, яке розглядається, можна покласти, наприклад, $\varphi = 0$. Тоді потенціали інших точок знаходяться за такими виразами:

$$\varphi_b = \varphi_a - R_1 I, \quad \varphi_c = \varphi_b + E_1 - R_{01} I,$$

$$\varphi_d = \varphi_c - R_2 I, \quad \varphi_a = \varphi_d - E_2 - R_{02} I = 0.$$

Слід зазначити, що в колі нема таких двох точок, між якими існувала б напруга, яка дорівнює $U_{c'c} = R_{01} I$ або $U_{a'a'} = R_{02} I$, та ЕРС E_1 або E_2 . Фізичною величиною є сума (чи різниця) цих величин залежно від того, у якому режимі працює джерело – генератора або споживача – за законом Ома для ділянки кола, що містить джерело ЕРС ($U = IR \pm E$).

В електричній схемі можна заземлити одну будь-яку точку, потенціал якої приймають рівним 0. При цьому струморозподілення не зміниться, тому що ніяких нових віток, по яких міг би протікати струм, не утворюється.

Потенціальна діаграма – це графічне зображення зміни потенціалу в електричному колі залежно від опору кола. Якщо по осі абсцис відкласти опори ділянок у тій самій послідовності, у якій вони ввімкнені в коло, а по осі ординат – потенціали відповідних точок (рисунок 1.1), то отримаємо потенціальну діаграму електричного кола (рисунок 1.2).

Користуючись цим графіком, можна визначити напругу між двома точками кола.

Відношення напруги до опору будь-якої пасивної ділянки кола дорівнює струму ділянки і на потенціальній діаграмі визначається тангенсом кута нахилу відповідної прямої до осі абсцис.

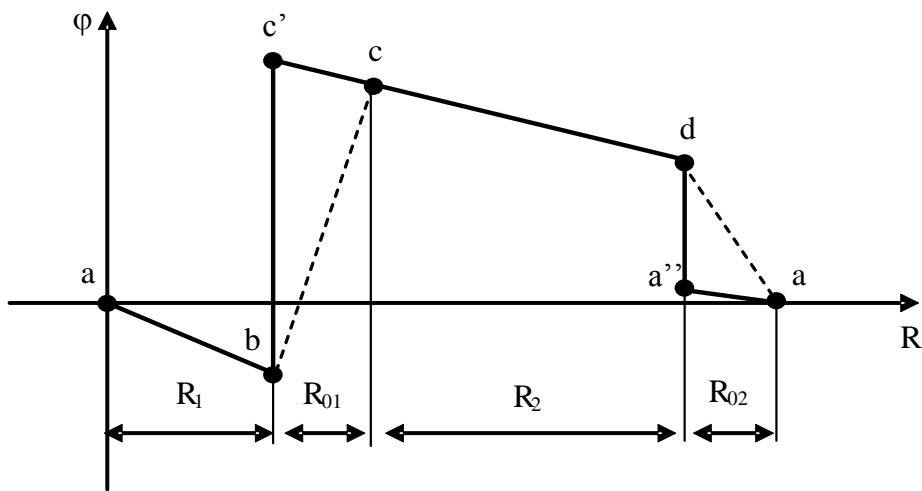


Рисунок 1.2

Якщо розімкнути ключ К (див. рисунок 1.1), то струм у колі $I=0$. Тоді

$$\varphi_b = \varphi_a - R_1 I = 0,$$

$$\varphi_c = \varphi_b + E_1 - R_{01} I = E_1,$$

$$\varphi_d = \varphi_c - R_2 I = E_1,$$

$$\varphi_a = \varphi_d - E_2 - R_{02} I = E_1 - E_2.$$

Потенціальна діаграма набирає вигляду, поданого на рисунку 1.3.

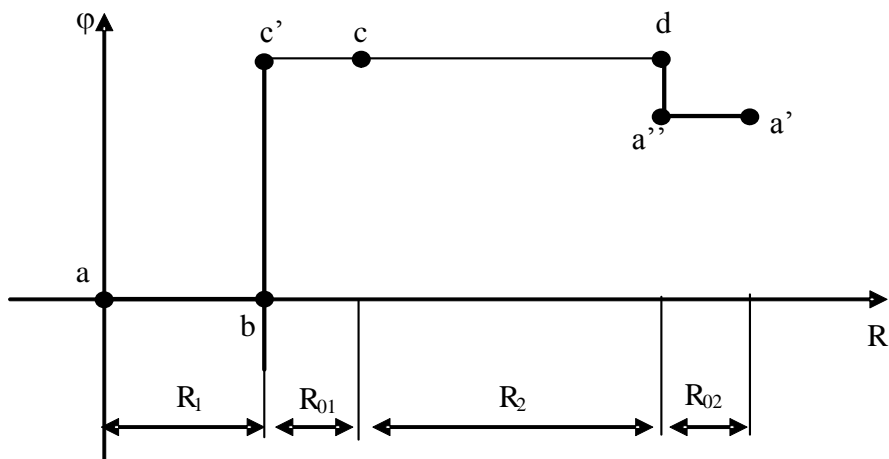


Рисунок 1.3

Зміна потенціалу в розімкненому колі відбувається тільки там, де ввімкнені джерела.

Якщо коло знаходилось під напругою і стався обрив кола, то місце обриву часто визначають за допомогою вольтметра, який по черзі підключають паралельно кожному з елементів, у тому числі паралельно проводам.

2 Підготовка до роботи

2.1 Вивчити теоретичний матеріал з розрахунку нерозгалуженого електричного кола постійного струму та з розподілу потенціалів уздовж контура, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручників.

2.2 Зробити розрахунок електричних кіл постійного струму (рисунки 1.4, 1.5.), тобто обчислити струми та значення потенціалів точок, для чого:

- занести в таблицю 1.2 вихідні дані (з таблиці варіантів);
- записати розрахункові рівняння для обчислення струму та потенціалів точок і зробити розрахунок;
- результати розрахунку занести в таблицю 1.2;
- побудувати потенціальні діаграми;
- вказати межі вимірювання приладів для проведення дослідження розподілу потенціалів.

2.3 Відповісти письмово на такі питання:

- як, користуючись вольтметром, можна визначити величину та знак потенціалу будь-якої точки електричного кола відносно точки, потенціал якої прийнято за нульовий?
- чи зміняться потенціали точок і потенціальна діаграма електричного кола при зворотному напрямку обходу; при зміні полярності одного з джерел?
- як знайти обрив кола, що знаходиться під напругою?

3 Робоче завдання

3.1 Скласти електричне коло за рисунком 1.4.

3.2 Виміряти ЕРС джерела E_1 та встановити значення ЕРС E_2 таким, щоб алгебраїчна сума E_1 і E_2 дорівнювала її значенню, яке було визначено при розрахунку електричних кіл рисунків 1.4 та 1.5.

3.3 Виміряти струм, потенціали точок електричного кола, падіння напруги на приймачах електричної енергії, напругу на затискачах джерел електричного кола.

3.4 За даними вимірювань розрахувати навантажувальні опори $R_6, R_7, R_8, R_{01}, R_{02}$.

3.5 Результати вимірювань і додаткових розрахунків занести в таблиці 1.2 і 1.3.

3.6 Аналогічні дослідження зробити для схеми рисунка 1.5 і занести у відповідні таблиці.

3.7 Електричне коло (рисунок 1.4 або 1.5 – за вказівкою викладача) ввімкнути і за допомогою вольтметра виявити в ньому обрив.

Таблиця 1.1

$E_1, В$	$R_{01}, Ом$	$E_2, В$	$R_{02}, Ом$	$R_6, Ом$	$R_7, Ом$	$R_8, Ом$

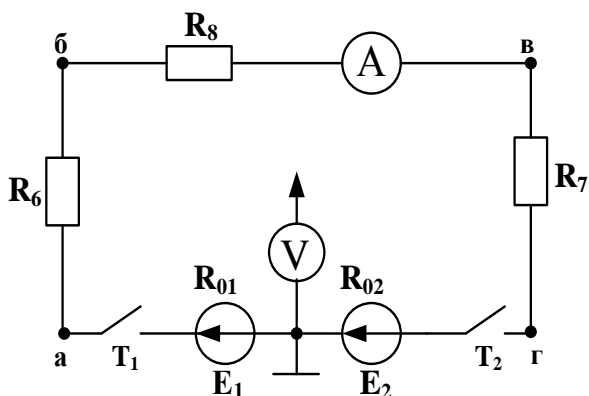


Рисунок 1.4

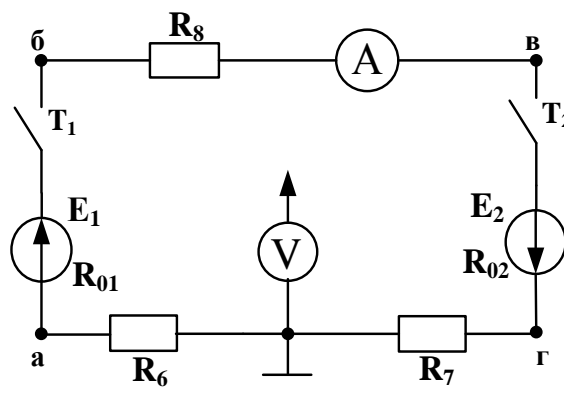


Рисунок 1.5

Таблиця 1.2

Номер схеми	Результати розрахунку				Результати вимірювань			
	$\varphi_a, В$	$\varphi_б, В$	$\varphi_в, В$	$\varphi_г, В$	$\varphi_a, В$	$\varphi_б, В$	$\varphi_в, В$	$\varphi_г, В$
1								
2								

Таблиця 1.3

Но- мер схе- ми	Результати вимірювань								Результати розрахунку				
	I, A	E₁, B	E₂, B	U_{oa}, B	U_{ab}, B	U_{бв}, B	U_{вz}, B	U_{zo}, B	R₆, Ом	R₇, Ом	R₈, Ом	R₀₁, Ом	R₀₂, Ом
1													
2													

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 ЕРС E_1 вимірюють на клеммах “ ± 12 В рег.” лабораторного стенда. Величину E_2 установлюють лабораторним автотрансформатором такою, щоб алгебраїчна сума E_1 та E_2 дорівнювала її значенню, яке було визначено при розрахунку електричних кіл рисунків 1.4 та 1.5.

4.2 Вимірювання напруги джерел здійснюють у режимі холостого ходу ($I = 0$), тобто при розімкненому тумблері T_1 або T_2 .

4.3 Під час складання схеми необхідно використовувати резистори R_6, R_7, R_8 , а також амперметр універсального стенда.

5 Аналіз отриманих результатів

5.1 Порівняти результати попереднього розрахунку з результатами досліду. Якщо є розбіжності – пояснити їх можливі причини.

5.2 Сформулювати загальні висновки з роботи.

5.3 Занести до звіту результати виконання п. 5.1 і 5.2.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ ДВОХ ВУЗЛІВ

Мета роботи: дістати підтвердження застосовності методу двох вузлів до розрахунку лінійних двовузлових кіл шляхом зіставлення результатів експерименту та попереднього розрахунку.

1 Пояснення до роботи

Якщо електричне коло, яке підлягає розрахунку, містить лише два вузли, то найбільш раціональним методом виконання цього розрахунку є модифікований для цього випадку варіант методу вузлових потенціалів, який називають методом двох вузлів. Розглянемо його на прикладі кола, схему якого наведено на рисунку 2.1.

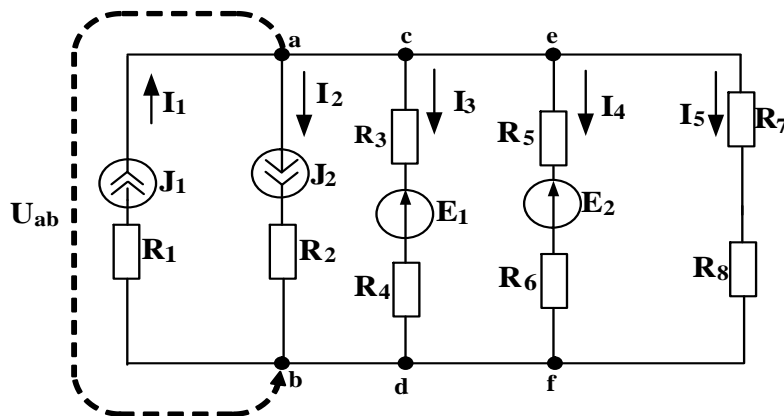


Рисунок 2.1

Очевидно, що потенціали вузлів *a, c, e* дорівнюють один одному так само, як і потенціали вузлів *b, d, f*. Тому напруги між будь-яким з верхніх вузлів і будь-яким з нижніх вузлів дорівнюють одній і тій самій величині, яку ми для конкретності позначимо як U_{ab} . За методом двох вузлів маємо

$$U_{ab} = \frac{J_1 - J_2 + E_1 \cdot G_{34} - E_2 \cdot G_{56}}{G_{34} + G_{56} + G_{78}}, \quad (2.1)$$

$$\text{де } G_{34} = \frac{1}{R_3 + R_4}, G_{56} = \frac{1}{R_5 + R_6}, G_{78} = \frac{1}{R_7 + R_8}.$$

У чисельнику виразу (2.1) доданки мають знак “плюс”, якщо відповідні ідеальні джерела напруги або струму націлені до верхніх вузлів, і знак “мінус” – у протилежному випадку.

Очевидно, що струми I_1 та I_2 від U_{ab} не залежать і дорівнюють відповідно J_1 та J_2 ; решту струмів обчислюємо на базі другого закону Кірхгофа як

$$I_3 = \frac{U_{ab} - E_1}{R_3 + R_4}; I_4 = \frac{U_{ab} + E_2}{R_5 + R_6}; I_5 = \frac{U_{ab}}{R_7 + R_8}.$$

Радимо звернути увагу на те, що опори резисторів R_1 та R_2 , ввімкнених послідовно з ідеальними джерелами струму, не впливають на величину U_{ab} та величини струмів у вітках.

2 Підготовка до роботи

2.1 Вивчити теоретичний матеріал з розрахунку лінійних електричних кіл методом двох вузлів, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручників.

2.2 Дати письмову відповідь на такі питання:

- у яких випадках доцільно використовувати метод двох вузлів?

- яка послідовність розрахунку кола методом двох вузлів?

2.3 Накреслити схему (рисунок 2.2) кола, яке буде використано для дослідної перевірки методу двох вузлів. Вважаючи, що величини всіх опорів та обох ЕРС відомі, записати формули для обчислення струмів I_{R_4} та $I_{R_{13}}$ відповідно в опорах R_4 та R_{13} .

2.4 Накреслити у звіті таблицю 2.1.

3 Робоче завдання

3.1 Виміряти величину E_1 , після чого встановити $E_2 = kE_1$ (коефіцієнт k взяти з таблиці 2.2). Занести величини E_1 та E_2 до таблиці 2.1 у звіті. Занести до неї величини опорів $R_3, R_4, R_7, R_{13}, R_{14}$, взявши їх у таблиці варіантів, яка знаходиться в лабораторії.

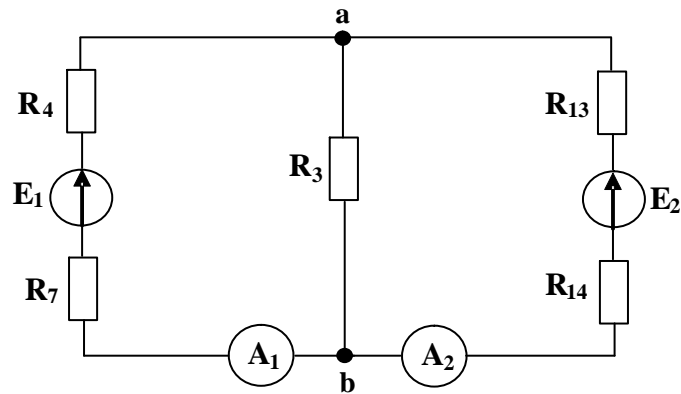


Рисунок 2.2

Таблиця 2.1

E_1 , В	E_2 , В	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_7 , Ом	R_{13} , Ом	R_{14} , Ом		U_{ab} , В	I_{R_4} , А	$I_{R_{13}}$, А
							Розраховано			
							Виміряно			

Таблиця 2.2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8
Величина k	0,63	0,54	1,39	0,80	0,73	0,48	0,84	2,40

3.2 Обчислити величини U_{ab} , I_{R_4} та $I_{R_{13}}$, після чого занести їх у таблицю 2.1 звіту.

3.3 Пред'явити вищевказані результати обчислень викладачеві, який веде дане лабораторне заняття.

3.4 Скласти коло за схемою, поданою на рисунку 2.1, і виміряти величини U_{ab} , I_{R4} та I_{R13} . Занести ці величини до таблиці 2.1 у звіті.

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 При складанні досліджуваного кола необхідно використовувати резистори $R_3, R_4, R_7, R_{13}, R_{14}$ лабораторного стенда. Як клеми джерел напруги з ЕРС E_1 та E_2 слід використати відповідно затискачі “ $\pm 12 \text{ В}$ ” і “ $\pm 12 \text{ В рег.}$ ” цього ж стенда.

4.2 Якщо якийсь з вимірюваних струмів має величину менше $0,3 \text{ А}$, то для забезпечення необхідної точності вимірювань треба у вітці, у якій протікає такий струм, замінити амперметр лабораторного стенда на додатковий амперметр, який має відповідно меншу границю вимірювань.

5 Аналіз отриманих результатів

5.1 Порівняти результати попереднього розрахунку з результатами досліду. Якщо є розбіжності – пояснити їх можливі причини.

5.2 Сформулювати загальні висновки з роботи.

5.3 Занести до звіту результати виконання п. 5.1 та 5.2.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА ТЕОРЕМИ ПРО ЕКВІВАЛЕНТНИЙ ГЕНЕРАТОР (АКТИВНИЙ ДВОПОЛЮСНИК) І ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ВІД АКТИВНОГО ДВОПОЛЮСНИКА ДО ПАСИВНОГО

Мета роботи: визначити параметри активного двополюсника, використовуючи метод еквівалентного генератора; дослідити умови передачі енергії від активного двополюсника до споживача та визначити максимум споживання потужності.

1 Пояснення до роботи

При дослідженні процесів передачі енергії від джерела електричної енергії до споживача необхідно знати струм, напругу та потужність вітки, у якій міститься споживач енергії. Ця вітка, приєднана до складного електричного кола у двох точках (двома затискачами), є пасивним двополюсником.

Решта цього електричного кола з некомпенсованим джерелом електричної енергії розглядається як активний двополюсник відносно зазначеної вітки з двома затискачами.

При розрахунку активний двополюсник, за теоремою про еквівалентний генератор, можна замінити еквівалентним генератором, ЕРС якого дорівнює напрузі холостого ходу на затискачах виділеної вітки, а внутрішній опір дорівнює вхідному опору двополюсника. Метод, застосований при цій заміні, прийнято називати методом активного двополюсника, або методом еквівалентного генератора, або методом холостого ходу та короткого замикання.

Таким чином, будь-яке складне електричне коло можна привести до вигляду рисунка 3.1.

Струм у цьому колі визначається залежністю

$$I = \frac{U_{авхх}}{R_{вх} + R_{н}}$$

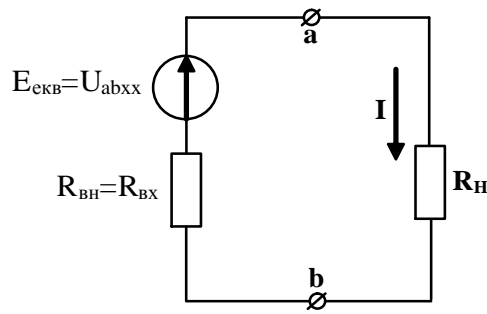


Рисунок 3.1

Отже, розрахунок зводиться до розв'язання двох задач:

- 1) знаходження напруги на затискачах розімкненої вітки “*ав*”;
- 2) визначення вхідного опору $R_{вх}$ усього кола відносно затискачів *а – в* при вимкнених джерелах енергії.

У складних колах основне ускладнення викликає знаходження вхідного опору. Іноді доводиться, перш ніж “згорнути” схему, використати методи перетворення схеми еквівалентної “зірки” у “трикутник” або навпаки (так, наприклад, у схемі рисунка 3.2 при закороченому джерелі E опори R_{13}, R_9, R_{10} , з'єднані “трикутником”, доцільно замінити еквівалентною “зіркою”). Знаходження вхідного опору значно спрощується на базі дослідних даних. Для цього здійснюють досліди холостого ходу та короткого замикання.

Якщо $R_н = 0$ (рисунок 3.1), то має місце режим короткого замикання, а струм у цьому колі $I_{к.з} = \frac{U_{авхх}}{R_{вх}}$, звідки $R_{вх} = \frac{U_{авхх}}{I_{к.з}}$.

Отже для визначення $R_{вх}$ необхідно виміряти напругу холостого ходу на затискачах розімкненої вітки і струм короткого замикання в цій же вітці.

Для визначення максимуму споживаної приймачем потужності необхідно досліджувати зміну даної потужності залежно від величини навантаження. Величини $U_{авхх}$ і $R_{вх}$ отриманої схеми залишаються постійними, а $R_н$ набуває будь-

яких значень (від 0 до ∞). У цьому випадку схема працює в різних режимах:

$R_H = 0, I = I_{max}$ – режим короткого замикання;

$R_H = \infty, I = 0$ – режим холостого ходу;

$R_H = R_{вх}$ – режим узгодженого навантаження.

Струм, який протікає в еквівалентній схемі,

$$I = \frac{U_{авхх}}{R_{вх} + R_H}.$$

Потужність, що споживається навантаженням,

$$P_2 = R_H I^2 = \frac{R_H U_{авхх}^2}{(R_{вх} + R_H)^2}.$$

Для того щоб визначити умови, за яких P_2 досягає максимальної величини, необхідно знайти першу похідну від P_2 (у зв'язку з тим що $P_2 = P_H I^2$, де R_H і I – змінні, можна брати похідну або по R_H , або по I):

$$\frac{dP_2}{dR_H} = \frac{(R_{вх} + R_H)^2 - 2R_H(R_{вх} + R_H)}{(R_{вх} + R_H)^4} = 0,$$

звідки випливає, що $R_{вх} = R_H$. За цієї умови в навантаженні буде виділено максимальну потужність.

Тоді $P_{2max} = \frac{U_{авхх}^2}{4R_{вх}}.$

Потужність P_1 джерела визначається таким співвідношенням:

$$P_1 = U_{ав\ x\ x} I = \frac{U_{ав\ x\ x}^2}{R_{вх} + R_n} = \frac{U_{ав\ x\ x}^2}{2R_{вх}}.$$

Отже, потужність P_1 у 2 рази більша за P_2 в режимі узгодженого навантаження. ККД η активного двополюсника в узгодженому режимі

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2}{2P_2} = 0,5.$$

Такий режим використовують у тому разі, коли потрібно отримати найбільшу потужність у навантаженні, а питання втрат потужності не має суттєвого значення. Таким чином, в установках автоматики та електрозв'язку, де потужності малі і стоїть завдання максимальної передачі потужності від джерела живлення до виконавчих механізмів, найбільш прийнятним є режим узгодженого навантаження.

2 Підготовка до роботи

2.1 Вивчити теоретичний матеріал з розрахунку електричного кола методом еквівалентного генератора, а також з передачі енергії від активного двополюсника до навантаження, використовуючи конспект лекції та відповідні розділи підручників.

2.2 Накреслити схему (рисунок 3.2) для дослідження процесу передачі енергії від активного двополюсника до пасивного.

2.3 Використовуючи дані таблиці варіантів, записати в таблицю 3.1 величини опорів резисторів схеми і напруги джерел живлення.

2.4 Виділити у схемі активний і пасивний двополюсники відносно вхідних затискачів “*a*”, “*b*” та накреслити еквівалентну схему (на основі теореми про еквівалентний генератор).

2.5 Провести розрахунок методом активного двополюсника параметрів еквівалентного генератора $E_{ек\ в} = U_{ав\ x\ x}$ і $R_{вн} = R_{вх}$.

2.6 Визначити струм пасивного двополюсника в узгодженому режимі та в режимі короткого замикання:

$$I_{з.н} = \frac{U_{авхх}}{2R_{вх}}, \quad I_{к.з} = \frac{U_{авхх}}{R_{вх}}.$$

2.7 Дані розрахунку п. 2.5 та 2.6 занести в таблицю 3.2.

2.8 Записати розрахункові формули для таких величин (якщо відомі $I, U_{ав}, U_{авхх}$): P_1 – потужність, що розвиває джерело; P_2 – потужність, що виділяється в навантаженні; ΔP – втрати потужності; ΔU – падіння напруги на внутрішньому опорі еквівалентного генератора; η – коефіцієнт корисної дії електричного кола; R_H – опір навантаження.

2.9 Вказати мету вимірювання приладів, що необхідні для даної роботи.

2.10 Відповісти письмово на питання:

– у яких випадках доцільно використовувати метод еквівалентного генератора?

– як можна дослідно визначити параметри схеми заміщення активного двополюсника?

– яка умова споживання максимальної потужності пасивним двополюсником?

– як ККД залежить від R_H (вивести формулу)?

– коли доцільна робота схеми в узгодженому режимі, а коли ні?

3 Робоче завдання

3.1 Зібрати схему за рисунком 3.2.

3.2 Встановити рукояткою лабораторного автотрансформатора напругу на затискачах **d** – **e** (джерело **E**), яку вказано в таблиці варіантів, і протягом усього досліду зберігати її незмінною.

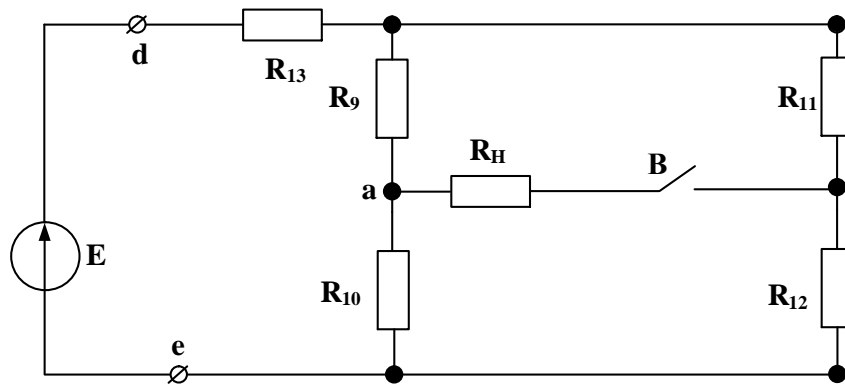


Рисунок 3.2

3.3 Провести дослід холостого ходу, вимірюючи напругу $U_{авхх}$ при вимкненому опорі R_H . Результати вимірювань занести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.1

E , В	R_9 , Ом	R_{10} , Ом	R_{11} , Ом	R_{12} , Ом	R_{13} , Ом	R_H , Ом

3.4 Провести дослід короткого замикання, вимірюючи струм $I_{ав к.з.}$ при закороченому опорі R_H . Результати занести до таблиці 3.2.

3.5 На основі дослідних даних холостого ходу і короткого замикання визначити $R_{вх}$, а на основі теореми про еквівалентний генератор розрахувати з дослідних даних і за відомим опором $R_H = R_{вх}$ струм I_H .

3.6 Порівняти ці величини з розрахунковими, а величину струму I_H з вимірюваною в режимі узгодженого навантаження. Результати занести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахункові дані				Дослідні дані				Розрахункові дані (за дослідними)	
$U_{авхх},$ В	$R_{вх},$ Ом	$I_{с.н.},$ А	$I_{к.з.},$ А	$E,$ В	$U_{авхх},$ В	$I_{к.з.},$ А	$I_{с.н.},$ А	$R_{вх},$ Ом	$I_{н},$ А

3.7 Плавно змінюючи навантаження від холостого ходу (тумблер “В” розімкнено і опір навантаження R_H максимальний) до короткого замикання (тумблер “В” замкнено і опір $R_H = 0$), виміряти струм I_H у вітці $a-b$ та напругу $U_{ав}$ на кінцях вітки (затискачі “а” та “в”). Зняти 10–12 точок.

Примітка. Змінюючи опір навантаження, встановити опір $R_H = R_{вх}$ і таким чином провести вимірювання в режимі узгодженого навантаження.

Результати вимірювань занести до таблиці 3.3.

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 При складанні електричного кола необхідно використовувати тумблер “В”, резистори $R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}, R_{13}$ лабораторного стенда. Напругу подавати від джерела постійного струму “ $\pm 12 \text{ В}_{\text{рег}}$ ”.

4.2 Як змінне навантаження R_H взяти на лабораторному стенді два ступінчастих опори $0 - 70 \text{ Ом}$ та $0 - 7 \text{ Ом}$, з’єднаних послідовно.

4.3 Для вимірювання струму I_H і напруги $U_{ав}$ підключити амперметр і вольтметр на відповідні межі вимірювання за рисунком 3.3.

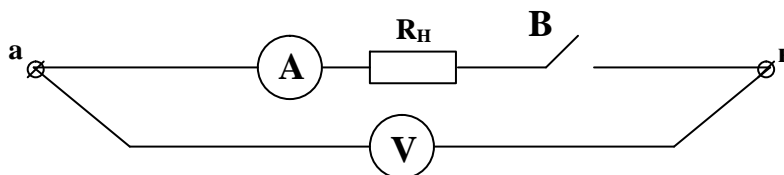


Рисунок 3.3

Таблиця 3.3

Номер досліджу	Виміряти			Обчислити						
	$E_{екв}$ В	$U_{ав}$ В	I_N А	P_1 Вт	P_2 Вт	ΔP Вт	ΔU В	η –	$R_{вт} = R_{вх}$ Ом	$R_{вт} / R_H$ –
Холостий хід										
1										
2										
3										
4										
·										
·										
·										
·										
12										
Коротке замикання										

5 Аналіз отриманих результатів

5.1 Порівняти результати розрахунку таблиці 3.2 з дослідними даними.

5.2 На основі результатів вимірювань провести розрахунки, необхідні для заповнення таблиці 3.3.

5.3 За даними таблиці 3.3 побудувати в одних осях координат такі криві:

а) $U_{ав} = f_1(I_H), P_1 = f_2(I_H), P_2 = f_3(I_H), \eta = f_4(I_H)$;

б) $P_2 = f_5\left(\frac{R_{вх}}{R_H}\right), \eta = f_6\left(\frac{R_{вн}}{R_H}\right)$.

5.4 Проаналізувати криві п. 5.3 і зробити висновки щодо впливу навантаження на напругу на затискачах, падіння напруги і втрати потужності на внутрішньому опорі активного двополюсника та відносно його ККД.

5.5 За дослідною кривою $P_2 = f_5\left(\frac{R_{вх}}{R_H}\right)$ визначити умови споживання максимуму потужності навантаженням. Отриманий результат підтвердити аналітично.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи:

а) дослідним шляхом отримати вольт-амперні характеристики нелінійних елементів кола постійного струму;

б) експериментально перевірити графічний метод розрахунку нелінійних електричних кіл постійного струму при послідовному, паралельному та змішаному з'єднанні нелінійних елементів.

1 Пояснення до роботи

Нелінійний елемент (НЕ) кола постійного струму – це такий елемент, опір якого залежить від величини та (або) напрямку струму через нього та напруги на ньому. До НЕ відносять, наприклад, напівпровідникові, іонні, вакуумні прилади, електричну дугу, лампу розжарювання.

Найважливішою характеристикою НЕ є його вольт-амперна характеристика (ВАХ), що являє собою залежність $I(U)$ між струмом через НЕ та напругою на його затискачах.

Залежність $I(U)$ будь-якого пасивного елемента електричного кола підпорядковується закону Ома $I = U / R$. Для лінійних опорів графік цієї залежності – пряма лінія. Оскільки в НЕ зі зміною напруги (або струму) опір теж змінюється, то для них графік залежності $I(U)$ відрізняється від прямої лінії.

Властивості нелінійного опору можуть бути охарактеризовані не тільки його ВАХ, але й залежностями його статичного та диференціального опорів від струму.

Статичний опір R_{CT} характеризує НЕ при незмінних струмі α та напрузі в кожній конкретній точці ВАХ. Він є відношенням напруги на НЕ до струму через НЕ в цій точці (див. рисунок 4.1):

$$R_{CT} = U_A / I_A.$$

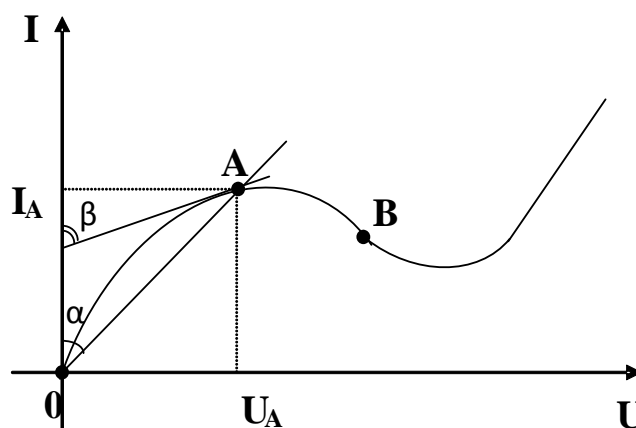


Рисунок 4.1

Статичний опір чисельно дорівнює величині $\frac{m_U}{m_I} \cdot \operatorname{tg} \alpha$, де m_U та m_I – масштаби по осях U та I відповідно, а кут α є кутом між січною OA та віссю I (див. рисунок 4.1). Величина R_{CT} завжди більша за нуль.

Диференціальний опір R_D характеризує зв'язок між приростом напруги та викликаним ним приростом струму через НЕ в кожній конкретній точці ВАХ (див. рисунок 4.1):

$$R_D = \lim_{\Delta U \rightarrow 0} \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \left. \frac{dU}{dI} \right|_{U=U_A}.$$

Диференціальний опір чисельно дорівнює величині $\frac{m_U}{m_I} \cdot \operatorname{tg} \beta$, де кут β є кутом між дотичною VA та віссю I . Величина R_D може бути як більшою за нуль (наприклад, у точці A на рисунку 4.1), так і меншою за нього (наприклад, у точці B), а також може дорівнювати нулю.

Нелінійним електричним колом називають таке коло, яке містить хоча б один НЕ. Нелінійні електричні кола (НК) підпорядковуються як закону Ома, так і законам Кірхгофа. Однак розрахунок НК викликає більші труднощі, ніж лінійних кіл, оскільки в НК струми та напруги зв'язані нелінійними залежностями (наприклад, такою, яку показано на рисунку 4.1). З огляду на останній фактор, суто аналітичні методи застосовні лише для розрахунку найпростіших НК. Тому найбільше розповсюдження при розрахунку НК набули чисельні, графоаналітичні та графічні методи, що базуються на використанні ВАХ НЕ у графічній або табличній формі, а також на законах Ома та Кірхгофа.

У даній роботі треба експериментально перевірити графічний метод розрахунку НК, використавши як НЕ баретер і селеновий елемент.

Баретер являє собою балон, наповнений воднем (під тиском у кілька разів меншим за атмосферний), у який вміщено сталеву або вольфрамову нитку, кінці якої виведено через балон до

затискачів. ВАХ баретера симетрична і має ділянку, на якій струм залишається майже постійним при зміні напруги в досить широких межах. Це обумовило використання баретера як стабілізатора струму в низці пристроїв.

Селеновий елемент є конструктивним різновидом напівпровідникового діода, отже ВАХ його несиметрична, і його опори $R_{ст}$ та R_d досить невеликі при позитивній напрузі між його анодом і катодом і дуже великі, якщо ця напруга негативна.

2 Підготовка до роботи

2.1 Вивчити теоретичний матеріал з нелінійних електричних кіл постійного струму, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручників.

2.2 Дати письмову відповідь на такі питання:

- що таке нелінійний елемент електричного кола?
- що таке нелінійне електричне коло?
- що таке статичний і диференціальний опори нелінійного елемента і як їх обчислити на практиці?
- на яких законах базується розрахунок нелінійного кола постійного струму при послідовному з'єднанні його елементів; при паралельному з'єднанні його елементів; при змішаному з'єднанні його елементів?

2.3 Використовуючи наведену на рисунку 4.2 схему як базову, накреслити схеми, які слід застосовувати для зняття вольт-амперних характеристик таких кіл:

- а) баретер;
- б) селеновий елемент;
- в) лінійний резистор;
- г) послідовне з'єднання баретера та селенового елемента;
- д) паралельне з'єднання баретера та селенового елемента;
- е) мішане з'єднання баретера, селенового елемента та лінійного резистора за умови паралельного з'єднання двох перших елементів.

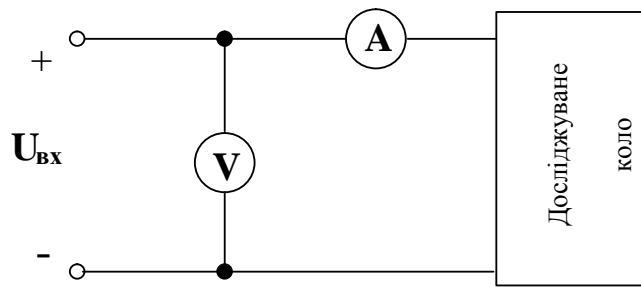


Рисунок 4.2

2.4 Накреслити у звіті три таблиці (таблиці 1, 2, 3) за зразком таблиці 4.1 для занесення в них вольт-амперних характеристик баретера, селенового елемента та лінійного резистора. Накреслити також таблицю 4 за зразком таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Вольт-амперна характеристика _____
назва елемента

U, В								
I, А								

Таблиця 4.2 – Режими роботи досліджуваних кіл

Послідовне з'єднання баретера і селенового елемента					Змішане з'єднання баретера, селенового елемента і резистора			
Виміряно	U_{VX}, В	I, А	U_Б, В	U_С, В	U_{VX}, В	I, А	I_Б, А	I_С, А
Розраховано								

2.5 Як, знаючи схему з'єднання елементів кола, їх вольт-амперні характеристики і вхідну напругу або вхідний струм кола, шляхом розрахунку знайти напругу і струм у кожному з елементів цього кола (для кожного з п'яти досліджуваних кіл).

3 Робоче завдання

3.1 Зняти ВАХ баретера, селенового елемента і лінійного резистора. Результати занести відповідно до таблиць 1, 2, 3 звіту.

3.2 Послідовно з'єднати баретер, селеновий елемент і амперметр. Встановити величину $U_{ВХ}$ вхідної напруги за вказівкою викладача, що проводить дане заняття, і виміряти струм I у колі та напруги U_B на баретері і U_C на селеновому елементі. Результати вимірювань занести до таблиці 4 звіту.

3.3 Паралельно з'єднати баретер і селеновий елемент, ввімкнувши в кожен віток свій амперметр. Послідовно з цим колом ввімкнути змінний резистор опором $R = 0...70 \text{ Ом}$ (утворивши таким чином змішане з'єднання елементів), амперметр і джерело живлення. Встановити величину $U_{ВХ}$ вхідної напруги і величину R за вказівкою викладача, який проводить дане заняття, і виміряти струм I в нерозгалуженій ділянці кола, струм I_B баретера і струм I_C селенового елемента. Результати вимірювань занести до таблиці 4 звіту.

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 Як клема джерела напруги $U_{ВХ}$ слід використовувати затискачі “ $\pm 12 \text{ В рел.}$ ” лабораторного стенда.

4.2 Якщо вимірюваний струм має величину менше $0,3 \text{ А}$, то для забезпечення необхідної точності вимірювань треба замість амперметра лабораторного стенда підключити до досліджуваного кола додатковий амперметр, який має відповідно меншу границю вимірювань.

5 Аналіз отриманих результатів

5.1 Побудувати графіки ВАХ баретера, селенового елемента і лінійного резистора, використавши дані таблиць 1, 2, 3 звіту. Включити ці графіки до звіту.

Примітка – масштаби по відповідних осях усіх графіків повинні бути однаковими, це стосується всіх пунктів розділу 5.

5.2 На базі графіків, побудованих згідно за п. 5.1, і величин U_{BX} , занесених до таблиці 4 звіту, визначити величини всіх інших напруг і струмів, включених до цієї таблиці 4, результати розрахунків внести до рядка "Розраховано". Необхідні графічні побудовання виконати на окремих графіках, які слід включити до звіту.

5.3 Зробити висновки щодо міри та можливих причин розбіжності між результатами безпосередніх вимірювань і результатами розрахунків і занести ці висновки до звіту.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ ТА ПАРАЛЕЛЬНОМУ З'ЄДНАННІ РЕЗИСТОРА З КОТУШКОЮ ІНДУКТИВНОСТІ АБО КОНДЕНСАТОРОМ

Мета роботи: визначити параметри електричного кола та експериментально перевірити основні закони кіл змінного струму при послідовному і паралельному з'єднанні елементів.

1 Пояснення до роботи

При аналізі та розрахунку електричних кіл змінного струму необхідно зважати не тільки на активні опори, що входять до них, але також і на індуктивності та ємності цих елементів. При цьому поняття "опір" безпосередньо пов'язано з витратою енергії, тобто з необоротним процесом поглинання електромагнітної енергії (нагрівання, механічна робота, випромінення і т. ін.). Під терміном "опір" розуміють також кількісну оцінку величини R , що дорівнює відношенню падіння напруги на елементі кола до струму, що проходить через цей елемент:

$$R = \frac{u}{i}.$$

Термін "індуктивність" і відповідне до нього умовне позначення L приймаються для позначення як самого елемента кола, здатного накопичувати енергію магнітного поля, так і для кількісної оцінки відношення потокозчеплення самоіндукції до струму в даному елементі:

$$L = \frac{\psi}{i}.$$

Потокозчеплення самоіндукції – сума добутків магнітних потоків, обумовлених тільки струмом у даному колі, на кількість витків елемента L , з яким вони зчеплені. Якщо всі витки пронизані одним і тим самим магнітним потоком, то потокозчеплення дорівнює добутку магнітного потоку на кількість витків. Зміна потокозчеплення самоіндукції в часі викликає електрорушійну силу (ЕРС) самоіндукції

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt}.$$

Величина $u_L = -e_L = \frac{d\psi}{dt} = w \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$ (якщо L не залежить від i) називається падінням напруги на індуктивності.

Термін "ємність" і відповідне до нього літерне позначення C приймають для позначення як самого елемента кола, так і для кількісної оцінки відношення заряду до напруги на цьому елементі:

$$C = \frac{q}{u_C}.$$

ЕРС R самоіндукції та напруга на ємності впливають на величини струмів, напруг і потужностей в електричному колі. Елементи, що мають тільки активний, індуктивний або ємнісний опір (рисунки 5.1, 5.2, 5.3), називаються ідеальними (котушка індуктивності та конденсатор без активних витрат, резистор без паразитних індуктивності або ємності). У протилежному випадку

елементи кола змінного струму називаються дисипативними або елементами з втратами.

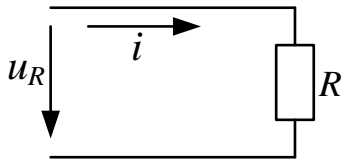


Рисунок 5.1

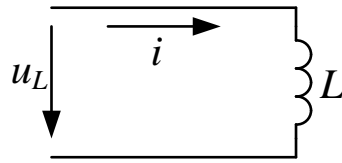


Рисунок 5.2

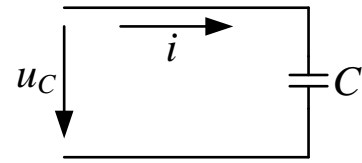


Рисунок 5.3

За теорією змінного струму, якщо струм в ідеалізованих елементах R , L , C змінюється за законом $i = I_m \sin \omega t$, то напруга на них буде визначатися виразами

$$u_R = U_{mR} \sin \omega t; \quad u_L = U_{mL} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); \quad u_C = U_{mC} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}),$$

де $U_{mR} = I_m R$, $U_{mL} = I_m X_L$, $U_{mC} = I_m X_C$ – співвідношення між амплітудними значеннями струмів і напруг;

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ – активний опір;}$$

$$X_L = \omega L = 2 \pi f L \text{ – індуктивний опір;}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \pi f C} \text{ – ємнісний опір.}$$

Співвідношення між діючими значеннями струмів і напруг

$$U_R = IR; \quad U_L = IX_L; \quad U_C = IX_C.$$

Реальна котушка індуктивності має активний опір R (опір провідника обмотки) та індуктивність L . Її схема заміщення має вигляд, який зображено на рисунку 5.4:

- а) при постійному струмі;
- б) на низьких частотах;
- в) на високих частотах.

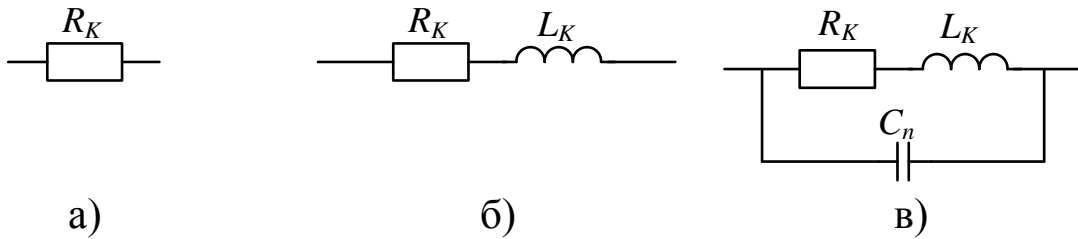


Рисунок 5.4

За другим законом Кірхгофа, при підключенні котушки індуктивності до джерела змінного струму промислової частоти маємо

$$\underline{U}_K = \underline{U}_R + \underline{U}_L.$$

Векторна діаграма для такої котушки подана на рисунку 5.5.

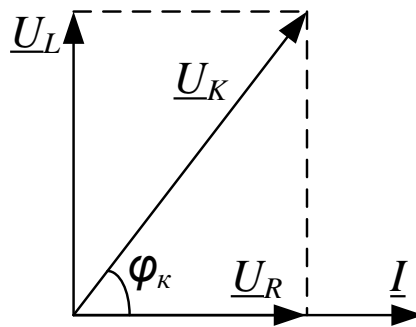


Рисунок 5.5

$$\text{Тут } U_K = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R_K^2 + X_L^2} = IZ_K; \quad \underline{U}_K = I\underline{Z}_K,$$

де \underline{Z}_K – комплексний опір котушки, $\underline{Z}_K = \sqrt{R_K^2 + X_L^2} e^{j \arctg \frac{X_L}{R_K}}$.

Коефіцієнт потужності $\cos \varphi = \frac{U_R}{U_K} = \frac{R_K}{Z_K} = \frac{P_K}{S_K}$, де

$P_K = I^2 r_K$ – активна, а $S_K = U_K I = I^2 Z_K$ – повна потужність, що її споживає котушка.

Конденсатори також є дисипативними ємнісними елементами, у яких внаслідок деякої активної провідності діелектрика за рахунок струму провідності між обкладками

виникають теплові витрати, що зростають зі збільшенням частоти. На промисловій частоті $f=50$ Гц з достатньою для практичних розрахунків точністю конденсатор можна вважати ідеальним елементом.

При послідовному з'єднанні елементів r , L та C залежність між діючими значеннями синусоїдального струму і напруги та параметрами кола встановлюється співвідношенням

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{Z}.$$

При послідовному з'єднанні n елементів на ділянці кола активний опір цієї ділянки дорівнює сумі активних опорів елементів:

$$R = \sum_{K=1}^N R_K.$$

Реактивний опір такої ділянки кола дорівнює алгебраїчній сумі реактивних опорів елементів:

$$X = X_{LK} - X_C = \sum_{K=1}^N X_{LK} - \sum_{P=1}^M X_{CP}.$$

Тоді повний опір $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$.

Кут зсуву фаз між струмом і напругою, прикладеною до такої ділянки кола,

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

При паралельному з'єднанні елементів кола R , L та C та прикладеній до кола синусоїдальній напрузі діюче значення струму в нерозгалуженій частині кола дорівнює

$$I = U \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = UY,$$

де $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$ – повна провідність кола, що розглядається;

G – активна провідність;

B_L – індуктивна провідність;

B_C – ємнісна провідність;

$B = B_L - B_C$ – еквівалентна реактивна провідність кола.

Зв'язок між опорами та провідністю ділянки кола встановлюється такими співвідношеннями:

$$Y = \frac{1}{Z}; \quad G = \frac{R}{R^2 + X^2} = \frac{R}{Z^2}; \quad B = \frac{X}{R^2 + X^2} = \frac{X}{Z^2};$$
$$Z = \frac{1}{Y}; \quad R = \frac{G}{G^2 + B^2} = \frac{G}{Y^2}; \quad X = \frac{B}{G^2 + B^2} = \frac{B}{Y^2}.$$

Кут зсуву між напругою U і струмом I визначається співвідношенням

$$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{R} = \arctg \frac{B}{R}.$$

2 Підготовка до роботи

2.1 Вивчити теоретичний матеріал про еквівалентні параметри електричного кола змінного струму, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручників.

2.2 Відповісти письмово на такі питання:

- який фізичний зміст понять "індуктивний опір", "ємнісний опір"?

- як розрахувати еквівалентний активний, реактивний і повний опори двополюсника при послідовному з'єднанні елементів?

- як розраховуються еквівалентні активна, реактивна та повна провідності двополюсника при паралельному з'єднанні елементів?

- як з показів амперметра, вольтметра та ватметра визначити параметри котушки, резистора, конденсатора?

- який зв'язок між еквівалентними опорами та провідностями ділянки кола при паралельному з'єднанні елементів?

3 Робоче завдання

3.1 Скласти робоче електричне коло за рисунком 5, 6.

3.2 Після перевірки правильності зібраної схеми керівником подати на її вхід задану напругу в межах вказаного джерела.

3.3 За таблицею 5.1 провести вимірювання U, I, P для котушки індуктивності, резистора та конденсатора, по черзі підключаючи їх до затискачів а-в базового робочого кола. Значення струму в усіх дослідах підтримувати постійним.

3.4 За даними вимірювань обчислити параметри всіх елементів кола. Результати розрахунків занести в таблицю 5.1.

3.5 Виконати послідовне з'єднання котушки індуктивності та резистора і підключити дану вітку до затискачів а-в базового робочого кола. Після перевірки схеми викладачем провести вимірювання електричних величин, вказаних у таблиці 5.2. На підставі результатів вимірювань визначити еквівалентні параметри двополюсника. Дані вимірювань і результати розрахунку занести в таблицю 5.2.

3.6 Замінити котушку індуктивності конденсатором і виконати ті самі дії та розрахунки, що і в п. 3.5. Одержані результати занести в таблицю 5.2.

3.7 Виконати паралельне з'єднання котушки індуктивності та змінного резистора і підключити отриманий двополюсник до затискачів а-в базової схеми. Виконати вимірювання електричних величин, що вказані в таблиці 5.3. Визначити еквівалентні параметри досліджуваного двополюсника на базі вимірювань. Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 5.3.

3.8 Замінити котушку індуктивності конденсатором, виконати ті самі дії, що в п. 3.7, для одного значення опору

резистора. Визначити еквівалентні параметри двополюсника. Результати вимірювань і розрахунків занести в таблицю 5.3.

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 При виконанні даної роботи керуватися загальними вимогами щодо виконання лабораторної роботи на універсальному лабораторному стенді "Теоретичні основи електротехніки", суворо дотримуючись техніки безпеки. Усі перемикання в електричній схемі, необхідні під час виконання роботи, виконувати при вимкненому джерелі живлення.

4.2 Для проведення дослідів необхідно використовувати підносну котушку індуктивності, змінний резистор і конденсатор змінної ємності, що розташовані на лабораторному стенді, $R = 0 \div 70 \text{ Ом}$, $C = 0 \div 140 \text{ мкФ}$.

4.3 Щоб уникнути виходу з ладу котушки індуктивності, з'єднати обмотки котушки послідовно, узгоджено, при цьому струм у колі встановлювати не більшим 1,5 А.

4.4 Живлення робочої схеми здійснювати від джерела "~36 В рег." лабораторного стенда.

5 Аналіз отриманих результатів

5.1 За параметрами котушки індуктивності та резистора визначити шляхом розрахунку еквівалентні параметри двополюсника при послідовному з'єднанні цих елементів. Результати розрахунку занести в таблицю 5.2 та порівняти з п. 3.6 робочого завдання.

5.2 Аналогічний розрахунок виконати для послідовного з'єднання конденсатора та резистора. Результати розрахунку занести в таблицю 5.2 та порівняти з п. 3.7 робочого завдання.

5.3 За параметрами котушки індуктивності та резистора визначити шляхом розрахунку еквівалентні параметри двополюсника при паралельному з'єднанні цих елементів (для одного значення опору резистора). Результати розрахунку занести в таблицю 5.3 та порівняти з п. 3.8 робочого завдання.

5.4 Аналогічний розрахунок провести для паралельного з'єднання конденсатора та резистора. Результати розрахунку занести в таблицю 5.3 та порівняти з п. 3.9 робочого завдання.

5.5 Побудувати векторні діаграми струмів і напруг при послідовному та паралельному з'єднанні елементів R, L та R, C .

5.6 Проаналізувати зміну параметрів двополюсника при паралельному з'єднанні котушки та змінного резистора. Зробити висновки щодо впливу активної провідності вітки з опором на параметри всього кола.

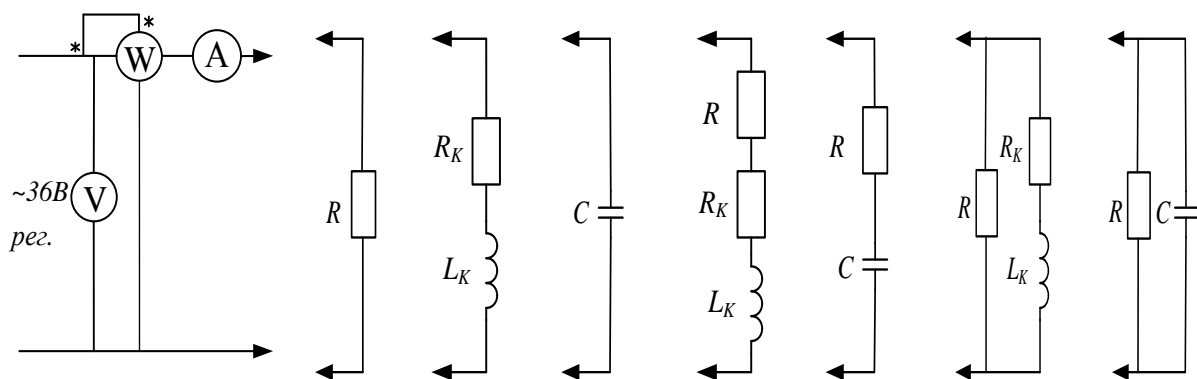


Рисунок 5.6

Таблиця 5.1

Елемент кола	Результати вимірювань			Результати обчислень							
	I, А	U, В	P, Вт	R, Ом	X _L , Ом	Z, Ом	φ	G, Ом	B, Ом	Y, Ом	cos φ
Резистор											
Котушка індуктивності											
Конденсатор											

Таблиця 5.2

З'єднання елементів	Вид даних	Вимірювання			Обчислення			
		I, А	U, В	P, Вт	R _c , Ом	X _c , Ом	Z _c , Ом	cos φ
Послідовне з'єднання котушки та резистора	За відомими параметрами елементів							
	На базі вимірювань							
Послідовне з'єднання конденсатора та резистора	За відомими параметрами елементів							
	На базі вимірювань							

Таблиця 5.3

З'єднання елементів	Вид даних	Вимірювання			Обчислення			
		I, А	U, В	P, Вт	G, Ом	B, Ом	Y, Ом	cos φ
Паралельне з'єднання котушки та резистора	За відомими параметрами елементів							
	На базі вимірювань							
Паралельне з'єднання конденсатора та резистора	За відомими параметрами елементів							
	На базі вимірювань							

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛА ПРИ ПОСЛІДОВНОМУ З'ЄДНАННІ ІНДУКТИВНОГО І ЄМНІСНОГО ЕЛЕМЕНТІВ (РЕЗОНАНС НАПРУГ)

Мета роботи:

- 1) ознайомитися з явищем резонансу, що виникає в нерозгалуженому колі, що містить котушку індуктивності і конденсатор (послідовний контур);
- 2) умовою виникнення резонансу в колі та її перевіркою в лабораторних умовах;
- 3) основними аналітичними співвідношеннями при резонансі, можливістю їх експериментальної перевірки.

1 Пояснення до роботи

Електричним резонансом прийнято називати такий режим роботи електричного кола (двополюсника), який складається з реактивних елементів (індуктивності та ємності), коли вхідний опір кола є чисто активним. Напряга і струм на вході кола при цьому співпадають за фазою.

Умова резонансу для кола, зображеного на рисунку 6.1,

$$X_{\omega_0} = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0.$$

Резонанс може бути одержаний зміною однієї з трьох величин L, C, ω , значення яких для даного режиму

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

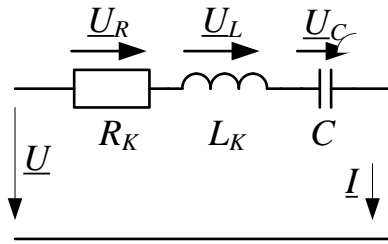


Рисунок 6.1

Повний опір Z кола при резонансі напруг мінімальний

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R,$$

а струм I та потужність P сягають найбільших значень.

З рівності $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ випливає визначення резонансної частоти $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

Відповідний до режиму резонансу реактивний опір котушки та конденсатора називають хвильовим (характеристичним) опором контура

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

При резонансі напруга на індуктивності дорівнює за величиною напрузі на ємності

$$U_L = U_C = \omega_0 L \cdot I_0 = \omega_0 L \frac{U}{R} = \frac{\rho}{R} U$$

та в $\frac{\rho}{R}$ разів перевищує напругу на вході кола. Оскільки в контурі загалом $\rho \gg R$, то $U_L = U_C \gg U_0$.

Величину $Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$ називають добротністю резонансного контура.

Величина, зворотна добротності, $a = \frac{1}{Q}$ називається затуханням.

Векторна діаграма кола в режимі резонансу напруг має вигляд, показаний на рисунку 6.2. Реактивні напруги повністю компенсують одна одну, напруга \underline{U} на вході кола мінімальна, активна, співпадає за фазою зі струмом \underline{I}_0 .

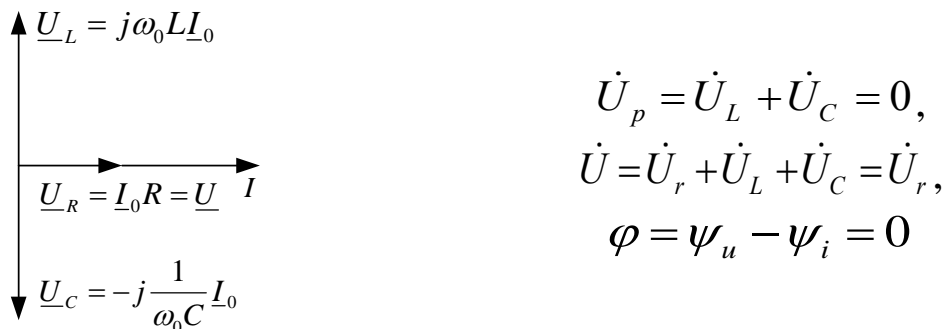


Рисунок 6.2

Резонансні характеристики будуються на базі таких виразів:

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}; \\ U_L &= \frac{U \omega L}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}; \\ U_C &= \frac{U}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}. \end{aligned}$$

Дослідження U_C та U_L на екстремум показують, що максимальне значення U_C має місце при $\omega_c < \omega_0$, а U_L – при $\omega_L > \omega_0$. При цьому $U_C(\omega_c) = U_L(\omega_L)$. На рисунку 6.3 зображені векторні діаграми напруг і струмів для наведених вище випадків.

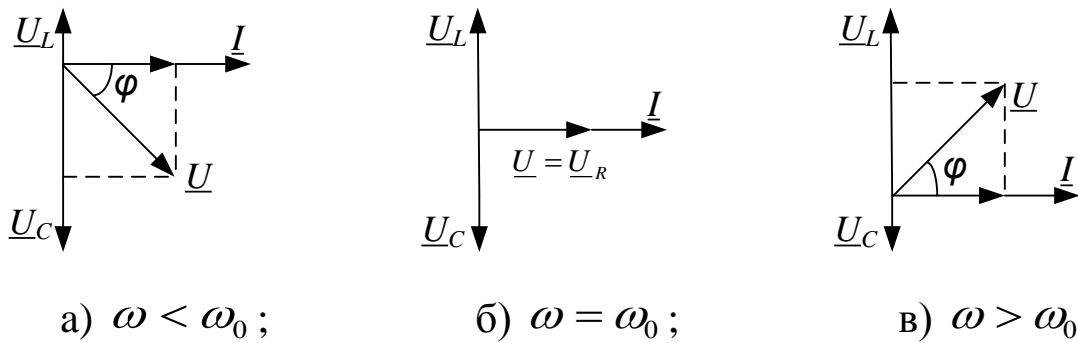


Рисунок 6.3

2 Підготовка до роботи

- 2.1 Скласти протокол звіту про лабораторну роботу.
- 2.2 Вивчити теоретичний матеріал за даною темою.
- 2.3 Ознайомитися з робочим завданням і методичними вказівками до виконання роботи.
- 2.4 Відповісти письмово на такі питання:
 - яке явище в електричному колі називається резонансом напруг і в яких колах воно спостерігається?
 - які умови досягнення резонансу напруг і його наслідки?
 - як з показань приладів визначити момент резонансу?
 - фізичний зміст хвильового опору, резонансної частоти, добротності і затухання послідовного контура.
- 2.5 Якісно проаналізувати резонансні криві та векторні діаграми до резонансу, у момент резонансу та після нього.

3 Робоче завдання

- 3.1 Зібрати схему досліджуваного кола за рисунком 6.4.
- 3.2 Встановити значення вхідної напруги (за вказівкою викладача) і протягом усього дослідження зберігати його незмінним.
- 3.3 Використовуючи наявні вимірювальні прилади, визначити параметри котушки індуктивності (R_K, L_K) , накоротко замкнувши у схемі рисунка 6.4 конденсатор.
- 3.4 Обчислити ємність конденсатора, при якій у колі настане резонанс напруг ($f = 50$ Гц).

3.5 Дослідити коло при зміні ємності (10-12 різних значень) та $U = const$. Дані занести в таблицю 6.1.

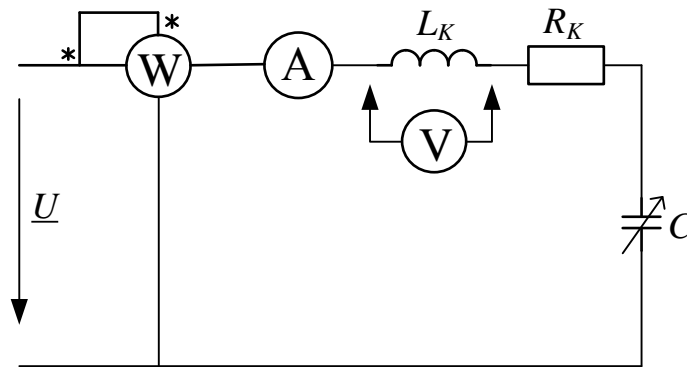


Рисунок 6.4

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 При виконанні даної роботи керуватися загальними вимогами щодо виконання лабораторних робіт на універсальному лабораторному стенді "Теоретичні основи електротехніки", суворо додержуючись правил техніки безпеки.

4.2 Досліджуване коло живиться від джерела синусоїдальної напруги " ~ 36 В рег.". Значення напруги, величина якого залишається незмінною протягом усього експерименту, вказується викладачем.

4.3 Для регулювання реактивних опорів використовуються котушка зі змінною індуктивністю (підносна) і батарея конденсаторів із змінною ємністю C_1 та C_2 лабораторного стенда (C_1 та C_2 з'єднані паралельно).

4.4 Поблизу резонансу добиватися точної настройки в резонанс зміною ємності конденсатора C_2 .

4.5 Для вимірювання діючих значень струму та напруг на замикачах кола використовується амперметр і вольтметр електромагнітної системи універсального стенда. Для вимірювання активної потужності кола – ватметр електродинамічної системи.

5 Аналіз одержаних результатів

5.1 Використовуючи покази приладів, обчислити дані відповідно до таблиці 6.1 та звести їх у відповідні графи.

5.2 За даними таблиці 6.1 побудувати в одній системі координат у відповідному масштабі характеристики

$$I = f_1(C), \quad U_k = f_2(C), \quad U_C = f_3(C), \quad \cos \varphi = f_4(C).$$

Треба вміти пояснити характер одержаних кривих.

Таблиця 6.1.

Вимірювання ($f=50$ Гц)						Р о з р а х у н о к							
C	U	I	P	U _K	U _C	R _K	X _L	X _C	U _A	U _L	L	cos φ	φ
мкФ	В	А	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	В	В	Гн	-	град
0													
10													
20													
⋮													
140													

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ЗІ ВЗАЄМНОЮ ІНДУКТИВНІСТЮ

Мета роботи:

- ознайомитися зі взаємною індуктивністю при послідовному ввімкненні індуктивно зв'язаних котушок і визначити еквівалентні параметри кола;

- експериментально отримати залежності, які характеризують трансформатор без феромагнітного осердя (лінійний трансформатор).

1 Пояснення до роботи

Два елементи кола називаються індуктивно зв'язаними, якщо при зміні струму в одному з них у другому виникає ЕРС взаємоіндукції. Властивості утворення поточкозчеплення взаємоіндукції в одній котушці при протіканні струму в другій котушці називають взаємною індуктивністю двох котушок M , яка також, як і індуктивність, являє собою скалярну величину.

Якщо поточкозчеплення $\Psi_{12} = w_1 \Phi_{m2}$ першого кола обумовлено струмом i_2 другого кола, то взаємна індуктивність кіл визначається як

$$M_{12} = \frac{w_1 \Phi_{m2}}{i_2}.$$

Відповідно

$$M_{21} = \frac{w_{21} \Phi_{m1}}{i_1}.$$

Для лінійних електричних кіл завжди виконується рівність $M_{12} = M_{21}$, на основі чого формується властивість взаємності для індуктивно зв'язаних кіл: якщо струм, який протікає в першому колі, обумовлює в другому колі поточкозчеплення взаємоіндукції $w_2 \Phi_{m1}$, то такий самий струм, що протікає в другому колі, обумовлює в першому колі поточкозчеплення взаємоіндукції $w_1 \Phi_{m2}$ тієї самої величини:

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{\Psi_{21}}{i_1}.$$

Взаємна індуктивність обох котушок залежить від кількості витків у них, форми, розмірів, взаємного розміщення цих котушок, магнітних якостей навколишнього середовища.

Позитивний напрямок струму і магнітний потік, створений ним, узгоджуються за правилом правоходового свердлика.

Існують два види ввімкнення індуктивно зв'язаних елементів:

- узгоджене ввімкнення, при якому потоки самоіндукції і взаємоіндукції в кожному з елементів мають однаковий напрямок;

- зустрічне ввімкнення, при якому магнітний потік самоіндукції і взаємоіндукції мають протилежний напрямок.

При узгодженому напрямі струмів i_1 та i_2 (магнітні потоки самоіндукції і взаємоіндукції, утворені ними, співпадають) у двох індуктивнозв'язаних котушках затискачі котушок, відносно яких струми i_1 та i_2 направлені однаково, називаються одноіменними або однополярними.

З появою взаємоіндукційного зв'язку між двома послідовно ввімкненими котушками при їх узгодженому включенні загальний опір кола за рахунок збільшення індуктивності збільшується. Збільшення опору формально пояснюється збільшенням напруги на кожному з цих елементів за рахунок узгодженого напрямку ЕРС самоіндукції та взаємоіндукції:

$$\underline{Z}_E = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M .$$

При зустрічному включенні опір зменшується:

$$\underline{Z}_E = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M .$$

Оскільки $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$, $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$, $\underline{Z}_M = j\omega M$,

то

$$\underline{U} = I[R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)] = I(R_E + j\omega L_E),$$

де

$$L_E = L_1 + L_2 \pm 2M, \quad M = k\sqrt{L_1 L_2} .$$

Взаємну індуктивність двох котушок визначають за результатами одного з таких дослідів:

1 Знаходять вимірюванням або розрахунком L_1 та L_2 котушок. Визначають еквівалентну індуктивність при узгодженому L_{E1} і зустрічному L_{E2} ввімкненні котушок:

$$L_{E1} = L_1 + L_2 + 2M ; \quad L_{E2} = L_1 + L_2 - 2M .$$

Обчислюють $L_{E1} - L_{E2} = 4M$, звідки

$$M = \frac{L_{E1} - L_{E2}}{4} .$$

Коефіцієнт зв'язку котушок $k = \frac{M}{L_1 L_2}$.

2 Підключають джерело синусоїдальної напруги до однієї з котушок і вимірюють струм I_1 через цю котушку та напругу між розімкненими затискачами другої котушки U_{M2} , що чисельно дорівнює ЕРС взаємоіндукції E_{M2} : $U_{M2} = E_{2M} = I_1 Z_M$. Тут $Z_M = x_M = \omega M$ – опір взаємоіндукції двох котушок при частоті ω . Звідси

$$M = \frac{U_{M2}}{\omega I_1} .$$

За другим законом Кірхгофа, для будь-якої зі схем рисунка 7.1 можна записати таке рівняння в диференціальній формі:

$$u + e_1 + e_2 = i(R_1 + R_2), \quad (7.1)$$

де $e_1 = e_{L1} \pm e_{M1}$; $e_2 = e_{L2} \pm e_{M2}$ – відповідно ЕРС індукції першої і другої котушки ("+" – при узгодженому ввімкненні котушок L_1 та L_2 , "-" – при зустрічному);

$e_{L1} = -L_1 \frac{di}{dt}$; $e_{L2} = -L_2 \frac{di}{dt}$ – відповідно ЕРС самоіндукції першої та другої котушки;

$e_{M1} = e_{M2} = -M \frac{di}{dt}$ – ЕРС взаємоіндукції першої та другої котушок.

З урахуванням цього

$$u = iR_1 + iR_2 + L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} \pm 2M \frac{di}{dt}.$$

Підставляючи в дане рівняння значення комплексів діючого значення струму та напруги, після диференціювання, скорочень і деяких перетворень отримаємо запис рівняння (7.1) в символічній формі

$$\underline{U} = (R_1 + j\omega L_1)\underline{I} + (R_2 + j\omega L_2)\underline{I} \pm 2j\omega M \underline{I},$$

$$\underline{U} = \underline{I}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \pm 2\underline{Z}_M) \text{ або } \underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \pm 2\underline{Z}_M} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_E}.$$

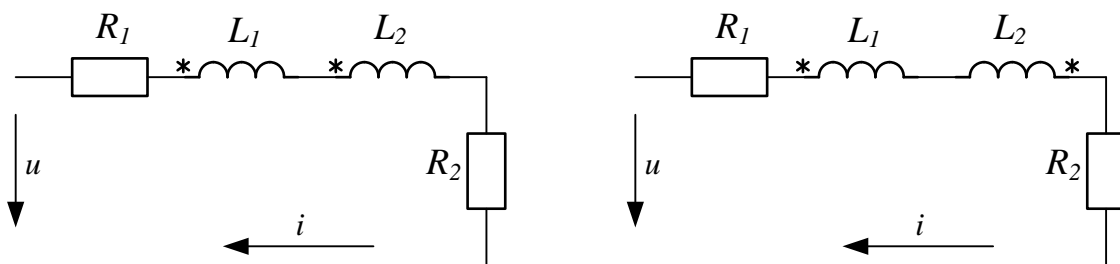


Рисунок 7.1

При послідовному ввімкненні котушок вся енергія, яка поступає в коло кожної котушки, перетворюється в теплоту цієї котушки:

$$P_{T1} = I^2 R_1, \quad P_{T2} = I^2 R_2.$$

Еквівалентний активний опір кожної котушки при послідовному з'єднанні дорівнює власному активному опорю цієї котушки:

$$R_{E1} = R_1, \quad R_{E2} = R_2.$$

Еквівалентний реактивний опір та індуктивність кожної котушки при узгодженому ввімкненні стають більше від власних відповідно на X_M та M :

$$\begin{aligned} X_{E1} &= X_{L1} + X_M; & L_{E1} &= L_1 + M; \\ X_{E2} &= X_{L2} + X_M; & L_{E2} &= L_2 + M. \end{aligned}$$

Еквівалентна індуктивність обох котушок

$$L_E = L_{E1} + L_{E2} = L_1 + L_2 + 2M.$$

Якщо $L_1 > M > L_2$, то еквівалентний реактивний опір другої котушки X_{E2} стане негативним. При цьому в колі буде спостерігатися ефект хибної ємності, тому що на затискачах другої котушки струм буде випереджувати напругу.

При послідовному зустрічному ввімкненні котушок у рівнянні кола перед усіма складовими, зв'язаними зі взаємною індуктивністю, буде стояти знак "-". Так, еквівалентний реактивний опір та індуктивність обох котушок

$$X_E = X_{L1} + X_{L2} - 2X_M; \quad L_E = L_{E1} + L_{E2} = L_1 + L_2 - 2M.$$

За наявності взаємоіндуктивного зв'язку проходить обмін енергією в колі завдяки магнітному полю між індуктивно зв'язаними елементами L_1 та L_2 , що має бути враховано в балансі потужностей кола. Потужність індуктивного зв'язку при цьому складає

$$P_M = P_{M1} + P_{M2} = \pm j\omega M(I_1 I_2 + I_2 I_1).$$

2 Підготовка до роботи

2.1 Вивчити теоретичний матеріал щодо електричних кіл зі взаємною індуктивністю і лінійного трансформатора, використовуючи конспект лекцій і відповідні розділи підручників.

2.2 Ознайомитися з робочим завданням і методичними вказівками до виконання роботи.

2.3 Скласти протокол звіту до лабораторної роботи.

4. Відповісти письмово на такі питання:

- що являють собою явища індукції, самоіндукції, взаємоіндукції, їх принципові відмінності?

- які елементи кола називаються індуктивно зв'язаними?

- які існують види з'єднання індуктивно зв'язаних елементів?

- що називається взаємною індуктивністю M і від чого залежить її величина?

- як дослідним шляхом визначити коефіцієнт взаємної індуктивності?

3 Робоче завдання

3.1 Зібрати електричне коло за рисунком 7.2.

3.2 Підключити до затискачів a - b по черзі котушку 1 і котушку 2. Покази вимірювальних приладів знімати після трихвилинного прогріву котушок і занести їх у таблицю 7.1.

3.3 По черзі виконати узгоджене та зустрічне ввімкнення індуктивно зв'язаних котушок, під'єднавши їх при кожному способі з'єднання до затискачів a - b схеми рисунка 7.2. Покази вимірювальних приладів занести в таблицю 7.2.

3.4 Скласти з індуктивно зв'язаних котушок лінійний трансформатор і, підключивши до затискачів a - b схеми рисунка 7.2 первинну обмотку трансформатора, зняти покази вимірювальних приладів у режимі холостого ходу трансформатора (при розімкненій вторинній обмотці) та активного навантаження, підключеного до вторинної обмотки. Результати випробувань занести в таблицю 7.3.

4 Методичні вказівки до виконання робочого завдання

4.1 Вхідні затиски електричного кола (рисунок 7.2) підключені до джерела синусоїдальної ЕРС " $\sim 36\text{ В}$ рег."

4.2 У якості індуктивно зв'язаних елементів використовувати підносну котушку з двома обмотками, а в якості активного навантаження трансформатора – активний опір R_8 лабораторного стенда.

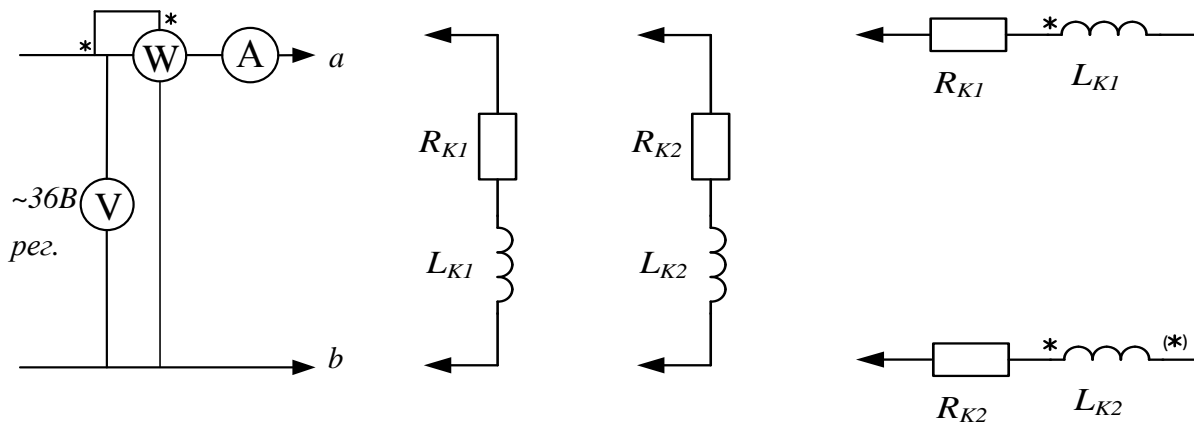


Рисунок 7.2

Таблиця 7.1.

Номер котушки	Виміряно			Обчислено				
	U	I	P	Z	$\cos \varphi$	R	X	L
	В	А	Вт	Ом	-	Ом	Ом	Гн
1								
2								

Таблиця 7.2.

Характер з'єднання котушок	Виміряно			Обчислено						
	U	I	P	Z_E	R_E	X_E	L_E	M	K	φ
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	Гн	-	град
Послідовне узгоджене										
Послідовне зустрічне										

Таблиця 7.3

Режим роботи трансформатора	В и м і р я н о				О б ч и с л е н о	
	U ₁	U ₂	I ₁	P ₁	$\cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1}$	$M = \frac{U_2}{\omega I_1}$
	В	В	А	Вт		Гн
Холостий хід						
Робота на активне навантаження						

5 Аналіз отриманих результатів

5.1 За дослідними даними (п. 3.2 робочого завдання) розрахувати активний, реактивний і повний опір котушок, їх індуктивності (таблиця 7.1).

5.2 За дослідними даними (п. 3.3 робочого завдання) обчислити еквівалентний активний, реактивний і повний опір котушок, індуктивність всього кола і коефіцієнт взаємодукції (таблиця 7.2).

5.3 Сформулювати загальні висновки з роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Положення щодо організації підготовки, проведення та захисту лабораторних робіт в Українській державній академії залізничного транспорту [Текст]. – Харків: УкрДАЗТ, 2007.

2 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2000.

3 Бабаєв, М. М. Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики [Текст] / М. М. Бабаєв, М. Г. Давиденко, Г. І. Загарій [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2011.

4 Соболев, Ю. В. Теорія електричних і магнітних кіл [Текст] / Ю. В. Соболев, М. М. Бабаєв, М. Г. Давиденко – Харків: ХФВ “Транспорт України”, 2002.

5 Коновалов, Є. В. Студентська навчальна звітність [Текст] / Є. В. Коновалов, Л. М. Козар – Харків: УкрДАЗТ, 2005.