

ЛІТЕРАТУРА



НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНА

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя

Кафедра
електричної інженерії

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з курсу

**«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»**
(Частина I)

для студентів напряму підготовки
141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

Тернопіль 2023

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

Кафедра
електричної інженерії

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з курсу

**«ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ»
(Частина I)**

*для студентів напряму підготовки
141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка*

Тернопіль 2023

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Теоретичні основи електротехніки» (частина І) для студентів напряму підготовки 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Укл. : М. С. Наконечний, Я. О. Філюк – Тернопіль : ТНТУ, 2023. – 82 с.

Методичні вказівки містять методику виконання лабораторних робіт, метою яких є закріпити навички розрахунку електричних кіл, та дослідження характеристик електричних кіл з різнохарактерною провідністю, вивчення будови та принципу дії однофазних трансформаторів та експериментальне дослідження режимів трифазного кола. Кожна лабораторна робота містить коротку теоретичну довідку, опис лабораторної установки та завдання по проведенню дослідів та обробці результатів.

Укладач: к.т.н., Наконечний М. С., Філюк Я. О.

Рецензент: д.т.н., проф. Андрійчук В.А.

Розглянуто й схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії.
Протокол № 10 від 25 травня 2023 року.

Розглянуто й рекомендовано до друку на засіданні науково-методичної комісії факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 11 від 07 червня 2023 року

© Комп'ютерна верстка та відповідальний за випуск: Наконечний М. С. 2023 рік

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ВІД ДЖЕРЕЛА ДО СПОЖИВАЧА

Мета роботи: засвоїти закономірності передачі енергії від генератора до споживача.

1. Стислі теоретичні відомості

Електричним колом називається сукупність пристроїв, призначених для генерування, передачі, розподілу та перетворення електричної енергії. Джерела та приймачі є основними елементами електричного кола. В джерелах електричної енергії (гальванічних елементах, акумуляторах, електромашинних генераторах і т. д.) хімічна, механічна, теплова або енергія інших видів перетворюється в електричну. В приймачах (електротермічних пристроях, електричних лампах, резисторах, електродвигунах та ін.) електрична енергія перетворюється в теплову, світлову, механічну та ін. Сукупність трьох елементів – джерела енергії, з'єднувальних проводів та приймача є прикладом найпростішого електричного кола.

Щоб полегшити вивчення процесів в електричному колі, його замінюють розрахунковою схемою заміщення, тобто ідеалізованим колом, яке є розрахунковою моделлю реального кола. Для кола постійного струму (в якому всі процеси одержання, перетворення та споживання електричної енергії відбуваються при незмінних в часі струмах та напругах) користуються поняттями двох його основних елементів: джерела енергії, що характеризується електрорушійною силою (е.р.с.) E і внутрішнім опором $R_{вн}$, та приймача енергії – резистивного елемента з опором R (рис. 1).

Електрорушійна сила E , незалежно від фізичної природи її виникнення, чисельно дорівнює різниці потенціалів $\Delta\phi$ або напрузі U між додатнім та від'ємним виводами джерела енергії **при відсутності в ньому струму, тобто в ненавантаженому режимі (режимі холостого ходу)**. Електрорушійну силу можна визначити як роботу сторонніх сил, властивих джерелу, що витрачається на переміщення одиниці додатнього заряду всередині джерела від затискача з меншим потенціалом до затискача з більшим потенціалом. Напрямок дії е.р.с. вказують на схемі стрілкою. Якщо до затискачів джерела енергії під'єднати приймач, вздовж замкнутого контура цього найпростішого кола потече струм I . При цьому напруга на затискачах джерела вже не буде дорівнювати е.р.с. внаслідок спаду напруги $U_{вн}$ всередині джерела енергії, тобто на його внутрішньому опорі: $U_{вн} = R_{вн} I$.

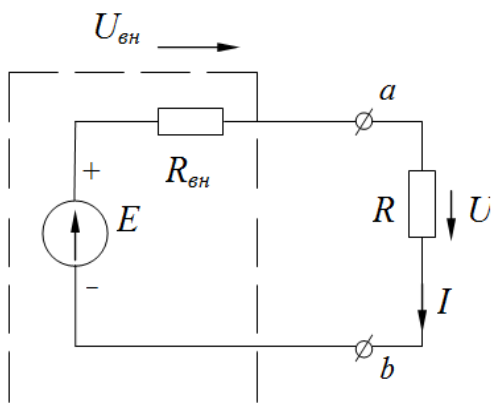


Рис. 1

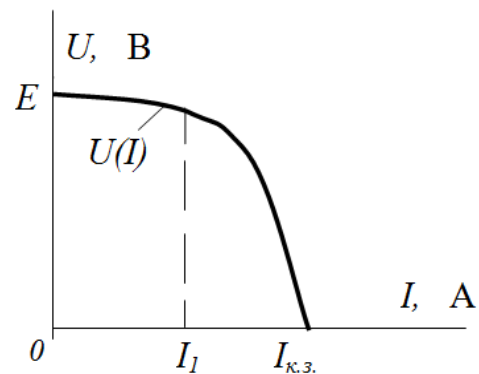


Рис. 2

На рис. 2 зображено одну із зовнішніх характеристик електричного джерела – залежність напруги на затискачах навантаженого джерела від струму: $U = f(I)$. З рис. 2 видно, що при збільшенні струму від нуля до $I = I_1$ напруга на затискачах джерела зменшується практично за лінійним законом

$$U_{ab} = U = E - U_{вн} = E - R_{вн} I, \quad (1)$$

тобто при $E = const$ спад напруги всередині джерела енергії $U_{ен}$ зростає пропорційно струму. При подальшому зростанні струму порушується пропорційність між його значенням і спадом напруги всередині джерела – зовнішня характеристика відхиляється від прямої лінії. Таке відхилення від лінійності викликано в одних джерелах зменшенням е.р.с., в інших – збільшенням внутрішнього опору, а в деяких одночасним зменшенням е.р.с. та збільшенням внутрішнього опору.

Потужність, що розвивається джерелом енергії, визначається добутком його е.р.с. на силу струму в колі

$$P_{дж} = EI . \quad (2)$$

Потужність, що споживається приймачем з опором R , можна записати як

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} . \quad (3)$$

Струм в зовнішній щодо джерела енергії частині кола, тобто в приймачі, приймають напрямленим від точки a з більшим потенціалом до точки b з меншим потенціалом.

Джерело енергії з відомими е.р.с. E та внутрішнім опором $R_{ен}$ може бути представлене однією з двох основних схем заміщення (еквівалентних схем).

З рівняння (1) випливає, що напруга на затискачах джерела менша від його е.р.с. на величину спаду напруги всередині джерела. З іншого боку, напруга на опорі R дорівнює напрузі на затискачах джерела. Тоді можна записати:

$$E = R_{ен} I + U = R_{ен} I + RI , \quad (4)$$

звідки

$$I = \frac{E}{R_{ен} + R} \quad (5)$$

(закон Ома для замкнутого кола).

В ненавантаженому режимі (при розімкнених затискачах a , b) $E = U_{нн}$, тобто е.р.с. дорівнює напрузі на затискачах джерела в ненавантаженому режимі. При короткому замиканні затискачів a , b струм

$$I_{кз} = \frac{E}{R_{вн}} = \frac{U_{нн}}{R_{вн}}. \quad (6)$$

З останнього рівняння випливає, що величина $R_{вн}$, так само як і опору приймача R , обмежує струм.

В залежності від співвідношення між напругами на опорах R та $R_{вн}$ можна отримати два різновиди еквівалентної схеми для реального джерела енергії (рис. 3, a та 4, a).

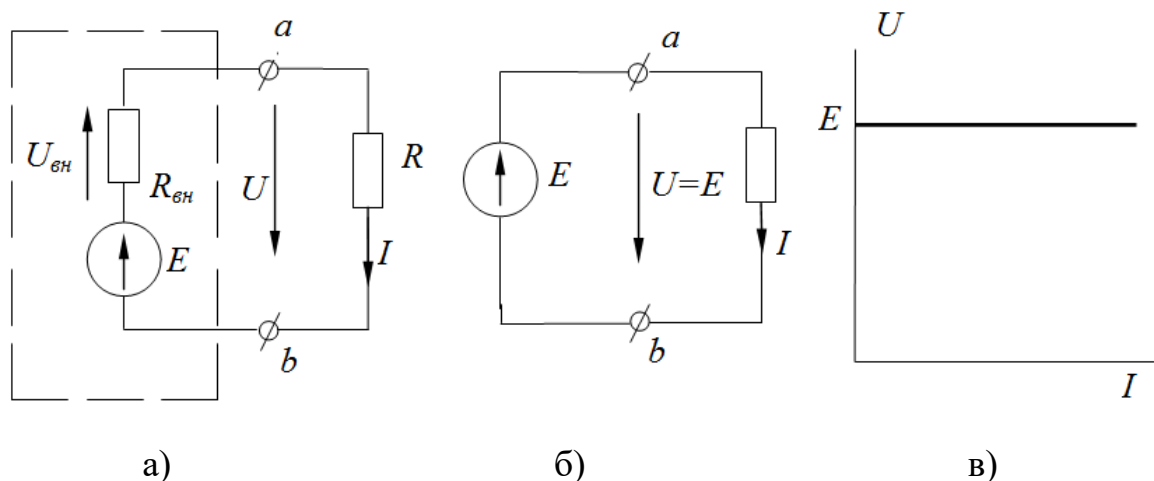


Рис. 3

На еквівалентній схемі рис. 3, a з джерелом е.р.с. E напруга U залежить від струму приймача і дорівнює різниці між е.р.с. джерела енергії і спадом напруги $U_{вн}$. Якщо $R_{вн} \ll R$, при одному і тому ж струмі в цих опорах напруга $U_{вн} \ll U$, тобто джерело електричної енергії знаходиться в режимі, близькому до ненавантаженого режиму. Тоді можна знехтувати його внутрішнім спадом напруги, прийняти $U_{вн} = R_{вн}I = 0$ і отримати еквівалентну схему рис. 3, b . Таке джерело енергії з нульовим внутрішнім опором називають **ідеальним джерелом е.р.с.** і позначають на схемах

колом з стрілкою всередині і літерою E . Напруга на затискачах такого джерела не залежить від опору приймача і завжди дорівнює е.р.с. E . Його зовнішня характеристика – **пряма, паралельна осі абсцис** (рис. 3, в).

На відміну від реального джерела, для ідеального джерела е.р.с. режим короткого замикання ($U = 0$) виключається.

Це ж джерело енергії можна представити й іншою еквівалентною схемою (рис. 4, а). Щоб довести це, поділимо обидві частини рівняння (4) на $R_{\text{вн}}$ і одержимо:

$$\frac{E}{R_{\text{вн}}} = I + \frac{U}{R_{\text{вн}}} = I + G_{\text{вн}}U, \quad (7)$$

або

$$J = I + I_{\text{вн}}, \quad (8)$$

де $G_{\text{вн}} = \frac{1}{R_{\text{вн}}}$ – внутрішня провідність джерела енергії;

$$J = \frac{E}{R_{\text{вн}}} \text{ – струм джерела;}$$

$$I_{\text{вн}} = \frac{U}{R_{\text{вн}}} = UG_{\text{вн}} \text{ – внутрішній струм джерела, що дорівнює}$$

відношенню напруги на затискачах джерела до його внутрішнього опору;

$$I = \frac{U}{R} \text{ – струм приймача.}$$

Отриманому рівнянню (8) відповідає еквівалентна схема з джерелом струму (рис. 4, а) з внутрішнім опором $R_{\text{вн}}$, ввімкненим паралельно опору приймача R .

Якщо $R_{\text{вн}} \gg R$ $I_{\text{вн}} \ll I$, $I = J$ і схема рис.4, а набуває вигляду, представленого на рис.4, б.

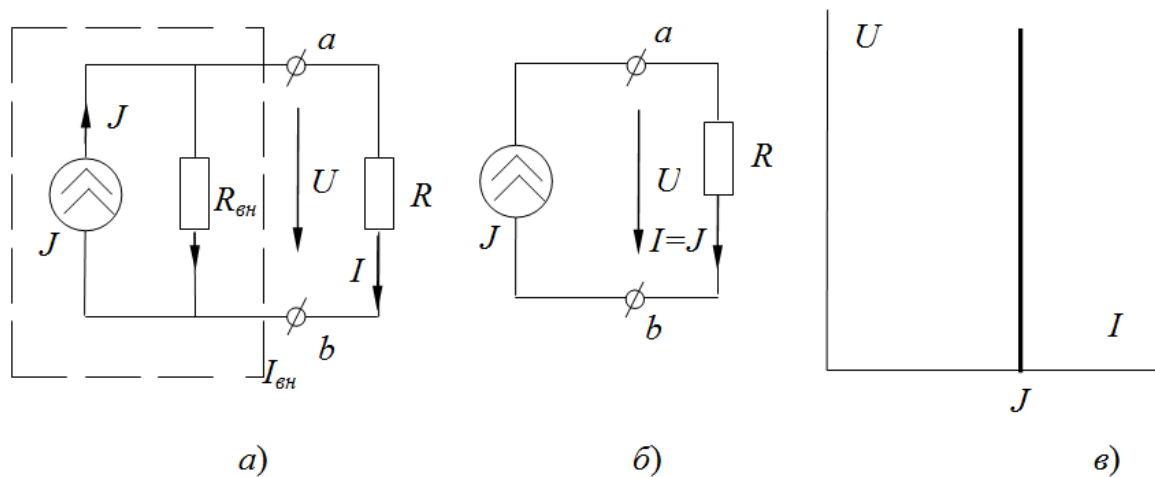


Рис. 4

Таким чином, джерело струму є ідеалізованим джерелом живлення, що дає струм J , який не залежить від опору навантаження, на яке працює джерело, а його е.р.с. та внутрішній опір дорівнюють нескінченності (рис. 4, в). Для ідеального джерела струму виключається ненавантажений режим. Відношення двох нескінченно великих величин – е.р.с. джерела до його внутрішнього опору – дорівнює певній скінченній величині струму $J = E/R_{вн}$.

При використанні схем заміщення реальних електричних джерел необхідно враховувати, що

1) джерело е.р.с. та джерело струму – це ідеалізовані джерела, фізично реалізувати які практично неможливо;

2) схеми заміщення рис. 3, а і 4, а еквівалентні одна одній лише в плані енергії, що виділяється на опорі навантаження R , але не еквівалентні в плані енергії, що виділяється на внутрішньому опорі джерела живлення, а також в плані к.к.д. η кола;

3) ідеальне джерело е.р.с. не можна замінити ідеальним джерелом струму.

Основні експлуатаційні режими роботи електричних кіл – це **робочий і номінальний**.

Джерела і приймачі електричної енергії, а також допоміжні прилади та апарати характеризуються номінальними значеннями струму $I_{ном}$, напруги $U_{ном}$, потужності $P_{ном}$ та ін., тобто значеннями, на які ці пристрої розраховано заводами-виготовлювачами для нормальної роботи. Номінальні параметри вказані в паспорті пристрою. Режим роботи, при якому дійсні струми, напруги, потужності елементів електричного кола відповідають їх номінальним значенням, називається номінальним. Відхилення від номінального режиму небажані, а перевищення номінальних значень, як правило, неприпустимі, оскільки при цьому не можуть гарантуватись розрахункові тривалість роботи, економічність та інші параметри електричних пристроїв. Для забезпечення нормальних умов роботи приймачів електричної енергії необхідно дотримуватись правила – напруга на затискачах чи струм пристрою не повинні перевищувати номінальних значень.

Проте режими електричних кіл з різних причин можуть відрізнятись від номінального. Якщо в електричному колі дійсні характеристики режиму відрізняються від номінальних значень, але відхилення перебувають у допустимих межах, то режим називається робочим. У робочому режимі важливою характеристикою джерела є його коефіцієнт корисної дії. Якщо врахувати, що потужність джерела енергії $P_{дж} = EI$, втрата потужності в джерелі $P_{вн} = I^2 R_{вн}$, потужність приймача $P = RI^2$, то коефіцієнт корисної дії джерела можна обчислити за формулами:

$$\eta = \frac{P}{P_{дж}} = \frac{P}{P_{вн} + P}; \quad (9)$$

$$\eta = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}; \quad (10)$$

$$\eta = \frac{RI^2}{R_{\text{вн}}I^2 + RI^2} = \frac{R}{R + R_{\text{вн}}} \quad (11)$$

Крім номінального та робочого режимів, існують граничні режими роботи електричних кіл:

- 1) **ненавантажений режим.** При ньому $R = \infty$, і струм в колі дорівнює нулю, тобто коло розімкнене;
- 2) **режим короткого замикання.** В багатьох випадках це – **аварійний** режим. При ньому $R = 0$, напруга на затискачах джерела $U = 0$.

Короткі замикання в більшості електричних пристроїв неприпустимі, оскільки струми короткого замикання, як правило, на один – кілька порядків перевищують номінальні значення, що приводить до різкого збільшення виділення тепла в струмопровідних частинах та до пошкодження електричних пристроїв.

Для визначення параметрів схеми заміщення електричного джерела виконують досліди ненавантаженого режиму (холостого ходу) та короткого замикання.

Прослідкуємо за зміною напруг $U_{\text{вн}}$ і U на опорах $R_{\text{вн}}$ і R в залежності від струму в колі (рис. 3, а).

Напруга $U_{\text{вн}}$ пропорційна струму; вона змінюється від нуля (при $I = I_{\text{нн}} = 0$) до найбільшого значення $U_{\text{вн}} = E$ (при $I = I_{\text{кз}}$). Напруга на опорі навантаження $U = IR = E - IR_{\text{вн}}$. Ця напруга також лінійно залежить від струму і змінюється від найбільшого значення $U = E$ (при $I = I_{\text{нн}} = 0$) до нуля (при $I = I_{\text{кз}}$).

При $R_{\text{вн}} = R$ струм $I = \frac{E}{2R_{\text{вн}}} = \frac{I_{\text{кз}}}{2}$, напруги $U_{\text{вн}}$ та U однакові.

На рис. 5, а зображені графіки, які показують зміну напруг $U_{\text{вн}}$ та U в залежності від струму I .

Активна потужність кола $P_{\text{дж}} = EI$ змінюється пропорційно струму від найменшого значення $P = 0$ (при $I = I_{\text{нн}} = 0$) до найбільшого значення $P_{\text{кз}} = EI_{\text{кз}}$. Потужність втрат $P_{\text{вн}} = U_{\text{вн}} \cdot I = I^2 \cdot R_{\text{вн}}$ змінюється пропорційно квадрату струму. При зміні струму потужність втрат змінюється в межах від найменшого значення $P_{\text{вн нн}} = 0$ (при $I = I_{\text{нн}} = 0$) до найбільшого $P_{\text{вн кз}} = P_{\text{кз}}$ (при $I = I_{\text{кз}}$). Потужність на резисторі R визначається як різниця $P_{\text{дж}}$ і $P_{\text{вн}}$, тобто $P = P_{\text{дж}} - P_{\text{вн}} = E \cdot I - I^2 \cdot R_{\text{вн}}$. Потужність P дорівнює нулю при $I = 0$ і при $I = I_{\text{кз}}$.

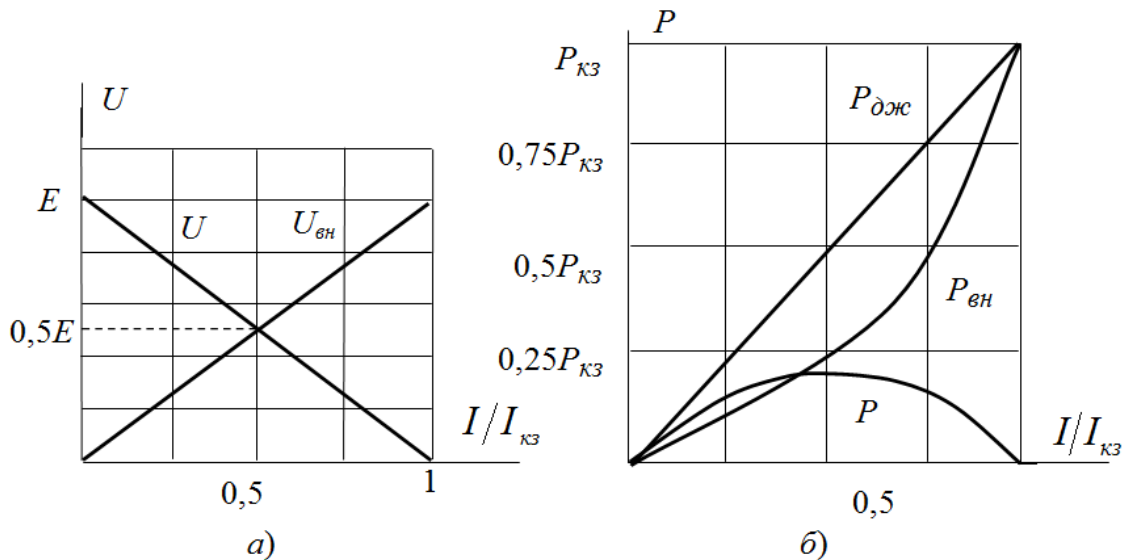


Рис. 5

Для визначення найбільшого значення потужності P знайдемо першу похідну по струму функції $P(I) = E \cdot I - I^2 \cdot R_{\text{вн}}$ і прирівняємо її до нуля:

$$P' = E - 2R_{\text{вн}}I = 0 \quad .$$

Найбільша потужність має місце при значенні струму

$$I \Big|_{P=P_{\max}} = \frac{E}{2R_{вн}}. \text{ Але при будь-якому значенні опору } R \text{ (в будь-якому}$$

режимі) струм визначається за законом Ома (формула (5))

$$I = \frac{E}{R + R_{вн}}.$$

Порівнюючи ці вирази, знаходимо, що потужність P досягає найбільшого значення при $R = R_{вн}$.

Струм у цьому режимі

$$I \Big|_{P=P_{\max}} = \frac{E}{2R_{вн}} = \frac{I_{кз}}{2}$$

$$\text{і максимальна потужність } P_{\max} = I^2 R = E^2 / 4R_{вн}.$$

Графіки залежності $P_{дж}$, $P_{вн}$ і P від сили струму приведені на рис.5, б.

З'ясуємо доцільні режими роботи джерела енергії. Це питання можна розглядати з двох точок зору. По-перше, слід з'ясувати, при яких умовах джерело розвиває максимальну корисну потужність, і, по-друге, при якому режимі буде мати місце високий к.к.д. Корисною потужністю в колі є потужність в опорі навантаження P . Потужність $R_{вн}$ слід розглядати як потужність втрат.

Режим, при якому має місце найбільша корисна потужність, має місце при $R=R_{вн}$; в цьому випадку $I = I_{кз}/2$ і корисна потужність дорівнює потужності втрат на внутрішньому опорі джерела, тобто

$$P = P_{вн} = \frac{EI_{кз}}{4}.$$

Потужність, яку розвиває джерело в цьому режимі роботи,

$$P_{\text{дж}} = P_{\text{вн}} + P = \frac{EI_{\text{кз}}}{2}.$$

Коефіцієнт корисної дії при цьому

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{дж}}} = \frac{1}{2}, \text{ або } 50\%.$$

Найбільший к.к.д. має місце при $R = \infty$, тобто в ненавантаженому режимі. Дійсно, у відповідності (9), (10), (11)

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{дж}}} = \frac{UI}{EI} = \frac{E - U_{\text{вн}}}{E} = \frac{E - IR_{\text{вн}}}{E},$$

звідки при $I=0$ ($R=\infty$) $\eta=1$, або 100%.

Таким чином, передача електроенергії від джерела до навантаження з високим к.к.д. виконується в режимах, близьких до ненавантаженого.

Умова передачі максимуму активної потужності найчастіше використовується в радіотехніці, провідному зв'язку, електроавтоматиці і приладобудуванні. В енергетичних системах, для яких характерні великі потужності генераторів і приймачів, прагнуть до отримання високих к.к.д.

Спираючись на вищесказане, можна констатувати, що робота електричного джерела відбувається в одному з трьох режимів:

– **джерела напруги** при $R_{\text{вн}} \ll R$ – режимі, при якому напруга на затискачах джерела практично стала ($U=E$). Такий режим близький до ненавантаженого, к.к.д. $\eta \approx 1$;

– **джерела струму** при $R_{\text{вн}} \gg R$ – режимі, при якому струм джерела практично сталий ($I=\text{const}$). Цей режим близький до режиму короткого замикання, при якому к.к.д. $\eta \approx 0$;

– **узгодженому** при $R_{\text{вн}} = R$. Це – режим, при якому потужність у приймачі максимальна і к.к.д. кола становить 0,5.

2. Контрольні питання

1. Що називають електричним колом? Схемою кола? З яких елементів складається електричне коло? Який напрям струму приймають в колі постійного струму за додатній?
2. Пояснити, що таке е.р.с., як її можна визначити експериментальним шляхом.
3. Що таке струм короткого замикання джерела та як його визначити експериментальним шляхом?
4. Записати закон Ома для найпростішого електричного кола, що складається з джерела е.р.с. та приймача – резистора з опором R .
5. Чому дорівнює потужність джерела електричної енергії, потужність приймача електричної енергії?
6. Який вигляд має вольт-амперна характеристика реальних джерел електричної енергії? Зобразіть вольт-амперні характеристики ідеального джерела е.р.с. та ідеального джерела струму.
7. Зобразіть схеми заміщення реальних джерел електроенергії.
8. Що таке ідеальне джерело е.р.с., який його внутрішній опір?
9. Що таке ідеальне джерело струму, чому дорівнює його е.р.с. та внутрішній опір?
10. Назвіть основні експлуатаційні режими роботи електричних кіл. Що таке номінальний режим роботи електричного кола? Що таке робочий режим електричного кола?
11. Що називається коефіцієнтом корисної дії електричного кола?
12. Запишіть вирази для визначення коефіцієнта корисної дії через потужності джерела та приймача, через е.р.с. джерела та напругу на його затискачах, через внутрішній опір джерела та опір навантаження.
13. Які режими роботи електричних кіл належать до граничних?
14. Як експериментальним шляхом визначити параметри схеми заміщення реального джерела електроенергії?

15. При якій умові наруга на внутрішньому опорі джерела е.р.с. дорівнює напрузі на навантаженні ?
16. Зобразіть залежність напруги на навантаженні та спаду напруги на внутрішньому опорі джерела від величини $I / I_{кз}$.
17. Зобразіть залежність корисної потужності кола P і потужності втрат $P_{вн}$ від величини струму I .
18. Сформулюйте умову передачі найбільшої потужності від джерела до приймача і запишіть її аналітично.
19. Яка величина к.к.д. при умові передачі найбільшої потужності від джерела до приймача ? Чому ?
20. При якій умові к.к.д. кола максимальний у випадках кола з джерелом е.р.с. та кола з джерелом струму?
21. В яких випадках доцільно виконувати умову передачі максимуму активної потужності, а в яких максимуму к.к.д. ?

3. Завдання для підготовки до роботи

3.1. Дати відповіді на контрольні питання, наведені в п. 2.

3.2. Є батарея гальванічних елементів з е.р.с. E і внутрішнім опором $R_{вн}$. За даними, наведеними в табл.1, визначити максимальну потужність, яку ця батарея може віддати в зовнішнє коло, і к.к.д. при цій умові, а також к.к.д. при умові, що опір навантаження з $R = R_{вн}$ впаде до $R = 0.1R_{вн}$.

Табл. 1

№ шифру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$E, В$	10	15	20	30	50	100	90	45	60	90
$R_{вн}, Ом$	10	5	15	20	5	10	9	10	20	20

3.3. Внутрішній опір джерела е.р.с. $R_{вн} = 25$ Ом. Знайти значення опору навантаження в колі (рис. 7), при якому значення сили струму становить 0; 0,1; 0,2; 0,3; ... 0,9; 1,0 від значення струму короткого замикання $I_{кз}$.

4. Опис лабораторної установки і схеми досліджень.

Дослідна установка складається з випробувальної панелі, магазину опорів та джерела регульованої постійної е.р.с.

На випробувальній панелі (рис. 6) розміщені: амперметр, вольтметр, імітатор опору лінії та входні 1, 2 і вихідні 3, 4 клеми. На цій же панелі зображено і схему сполучень її елементів. Вхідні клеми приєднуються до джерела з внутрішнім опором R_0 , а вихідні до магазину опорів (навантаження).

З точки зору приймача електричної енергії клеми 3, 4 є клемми джерела енергії (опір проводів лінії входить у внутрішній опір джерела $R_{вн} = R_л + R_0$).

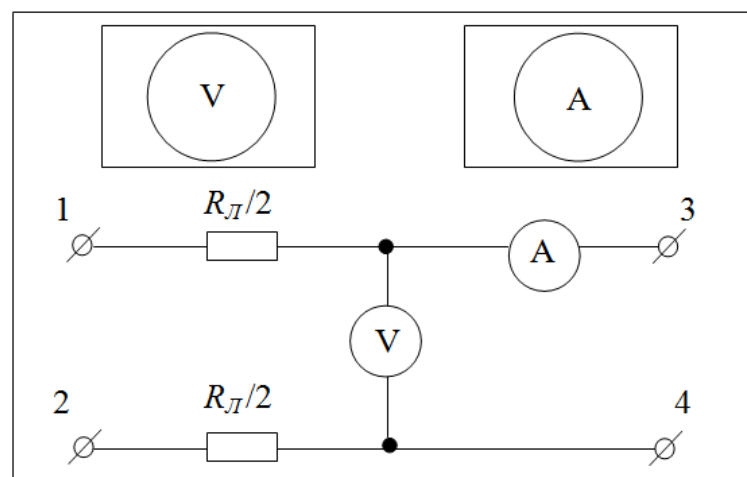


Рис. 6

5. Завдання по проведенню дослідів та обробці їх результатів

5.1 Зібрати коло за схемою рис.7.

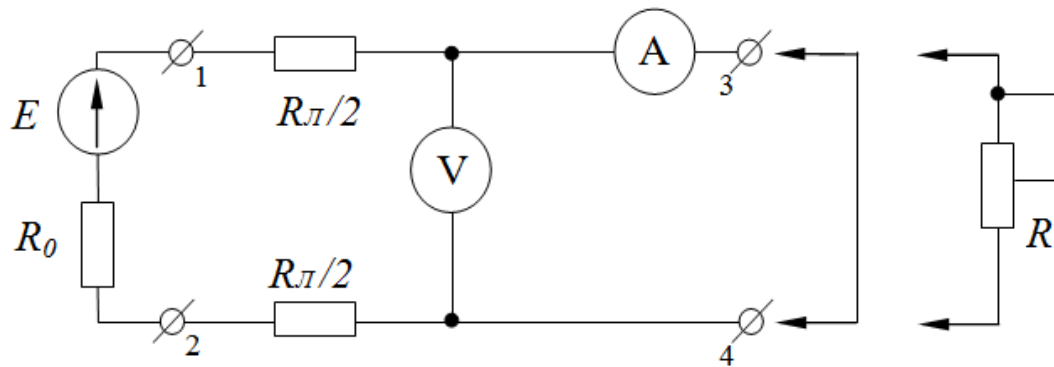


Рис. 7

5.2 Провести досліди ненавантаженого режиму та короткого замикання. Виміряти значення е.р.с. джерела E , струму короткого замикання $I_{кз}$ та знайти значення внутрішнього опору джерела $R_{вн} = E/I_{кз}$. При проведенні цього досліду доцільно за допомогою джерела постійної регульованої е.р.с. виставити таке її значення, при якому струм короткого замикання має значення, кратне 10.

5.3 Зняти дані для побудови графіків залежності напруги U на приймачі, потужності на приймачі P , потужності джерела $P_{дж}$, втрати потужності на внутрішньому опорі $P_{вн}$ та коефіцієнта корисної дії η від сили струму. Для цього за допомогою магазину опорів виставляти такі значення опору навантаження R , при яких сила струму I становить 0; 0,1; 0,2; 0,3; ... 0,9; 1,0 від значення струму короткого замикання $I_{кз}$. Дані занести в таблицю, форма якої приведена нижче.

Табл.2

$I / I_{кз}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
I, A											
$R, Ом$											
$U, В$											
$P, Вт$											
$P_{дж}, Вт$											
$P_{вн}, Вт$											
$U_{вн}, В$											
$\eta, \%$											

5.4 Провести обчислення і побудувати суміщені графіки залежності U , $U_{вн}$, η та P , $P_{дж}$, $P_{вн}$ від сили струму I в координатних осях, вказаних на рис.8.

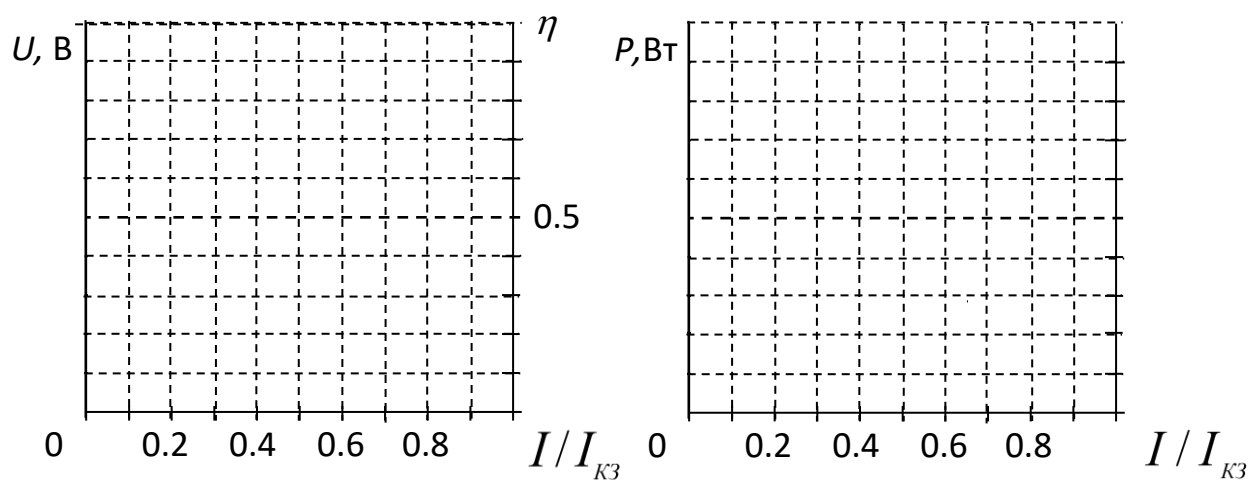


Рис.8

5.5 Сформулювати висновки по роботі, пояснити причини можливих відхилень результатів експериментів від теорії.

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ КІЛ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: закріпити навички розрахунку електричних кіл різними методами. Переконатися в їх справедливості експериментальним шляхом.

1. Стислі теоретичні відомості

Із всієї сукупності відомих методів розрахунку кіл постійного струму розглянемо методи рівнянь Кірхгофа, контурних струмів, вузлових потенціалів, двох вузлів, накладання та еквівалентного генератора. При розгляді обмежимося випадками кіл, в яких діють лише джерела е.р.с.

1.1 Застосування законів Кірхгофа для розрахунку електричних кіл.

Перший закон Кірхгофа формулюється так. *Алгебраїчна сума струмів у всіх вітках, що сходяться в одному вузлі, дорівнює нулю.*

$$\sum_k I_k = 0, \quad (1)$$

де k – номери віток, що сходяться у вузлі.

Струмам, що входять у вузол, приписують один знак, наприклад, плюс, а струмам, що виходять з вузла, – протилежний.

Другий закон Кірхгофа можна сформулювати так. *Алгебраїчна сума спадів напруг в будь-якому замкнутому контурі дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с. цього контура:*

$$\sum IR = \sum E. \quad (2)$$

Спад напруги IR беруть із знаком плюс, якщо напрям струму на резисторі співпадає з напрямом обходу контура, і знаком мінус, якщо ці напрями не співпадають. Такого ж правила дотримуються і щодо знаків е.р.с.

Наведеним вище формулюванням другого закону Кірхгофа доцільно користуватися в тих випадках, коли відомі значення внутрішніх опорів реальних джерел е.р.с., або ж коли за умовами конкретної задачі джерело можна вважати ідеальним.

В тих випадках, коли внутрішніми опорами джерел е.р.с. нехтувати не можна і їх значення невідомі, доцільно користуватися іншим еквівалентним формулюванням другого закону Кірхгофа. *Алгебраїчна сума напруг (не спадів напруг!) на всіх елементах будь-якого замкнутого контура дорівнює нулю:*

$$\sum_m U_m = 0, \quad (2)$$

де U_m – напруга на m -му елементі контура, в т.ч. і на джерелах е.р.с.

Другий закон Кірхгофа разом з першим законом виконуються для будь-яких електричних кіл (лінійних і нелінійних) при будь-якому характері зміни в часі струмів і напруг.

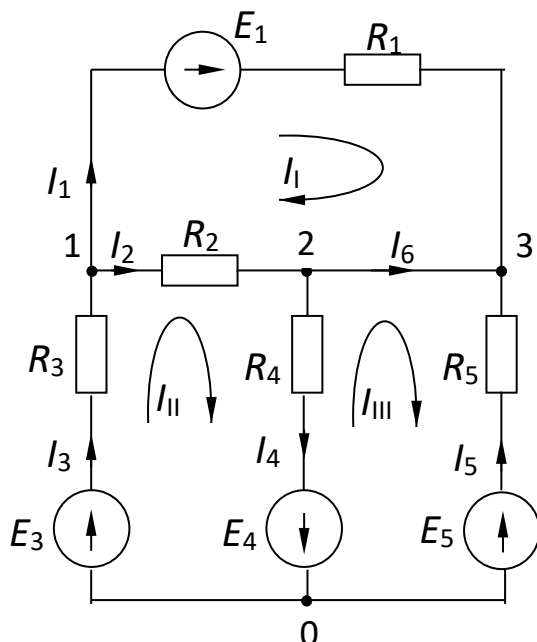
Системи рівнянь, складених за першим та другим законами Кірхгофа, дозволяє визначити струми і напруги в електричних колах будь-якого рівня складності.

Але перш ніж приступити до складання такої системи рівнянь, треба переконатись у відсутності інших методів, застосування яких вимагатиме

меншого об'єму чи складності обчислювальної роботи.

При застосуванні законів Кірхгофа для розрахунку електричних кіл дотримуються таких правил.

1. Довільно позначають напрями струмів у вітках і так само довільно обирають напрями обходу контурів.



2. Записують незалежні рівняння за першим законом Кірхгофа. Число їх становить $q - 1$, де q – кількість вузлів.

3. Записують необхідну кількість незалежних рівнянь за другим законом Кірхгофа. Ця кількість становить $p - (q - 1)$, де p – кількість невідомих струмів у вітках кола. Незалежними будуть рівняння, записані для так званих незалежних контурів, тобто такого набору контурів, при якому кожен з них відрізняється від інших хоча б однією віткою з невідомим струмом в ній.

Розглянемо застосування методу на прикладі кола, схема якого наведена на рис. 1. Спершу довільно позначимо напрями струмів у вітках (якщо вони не задані умовою). Кількість віток і невідомих струмів в них становить 6; отже, система повинна складатись з 6 незалежних рівнянь. Рівняння, записані за першим законом Кірхгофа, простіші (всі коефіцієнти при струмах дорівнюють 1), тому доцільно записати максимальну кількість таких нескладних рівнянь. В даній схемі кількість вузлів $q = 4$ і, отже, кількість незалежних рівнянь за першим законом Кірхгофа повинна становити $q - 1 = 3$:

$$\text{для вузлів} \quad 1 \quad I_3 - I_1 - I_2 = 0;$$

$$2 \quad I_2 - I_4 - I_4 = 0;$$

$$3 \quad I_1 + I_1 + I_4 = 0.$$

Решту рівнянь, в даному випадку 3, записуємо за другим законом Кірхгофа. Для цього вибираємо три незалежних контури і позначаємо напрями їх обходу, наприклад, як показано на рис. 1 стрілками в середині контурів.

Рівняння, записані за другим законом Кірхгофа для цих контурів, мають вигляд

$$\text{для першого} \quad I_1 R_1 - I_2 R_2 = E;$$

$$\text{другого} \quad I_3 R_3 + I_2 R_2 + I_4 R_4 = E_3 + E_4;$$

третього
$$- I_4 R_4 - I_5 R_5 = - E_4 - E_5.$$

Одержану систему шести рівнянь розв'язуємо одним з відомих методів і знаходимо невідомі струми $I_1 \dots I_2$.

1.2. Метод контурних струмів.

Цей метод базується на застосуванні другого закону Кірхгофа для визначення так званих контурних струмів з наступним знаходженням реальних струмів. Контурні струми можна розглядати як розрахункові складові реальних струмів.

Перед складанням рівнянь за методом контурних струмів необхідно на схемі кола вказати напрями невідомих реальних струмів, вибрати незалежні контури (краще всього у вигляді суміжних комірок) і позначити напрями контурних струмів у них. Щоб на схемах і в рівняннях відрізнити реальні і контурні струми, останні позначають інакше ніж реальні, наприклад, римськими цифрами, літерним або подвійним цифровим індексом. Якщо напрями всіх контурних струмів однакові (лише за або лише проти ходу годинникової стрілки), спади напруг на резисторах контура від власних контурних струмів будуть мати знак плюс, а від струмів суміжних контурів – знак мінус.

Зокрема, для кола (рис. 1) система рівнянь за методом контурних струмів має вигляд:

- для першого контура $I_I (R_1 + R_2) - I_{II} R_2 = E_1$;
- для другого контура $I_{II} (R_3 + R_2 + R_4) - I_I R_2 - I_{III} R_4 = E_3 + E_4$;
- для третього контура $I_{III} (R_4 + R_5) - I_{II} R_4 = - E_4 - E_5$.

В першому з цих рівнянь сума $(R_1 + R_2)$ – власний опір першого контура, в другому $(R_3 + R_2 + R_4)$ – власний опір другого контура, в третьому $(R_4 + R_5)$ – власний опір третього контура. Опір R_2 в першому рівнянні – спільний (суміжний, взаємний) для першого і другого контурів кола; протікання струму I_{II} викликає на ньому спад напруги, протилежний

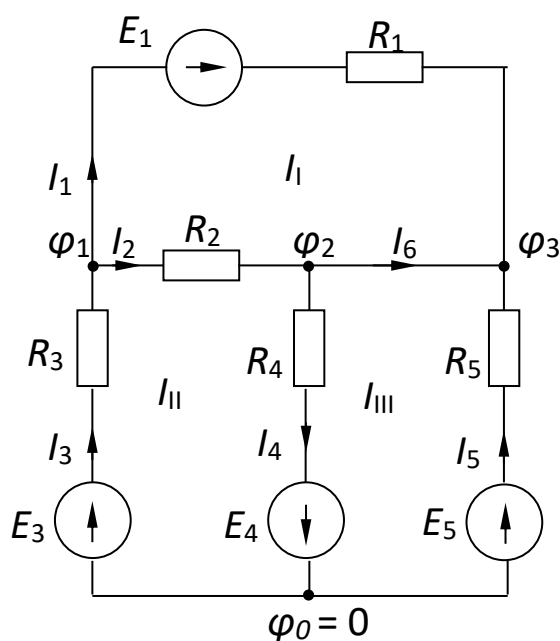
спаду напруги від протікання власного контурного струму I_I , тому цей спад напруги $I_{II} R_2$ береться із знаком мінус. Те ж саме можна сказати і про спади напруг на інших спільних для двох контурів резисторах.

Розв'язавши систему рівнянь щодо контурних струмів, одержимо їх значення. Реальні струми знаходимо як алгебраїчну суму контурних струмів в кожній з віток кола (або ж за першим законом Кірхгофа для відповідних вузлів):

$$\begin{aligned} I_1 &= I_I; & I_2 &= I_{II} - I_I = I_3 - I_1; \\ I_3 &= I_{II}; & I_4 &= I_{II} - I_{III} = I_2 - I_6; \\ I_5 &= -I_{III}; & I_6 &= I_{III} - I_I = -I_1 - I_5. \end{aligned}$$

1.3. Метод вузлових потенціалів. Метод двох вузлів.

Метод вузлових потенціалів, як і метод контурних струмів, передбачає використання рівнянь, записаних за законами Кірхгофа. Але, на відміну від методу контурних струмів, спершу розв'язують систему з $q - 1$ незалежних рівнянь (q – кількість вузлів кола), записаних за першим законом Кірхгофа. Це дозволяє знайти потенціали всіх вузлів, за винятком



одного, потенціал якого приймають таким, що дорівнює нулю. Знаючи різниці потенціалів між вузлами, за законом Ома чи першим законом Кірхгофа можна знайти струми у всіх вітках кола. Метод вузлових потенціалів, як і метод контурних струмів, вимагає менших затрат праці, ніж метод рівнянь Кірхгофа.

Рівняння, записані за методом вузлових потенціалів для певного вузла k кола мають вигляд:

$$\varphi_k G_{kk} - \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^{q-1} \varphi_m G_{mk} = \sum E_{mk} G_{mk},$$

де G_{mk} , E_{mk} – відповідно провідність вітки між вузлами m та k та е.р.с., що діє в цій вітці;

G_{kk} – власна провідність вузла k (сума провідностей всіх віток, що сходяться у вузлі k ;

$m = 1, 2, \dots, k, \dots, q-1$ – номери вузлів кола.

Добутки $E_{mk} G_{mk}$ беруть із знаком плюс, якщо е.р.с. E_{mk} напрямлена до вузла k , і мінус, коли е.р.с. напрямлена від вузла k .

Система з $q-1$ рівнянь, складена за методом вузлових потенціалів, фактично є однією з форм запису першого закону Кірхгофа для відповідних вузлів.

Рівняння за методом вузлових потенціалів для кола рис. 2 запишемо з врахуванням того, що потенціали вузлів 2 та 3 φ_2 та φ_3 однакові, а $\varphi_0=0$.

Тоді

$$\text{для вузла 1} \quad \varphi_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \varphi_2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{E_3}{R_3} - \frac{E_1}{R_1};$$

$$\text{для вузла 2} \quad \varphi_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_1} \right) - \varphi_1 \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) = \frac{E_1}{R_1} - \frac{E_5}{R_5} - \frac{E_4}{R_4}.$$

Знайшовши з цих рівнянь значення φ_1 та φ_2 , визначимо струми у вітках

1...5 за законом Ома та струм I_6 за першим законом Кірхгофа

$$I_1 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_1}{R_1}; \quad I_4 = \frac{\varphi_2 + E_4}{R_4};$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2}; \quad I_5 = \frac{-\varphi_2 + E_5}{R_5};$$

$$I_3 = \frac{-\varphi_1 + E_3}{R_3}; \quad I_6 = I_2 - I_4.$$

Якщо коло має всього два вузли, потенціал одного з них прирівнюють до нуля і тоді система рівнянь за методом вузлових потенціалів зводиться до одного рівняння

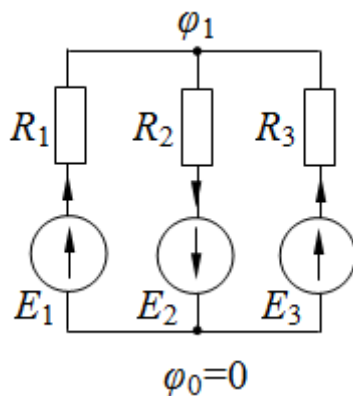
$$\varphi \sum G = \sum EG,$$

з якого знаходять потенціал іншого вузла

$$\varphi = \frac{\sum EG}{\sum G}.$$

Ця формула виражає суть **методу двох вузлів**.

Рівняння, записане за методом двох вузлів для кола рис. 3, має вигляд



$$\varphi_1 = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = U_{10} = U$$

де U – напруга між вузлами 1 та 0.

Струми у вітках у відповідності з законом Ома

$$I_1 = \frac{-\varphi_1 + E_1}{R_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_1 + E_2}{R_2}; \quad I_3 = \frac{-\varphi_1 + E_3}{R_3}.$$

1.4. Метод накладання.

Метод накладання базується на загальнофізичному принципі накладання (суперпозиції), який в застосуванні до лінійних електричних кіл можна сформулювати так.

Через будь-який елемент чи ділянку електричного кола одночасно можуть протікати струми від різних джерел, і результуючий струм (напруга) визначається алгебраїчною сумою струмів (напруг), викликаних дією кожного з джерел незалежно від інших.

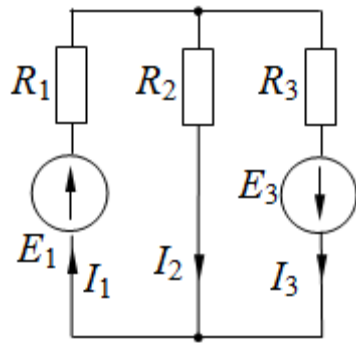
Слід особливо наголосити, що принцип накладання не виконується для нелінійних систем, в том числі нелінійних електричних кіл.

З цього принципу випливає метод накладання. У відповідності з ним струм у будь-якій вітці кола, в якому діють k джерел, знаходять як алгебраїчну суму частинних струмів, викликаних дією кожного з k джерел при відсутності дії $k-1$ інших джерел, тобто при їх „відключенні”.

При відключенні джерел у вітках залишаються їх внутрішні опори. У вітці з ідеальним джерелом е.р.с. $\left(R_{вн} = 0\right)$ замість внутрішнього опору ставлять перемичку, а вітку з ідеальним джерелом струму $\left(R_{вн} = \infty\right)$ розривають.

Застосовувати метод доцільно у випадках, коли необхідно знайти струм лише в одній з віток кола при наявності двох, максимум трьох джерел. Цей метод дозволяє задачу знаходження струмів розділити на ряд простих задач для визначення частинних струмів, викликаних дією кожного джерела окремо.

Наприклад, для знаходження струму у вітці 2 (рис. 4) спершу „виключимо” джерело E_3 . Частинні струми у вітках 1 та 2 від дії е.р.с. E_1



$$I_1(E_1) = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}};$$

$$I_2(E_1) = I_1(E_1) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = \frac{E}{R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3}.$$

Частинні струми у вітках 3 та 2 від джерела E_3

$$I_3(E_3) = \frac{E_3}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}};$$

$$I_2(E_3) = \frac{E_3}{R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Струм у вітці 2 дорівнює алгебраїчній сумі частинних струмів

$$I_2 = I_2(E_1) + I_2(E_3).$$

(Струм $I_2(E_3)$ напрямлений проти струму I_2).

1.5. Метод еквівалентного генератора.

Іноді немає потреби знати струми у всіх вітках кола, а досить знати лише в одній вітці. В таких випадках, особливо тоді, коли опір цієї вітки – величина змінна, доцільно скористатися методом еквівалентного генератора (активного двополюсника).

Схему кола поділяють на дві частини – вітку з досліджуваним струмом та решту кола. Останню представляють у вигляді активного двополюсника (активного генератора) з параметрами $E_{екв}$ та $R_{екв}$. Е.р.с $E_{екв}$ дорівнює напрузі між полюсами навантаження двополюсника (при від'єднаній виділеній вітці). Величина опору $R_{екв}$ дорівнює вхідному опору двополюсника і може розглядатись як внутрішній опір джерела з е.р.с. $E_{екв}$. Значення цих параметрів залежать від схеми сполучень і значень параметрів елементів, що входять в склад двополюсника. Загальної методики визначення цих параметрів не існує і кожна конкретна задача вимагає окремого підходу.

Розглянемо застосування методу на прикладі кола (рис. 5, а), в якому треба знайти силу струму у вітці з резистором R_3 .

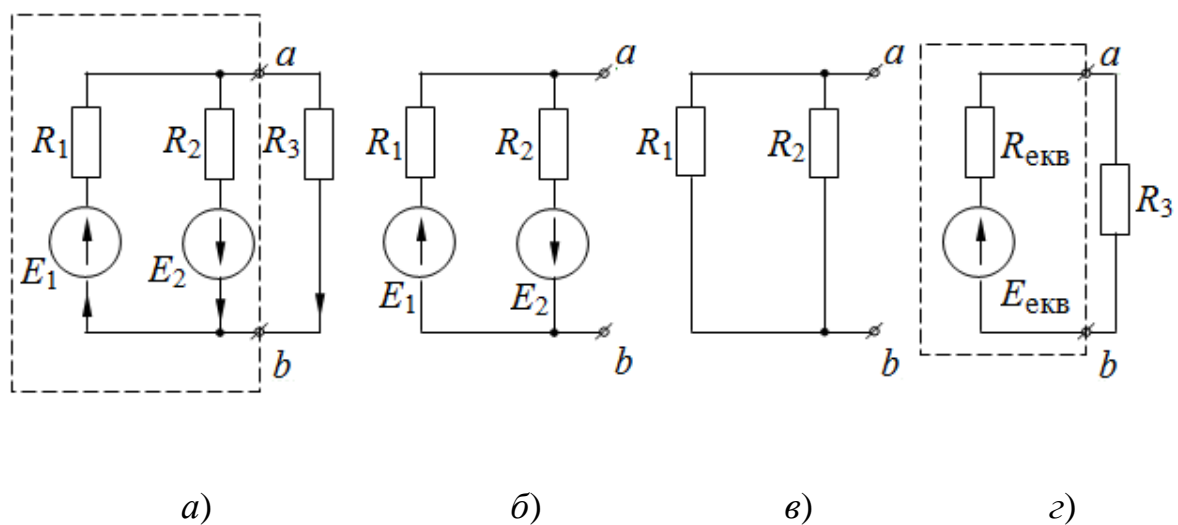


Рис. 5

Коло, за винятком вітки з резистором R_3 , будемо розглядати як активний двополюсник (активний генератор). Для визначення еквівалентної е.р.с. такого генератора (схема 5, б) скористаємось методом двох вузлів

$$E_{екв} = \varphi_a - \varphi_b = \frac{\sum EG}{\sum G} = \frac{E_1 \frac{1}{R_1} - E_2 \frac{1}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}.$$

Із схеми 5, в для визначення внутрішнього опору еквівалентного генератора впливає, що

$$R_{екв} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Сила струму в резисторі R_3 у відповідності з законом Ома (рис. 5, з)

$$I_3 = \frac{E_{екв}}{R_3 + R_{екв}}.$$

2. Контрольні питання

1. Назвіть основні методи розрахунку кіл постійного струму.
2. Сформулюйте і запишіть перший та другий закони Кірхгофа.
3. Які вузли і контури називають незалежними при складанні системи рівнянь за законами Кірхгофа?
4. Яку кількість рівнянь необхідно скласти за першим та другим законами Кірхгофа, щоб визначити струми в усіх вітках схеми?
5. Які переваги методу контурних струмів порівняно з методом розрахунку, що базується на застосуванні законів Кірхгофа? Поясніть суть розрахунку методом контурних струмів. В чому полягає особливість розрахунку за методом контурних струмів при наявності в колі джерела струму?
6. Дайте визначення власного опору контура, взаємного (спільного) опору контурів, контурної е.р.с. Запишіть в загальному вигляді

систему рівнянь для розрахунку за методом контурних струмів у звичайній та матричній формах.

7. Поясніть суть методу вузлових потенціалів. Як враховуються струми джерел струму при розрахунку кіл за методом вузлових потенціалів?
8. Запишіть в загальному вигляді рівняння для одного з вузлів коли при розрахунку за методом вузлових потенціалів. Поясніть зміст величин, що входять в систему. Що називається власною провідністю вузла, спільною (взаємною) провідністю двох вузлів, вузловим потенціалом?
9. В яких випадках доцільно застосовувати метод двох вузлів? Поясніть суть цього методу.
- 10.Що називають двополюсником? Які двополюсники належать до активних?
- 11.Поясніть суть поняття еквівалентного генератора і параметрів, якими він характеризується. Як визначити вхідний опір та е. р. с. еквівалентного генератора дослідним та розрахунковим шляхом?
- 12.В чому полягає суть методу накладання? Запишіть рівняння, що виражає принцип накладання, і поясніть зміст величин, що входять в рівняння.
- 13.В яких випадках доцільно застосовувати метод еквівалентного генератора?
- 14.Дайте загальну характеристику переваг і недоліків відомих методів розрахунку кіл постійного струму.

3. Завдання для самостійної підготовки до роботи

1. Дати відповіді на контрольні питання.
2. В колі (рис 4) значення параметрів елементів $R_1=R_2=R_3=12$ Ом; $E_1=24$ В; $E_2=12$ В. Знайти значення струмів у вітках всіма розглянутими в розділі 1 методами.
3. Довести, що у вітках кола з реальними джерелами е.р.с. будуть протікати такі ж струми, що і в колі з ідеальними джерелами е.р.с., якщо значення е.р.с. E_K останніх будуть дорівнювати значенням напруг U_K на затискачах реальних джерел, ввімкнених в коло: $E_K = U_K$ (іншими словами, показати, що рівняння (2) та (2а) еквівалентні).

4. Опис дослідної установки

Установка складається з випробуваної панелі (рис. 6), панелі джерел живлення, панелі амперметрів і вольтметра.

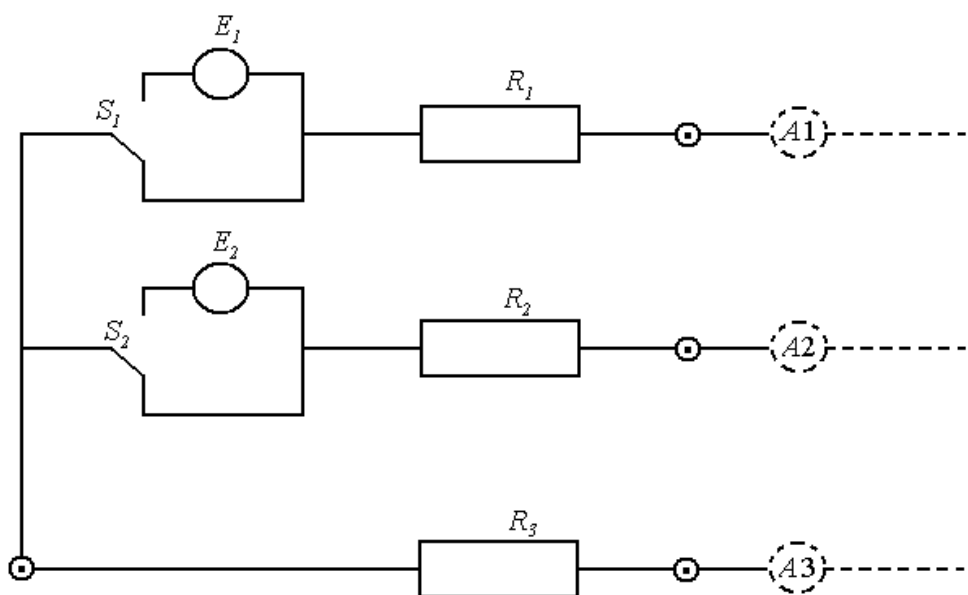


Рис. 6. Вигляд випробувальної панелі

При виконанні роботи слід пам'ятати, що в колі діють джерела з використанням випрямлячів на напівпровідникових діодах (нелінійних елементах). Внутрішній опір таких джерел залежить від сили струму джерела: $R_{\text{вн}} = f(I)$. Тому дані джерела можна вважати лінійними елементами кола лише в першому наближенні

5. Завдання по проведенню дослідів і розрахунків

5.1. Одержати у керівника практикуму дані для складання кола і його розрахунку (вказівки щодо значення опору R_3 , полярності і значень е.р.с. та методу розрахунку кола).

5.2. Скласти коло у відповідності з схемою рис. 6. Виставити необхідне значення опору R_3 і виміряти значення опорів R_1 та R_2 .

5.3. Ввімкнути живлення установки. Провести вимірювання напруг U_1 та U_2 на затискачах реальних джерел, ввімкнених в коло, і на всіх резисторах кола U_{R1} , U_{R2} , U_{R3} , а також струмів I_1 , I_2 , I_3 , у вітках кола.

5.4. Провести перевірку справедливості системи рівнянь, записаних для даного кола за першим (1) та другим (2а) законами Кірхгофа.

5.5. Зобразити графічно схему досліджуваного кола (рис. 6) без вимірювальних приладів і комутуючих елементів. Вказати довільно напрями струмів у вітках кола.

5.6. У відповідності з одержаними значеннями R_1 , R_2 , R_3 , E_1 та E_2 (замість значень е.р.с. E_1 та E_2 ідеальних джерел приймають виміряні значення U_1 та U_2 на затискачах ввімкнених в коло реальних джерел) провести розрахунок струмів у вітках кола заданим методом.

5.7. Співставити значення струмів, одержаних розрахунковим і експериментальним шляхами. Зробити висновки щодо можливих розбіжностей.

Лабораторна робота № 3

Дослідження кола з послідовним сполученням індуктивного та ємнісного елементів

Мета роботи: дослідити властивості ділянки кола з послідовним сполученням елементів з різнохарактерною провідністю в колі синусоїдного струму.

1. Стислі теоретичні відомості

У нерозгалуженому електричному колі синусоїдного струму, що містить елементи з параметрами: активний опір R , індуктивність L , ємність C (рис.1), напруга мережі, що живить коло, дорівнює векторній сумі напруг, що діють на ділянках кола. У відповідності з цим вираз для напруги, що підводиться до електричного кола, можна записати рівняння за другим законом Кірхгофа в комплексній формі

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C, \quad (1)$$

де $\underline{U}_R = R\underline{I}$, $\underline{U}_L = jX_L\underline{I}$, $\underline{U}_C = -jX_C\underline{I}$ – комплексні напруги на елементах кола, що визначаються як добутки комплексного струму на опори R , $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – відповідно активний, індуктивний та ємнісний; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; f – частота джерела живлення.

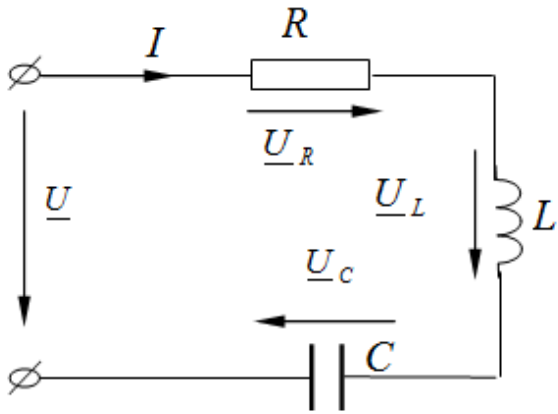


Рис. 1

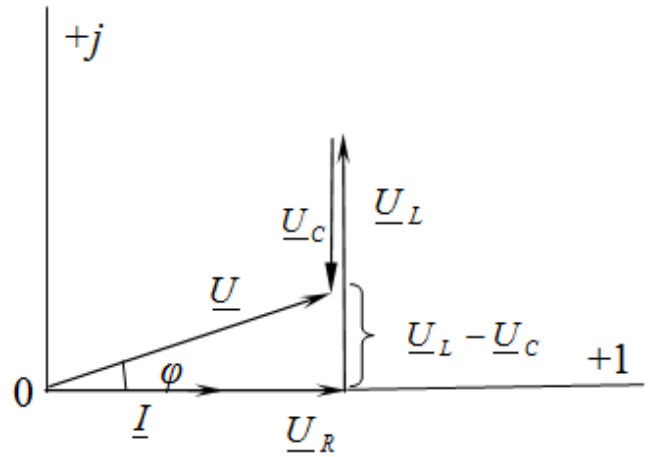


Рис. 2

За рівнянням для комплексної напруги на вході кола можна побудувати векторну діаграму струму та напруг кола, враховуючи, що множення вектора напруги на множник $(+j)$ відповідає повороту його відносно вектора струму на кут $\pi/2$ в додатньому напрямку (проти годинникової стрілки), а множення на $(-j)$ – повороту вектора напруги на кут $\pi/2$ за годинниковою стрілкою.

Вектор напруги \underline{U}_R на активному опорі при цьому співпадає за напрямком з вектором струму \underline{I} . Кут φ – кут між векторами струму та напруги, що прикладена до кола (відкладається від вектора струму до вектора напруги). Побудована таким чином векторна діаграма для електричного кола зображена на рис. 2.

Рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$\underline{U} = R\underline{I} + jX_L\underline{I} - jX_C\underline{I} = [R + j(X_L - X_C)]\underline{I} = \underline{Z}\underline{I}, \quad (2)$$

де $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ – комплексний опір електричного кола для синусоїдного струму. Модуль комплексного опору кола дорівнює:

$$|\underline{Z}| = Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (3)$$

Комплексний опір кола синусоїдного струму залежить не лише від параметрів елементів відповідного двополюсника, але й від частоти напруги живлення, причому для лінійного кола значення як повного опору \underline{Z} , так і його складових не залежать від значення прикладеної напруги. Залежність між діючими значеннями комплексних струму, напруги та комплексним опором кола визначається законом Ома в комплексній формі $\underline{U} = \underline{Z} \underline{I}$ або $\underline{I} = \underline{U} / \underline{Z}$.

З трикутника напруг, що зображений на векторній діаграмі (рис. 2), можна одержати трикутник опорів (рис. 3,а) для даного кола, поділивши сторони цього трикутника на комплексний струм \underline{I} , з розгляду трикутника опорів випливає, що

$$\cos \varphi = R / Z; \quad \sin \varphi = X / Z = (X_L - X_C) / Z. \quad (4)$$

Одержані вирази показують, що кут зсуву фаз φ між струмом та напругою мережі залежить від характеру опорів, ввімкнених в коло синусоїдного струму.

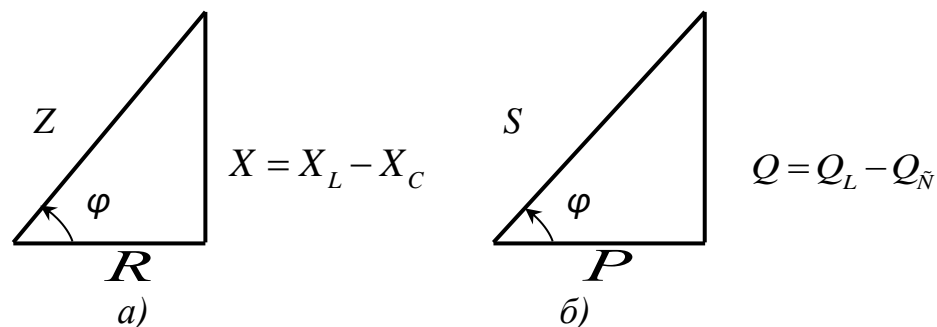


Рис. 3

Помноживши сторони трикутника опорів на квадрат струму в колі I^2 , одержимо трикутник потужностей (рис. 3,б).

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА.} \quad (5)$$

З трикутника потужностей можна встановити залежність між повною S , активною P та реактивно Q потужностями електричного кола:

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi, \text{ Вт.} \quad (6)$$

$$Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi, \text{ Вар.} \quad (7)$$

При цьому реактивна складова повної потужності кола знаходиться як різниця реактивної індуктивної та реактивної ємнісної її складових $Q = Q_L - Q_C$.

Вираз для повної потужності кола змінного струму в комплексній формі має вигляд

$$\underline{S} = \underline{U} \underline{I}^* = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C) = S(\cos \varphi + j \sin \varphi), \quad (8)$$

де $\underline{I}^* = I e^{-j\varphi}$ – спряжене значення комплексу струму $\underline{I} = I e^{j\varphi}$.

В нерозгалуженому електричному колі синусоїдного струму при певних умовах може мати місце резонанс напруг, тобто явище, при якому різниця фаз напруги та струму на вході кола дорівнює нулю. При цьому модуль індуктивного опору дорівнюватиме модулю ємнісного ($X_L = X_C$).

Резонанс напруг, як видно з приведених виразів для X_L та X_C , можна одержати при зміні частоти змінного струму, ємності або індуктивності, а також і при одночасній зміні цих параметрів.

Кутова частота, при якій має місце резонанс при заданих елементах L та C , називається резонансною кутовою частотою:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (9)$$

а частота, при якій настає резонанс – резонансною частотою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (10)$$

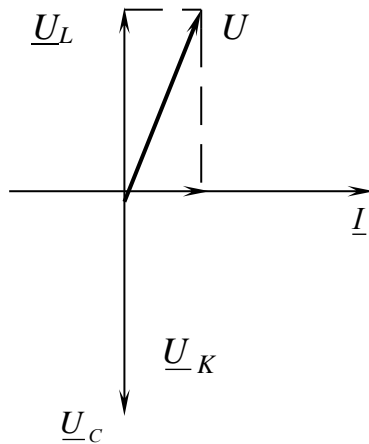


Рис. 4.

Індуктивний та ємнісний опори при резонансі

$$\omega_0 L = 1/(\omega_0 C) = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho. \quad (11)$$

Величина ρ називається характеристичним опором контура (кола).

Відношення напруги на індуктивному або ємнісному елементах при резонансі до напруги, що подається на двополюсник (послідовний контур) називається добротністю контура або коефіцієнтом резонансу. Добротність контура показує, в скільки разів напруга на ідеальних ємнісному або індуктивному елементах при резонансі більша, ніж напруга на вхідних затискачах:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U}. \quad (12)$$

Резонанс напруг характеризується рядом суттєвих моментів.

1. При резонансі напруг комплексний опір двополюсника синусоїдного струму має мінімальне значення та дорівнює його активному

опору, тобто
$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R.$$

2. При незмінній напрузі мережі ($U=const$) при резонансі напруг струм в колі максимальний $\underline{I} = \frac{U}{\underline{Z}} = \frac{U}{R}$. Теоретично струм може досягати великих значень, що визначаються напругою мережі та активним опором котушки.

3. Коефіцієнт потужності при резонансі $\cos \varphi = R/Z = R/R = 1$ має найбільше значення, якому відповідає кут $\varphi = 0$. Це означає, що вектор струму \underline{I} та вектор напруги мережі \underline{U} при цьому співпадають за напрямом, так як вони мають однакові початкові фази $\varphi_s = \varphi_u$.

4. Активна потужність при резонансі $P = RI^2$ має найбільше значення, що дорівнює повній потужності S , в той же час реактивна потужність кола $Q = XI^2 = (X_L - X_C)I^2$ дорівнює нулю. При цьому модулі реактивної індуктивної та реактивної ємнісної складових повної потужності $Q_L = Q_C = X_L I^2 = X_C I^2$ можуть набувати теоретично досить великих значень, в залежності від значень струму та реактивних опорів.

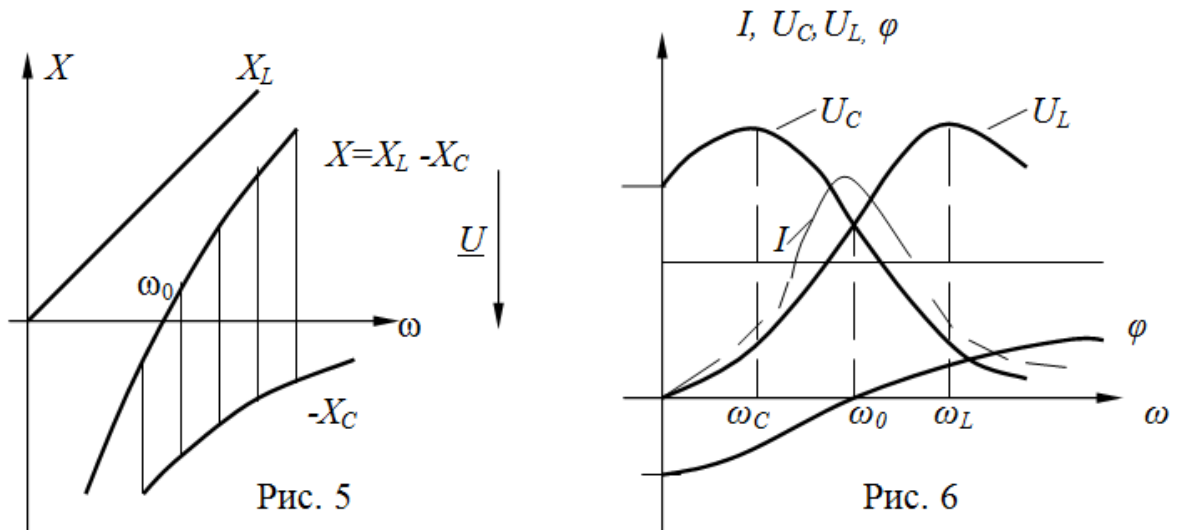
5. При резонансі напруг напруги на ємності та індуктивності будуть однаковими $U_C = U_L = X_C I = X_L I$ і, в залежності від струму та реактивних опорів, можуть досягати значень, які в багато разів перевищують напругу джерела. При цьому напруга на активному опорі буде дорівнювати напрузі джерела.

Якщо до контура (рис. 1) прикладена синусоїдна напруга, амплітуда якої незмінна, а частота може змінюватись в межах від 0 до ∞ , зміна частоти приводить до зміни параметрів контура. Змінюються його

реактивний та повний опори, а також кут φ . Залежності від частоти параметрів кола називаються частотними характеристиками кола, залежності діючих або амплітудних значень струму і напруги від частоти – резонансними кривими.

На рис. 5 побудовані частотні характеристики $X_L(\omega)$, $-X_C(\omega)$.

$X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega)$. Зміна реактивного опору приводить до зміни режиму кола. На рис. 6 приведені резонансні криві $I(\omega)$, $U_L(\omega)$, $U_C(\omega)$, $\varphi(\omega)$ для кола, що має добротність $Q \approx 1.25$. При $\omega=0$ напруга, прикладена до кола, не змінюється в часі, тому струм в колі відсутній. При зміні частоти від 0 до ω_0 реактивний опір $X = X_L - X_C$ має ємнісний характер та змінюється від $-\infty$ до 0 (рис. 5). Внаслідок цього струм зростає від 0 до максимального резонансного значення, а кут зсуву фаз між напругою та струмом змінюється від $-\pi/2$ до 0. При зміні частоти від ω_0 до ∞ результуючий реактивний опір зростає від 0 до ∞ та матиме індуктивний характер. Внаслідок цього струм зменшується від найбільшого значення до 0, а кут φ збільшиться від 0 до $\pi/2$. Напруга $U_R = RI$ змінюється пропорційно струму.



У виразі для напруги на індуктивності $U_L = X_L I$ обидва множники залежать від частоти. При $\omega=0$ опір $X_L=0$ та $U_L=0$. При зміні частоти від 0 до ω_0 обидва множники збільшуються та U_L зростає. При подальшому

зростанні частоти ($\omega > \omega_0$) струм I зменшується, але за рахунок зростання ωL напруга U_L продовжує збільшуватися.

Тепер розглянемо залежність напруги на ємності $U_C = X_C I$ від частоти. При $\omega = 0$ струму в колі немає, тому $U_C = U$. При зростанні ω , починаючи з нуля, X_C неперервно зменшується. Зменшення напруги $U_C = X_C I$ з ростом частоти починається при частоті ω_C , меншій ω_0 , внаслідок неперервного зменшення X_C . При $\omega = \infty$ I та X_C дорівнюють нулю, тому $U_C = 0$.

Графік залежності струму від частоти показує, що дане коло має вибіркові властивості. Коло має найменший опір для струму тієї частоти, яка найближча до її резонансної частоти.

Вибіркові властивості таких кіл широко використовують у зв'язку та радіотехніці, при цьому режим резонансу є нормальним режимом роботи. З іншого боку, резонанс напруг у промислових електротехнічних установках - небажане та небезпечне явище, оскільки він може привести до аварії внаслідок неприпустимого перегрівання окремих елементів електричного кола або до пробоя ізоляції обмоток електричних машин при можливому перевантаженні на окремих ділянках кола.

4. Опис дослідної установки і схема досліді

В склад дослідної установки входять :

- реостат з опором 0..100 Ом на струм до 5 А;
- магазин конденсаторів на ємності 0.5; 1; 2; 4; 8; 16; 32; 64 мкФ;
- котушка на 127/220 В з розбірним осердям з електротехнічної сталі (входять комплект розбірного лабораторного трансформатора 220/127/6 В);
- амперметр з вех межами вимірювання 0 ... 1 А;
- фазометр.
- вольтметр 0... 250 В.

Живлення установки здійснюється від регульованого трансформатора 0..250 В, укомплектованого вольтметром з межею вимірювання 250 В.

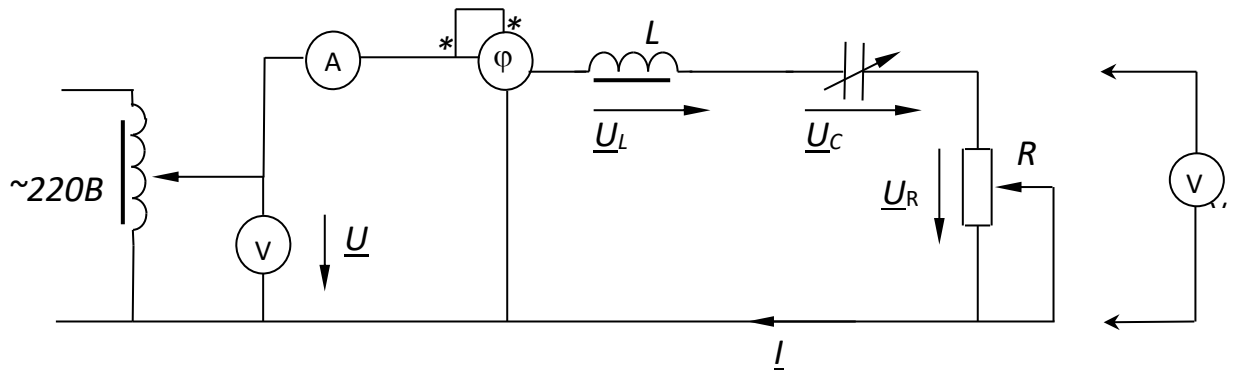


Рис.8

Дослід проводиться в умовах, наближених до реальних в електричних мережах, тобто при незмінній частоті і напрузі мережі і при зміні параметра одного з реактивних елементів кола (ємності батареї конденсаторів). Дослід проводиться при стрибкоподібній зміні ємності в 2 рази від 1 до 64 мкФ, що відповідає зміні опору кола від активно-ємнісного до активно-індуктивного, і переходом через чисто активний в резонансному режимі.

Параметри котушки підібрано так, що при певному значенні ємності батареї конденсаторів режим роботи кола близький до резонансного. Точна настройка в резонанс досягається зміною сили струму в колі. Внаслідок цього має місце плавна зміна в невеликих межах індуктивності котушки з феромагнітним осердям. Таку котушку можна вважати лінійною лише в першому наближенні; в даному випадку $L = L(I)$. Зміна сили струму регулюється або зміною напруги \underline{U} на вході кола, або зміною опору R реостата.

5. Завдання для проведення досліду і обробки результатів

1. Скласти коло за схемою рис.8
2. Виставити значення напруги U в межах 150-200 В.
3. Змінюючи ємність батареї конденсаторів, досягти мінімального значення кута зсуву фаз $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$.
4. В невеликих межах змінюючи вхідну напругу U або опір реостата R , встановити резонансний режим роботи кола. При цьому $\varphi = 0$, $X_L = X_C$. Покази всіх приладів і значення ємності $C = C_{рез}$ занести в таблицю.
5. За даними, одержаними при виконанні п. 4, побудувати векторну діаграму напруг і знайти значення індуктивності L та опору котушки R_K .
6. Залишаючи незмінним значення вхідної напруги U та опору реостата R , змінити вдвічі ємність батареї конденсатора C в бік збільшення. Покази приладів і значення ємності конденсатора занести в таблицю.
7. Повторити всі операції за пунктом 6 аж до досягнення значення ємності $C = 64$ мкФ. Далі ці ж операції повторити при зміні ємності від $C = C_{рез}$ до $C = 0,5$ мкФ.
8. За даними таблиці побудувати графіки залежності U_L , U_C , U_R , I , U_{LC} , φ від $C/C_{рез}$. Для зручності побудови графіка по осі абсцис відкласти величину $\log_2 C / C_{рез}$, враховуючи те, що ємність батареї змінюється стрибкоподібно в 2 рази.
8. Зробити висновки по роботі.

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАНКИ З ПАРАЛЕЛЬНИМ СПОЛУЧЕННЯМ ВІТОК З ІНДУКТИВНИМ ТА ЄМНІСНИМ ЕЛЕМЕНТАМИ

Мета роботи: дослідити процеси у паралельно сполучених вітці з конденсатором та вітці з котушкою індуктивності в залежності від частоти синусоїдного струму, в тому числі явище резонансу.

1. Стислі теоретичні відомості

Розглянемо випадок паралельного сполучення двох віток з різнохарактерними реактивними опорами, що перебувають під синусоїдною напругою (рис.1,а).

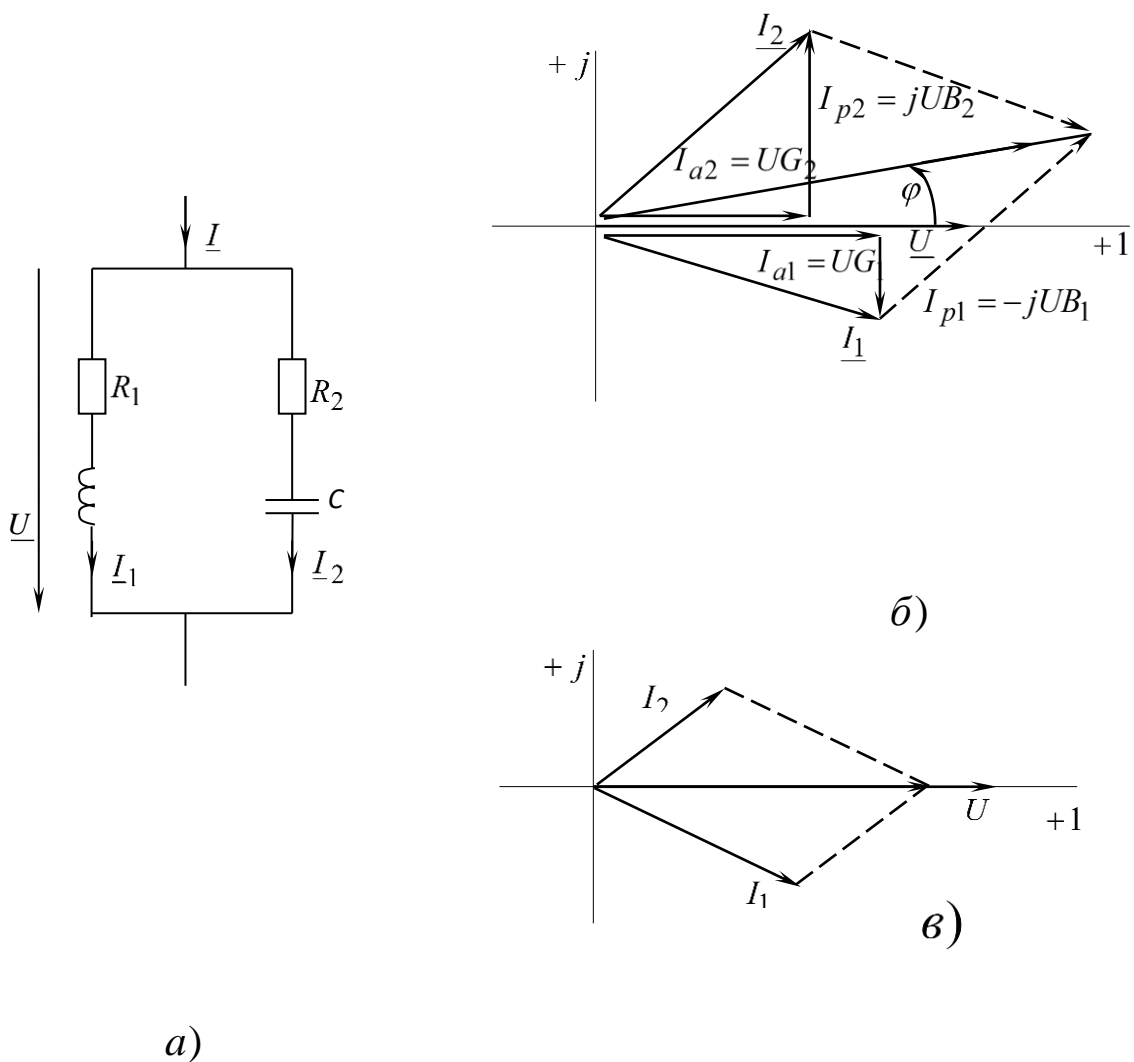


Рис.1

Комплексна провідність першої вітки

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + j\omega L} = \frac{R_1 - j\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = G_1 - jB_1, \quad (1)$$

де $G_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L)^2}$ - активна;

$$B_1 = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} - \text{реактивна складові провідності.}$$

Аналогічно комплексна провідність другої вітки дорівнює

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R_2 - \frac{j}{\omega C}} = \frac{R_2 + \frac{j}{\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = G_2 + jB_2, \quad (2)$$

де $G_2 = \frac{R_2}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ - активна;

$$B_2 = \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} - \text{реактивна складові провідності.}$$

Очевидно, що комплексний струм

$$\underline{I} = \underline{U}\underline{Y} = \underline{U}(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2) = \underline{U}(G_1 + G_2) + j\underline{U}(B_2 - B_1) = I_{a1} - jI_{p1} + I_{a2} + jI_{p2} \quad (3)$$

являє собою геометричну суму активної і реактивної складових (рис1,б).

Можна зробити висновок, що активні складові струму як в окремих вітках $I_{a1} + I_{a2}$, так і в нерозгалуженій частині кола залежать не лише від активних, але й від реактивних складових опорів віток 1 та 2. Те ж саме можна сказати і про реактивні складові струмів $I_p = I_{p1} + I_{p2}$.

Якщо $B_1 = B_2$, тобто

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1/\omega C}{R_2^2 + (1/\omega C)^2}, \quad (4)$$

провідність двополосника виявляється чисто активною, тобто має місце резонанс струмів.

Частота резонансу $\omega_{рез}$ може бути знайдена з виразу (4) і становить

$$\omega_{рез} = \omega_0 \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}, \quad (5)$$

де $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ - резонансна частота в контурі без втрат, тобто в контурі, для якого $R_1 = R_2 = 0$.

Величина $\sqrt{L/C} = \rho$ називається характеристичним опором контура або кола. Тоді вираз (5) можна записати:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}.$$

Так як резонансна частота – величина дійсна і додатня, чисельник і знаменник виразу (5) повинні мати однаковий знак. Це можливо, якщо:

- 1). $L/C > R_1^2$ і $L/C > R_2^2$;
- 2). $L/C < R_1^2$ і $L/C < R_2^2$.

Якщо $L/C = R_1^2 = R_2^2$, $\omega_{рез} = \omega_0 \sqrt{0}$. Це означає, що резонанс

може мати місце на всіх частотах.

Провідність контура при цьому чисто активна і становить

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = G_1 + G_2 = \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{2R_2} = \frac{1}{R_1}$$

(щоб отримати цей результат, потрібно у вираз для складових провідності

підставити $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$).

Реальні конденсатори мають значно менші відносні втрати, ніж реальні котушки індуктивності. Тому, якщо резистори R_2 та R_1 розглядати як еквівалентні опори втрат в конденсаторі та котушці індуктивності відповідно, величиною R_2 можна знехтувати. Якщо $R_2 = 0$, то умова резонансу (4) набуває вигляду

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \omega C ,$$

звідки

$$L/C = R_1^2 + \omega^2 L^2 ; \quad \omega_{рез} = \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L^2}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_1^2}{L^2}} .$$

Якщо $R_1 \ll \omega L$, то $\omega_{рез} \approx \sqrt{\frac{1}{LC}} = \omega_0$.

При резонансі сила струму в нерозгалуженій частині кола

(при $R_2 = 0$, $R_1 \ll \omega L$) дорівнює

$$\underline{I} = \underline{U} \frac{R_1}{R_1 + (\omega L)^2} \approx \frac{R_1}{(\omega L)^2} \cdot$$

Векторна діаграма струмів у колі рис.1 при резонансі має вигляд показаний на рис.1,в.

Комплекс потужності, що споживається колом рис.1,

$$\tilde{S} = \underline{U} \underline{I}^* = \underline{U} (\underline{U} \underline{Y})^* = P + jQ ,$$

де $S = UI$, ВА – повна потужність; $P = \text{Re } \tilde{S} = UI \cos \varphi$, Вт – активна; $Q = \text{Im } \tilde{S} = UI \sin \varphi$, ВАр – реактивна складові потужності.

Легко бачити, що при частоті $\omega < \omega_{рез}$ реактивна потужність $Q < 0$ і має ємнісний характер; при $\omega > \omega_{рез}$ $Q > 0$ і реактивна потужність має індуктивний характер. На частоті резонансу $Q = 0$.

Компенсація зсуву фаз. Вхідний опір більшості споживачів електричної енергії має індуктивний характер. Для того, щоб зменшити споживаний ними струм за рахунок зниження його реактивної складової і цим зменшити втрати енергії в генераторі і провідниках, по яких протікає струм, паралельно до приймача вмикають батарею конденсаторів.

Зменшення зсуву фаз між напругою на приймачеві і струмом, який споживається від генератора, називають компенсацією зсуву фаз.

Компенсацію зсуву фаз застосовують для енергоємких споживачів, наприклад для великих заводів. Здійснюється вона в місці вводу ліній живлення в розподільчому пристрої. Економічно вигідно компенсуючі пристрої підключати на більш високу напругу (струм через конденсатори $I_C = U\omega C$). Кут зсуву фаз φ між напругою і струмом, які споживаються від джерела живлення, доводять до значення, при якому $\cos \varphi \approx 0.9 \div 0.95$.

Якщо до контура прикладена синусоїдна напруга \underline{U} , амплітуда якої незмінна, а частота може змінюватися в межах від 0 до ∞ , то зміна частоти приводить до зміни параметрів контура (змінюється його реактивний та повний опори, а також кут φ). Залежності від частоти параметрів кола називають частотними характеристиками кола. Залежності діючих або амплітудних значень струму і напруги від частоти – резонансними кривими.

2. Контрольні питання

1. Що називається комплексним опором (комплексною провідністю) вітки?
Запишіть вирази для комплексного опору і комплексної провідності вітки, в склад якої входять послідовно з'єднані резистор, котушка індуктивності та конденсатор.
2. Зобразіть трикутники провідностей вітки з послідовним сполученням LC елементів, вітки з послідовним сполученням RC елементів і ділянки кола з паралельним сполученням цих віток.
3. На які складові можна розкласти вектори струмів I, I_L, I_C в колі рис.1?
Запишіть відповідні вирази.
4. Поясніть порядок побудови векторної діаграми для кола, що складається з двох паралельних віток, в одну з яких ввімкнено резистор та котушку індуктивності, а в іншу – резистор та конденсатор.
5. В яких колах може мати місце резонанс струмів?
6. Яка умова резонансу струмів? Запишіть відповідні вирази для контура з втратами, для ідеального контура.
7. Які параметри кола необхідно змінювати, щоб одержати резонанс струмів?
8. Що називають резонансною частотою?
9. Що називають характеристичним опором кола?
10. Що називають добротністю контура?

11. Що називають частотними характеристиками та резонансними кривими?
12. Який вигляд мають резонансні криві при резонансі струмів?
13. Запишіть вирази для потужностей в колі (повної, активної, реактивної), якщо відомі значення провідностей його віток.
14. Чому дорівнює повна провідність кола при резонансі струмів? Чому дорівнюють повна потужність кола, її складові та коефіцієнт потужності при резонансі струмів?
15. Що таке компенсація зсуву фаз? В яких випадках і як вона застосовується?
16. Наведіть приклади практичного використання явища резонансу струмів.

3. Завдання для самостійної підготовки

1. Дайте відповіді на контрольні питання.
2. Знайдіть частоту резонансу контура за схемою рис.1. Значення параметрів його елементів вказані в таблиці.

№ шифру	R_1 , Ом	L , Гн	C , мкФ	R_2 , Ом
0	10	0,1	0,01	0
1	30	0,2	0,02	30
2	100	0,3	0,01	0
3	10	0,4	0,02	10
4	$\sqrt{50}$	0,5	0,01	$\sqrt{50}$
5	100	0,6	0,02	100
6	10	0,7	0,01	0
7	30	0,8	0,02	30
8	100	0,9	0,02	0
9	10	1,0	0,01	10

4. Опис дослідної установки і схем дослідів

Елементи досліджуваного контура закріплені на панелі, вигляд якої зображено на рис.2.

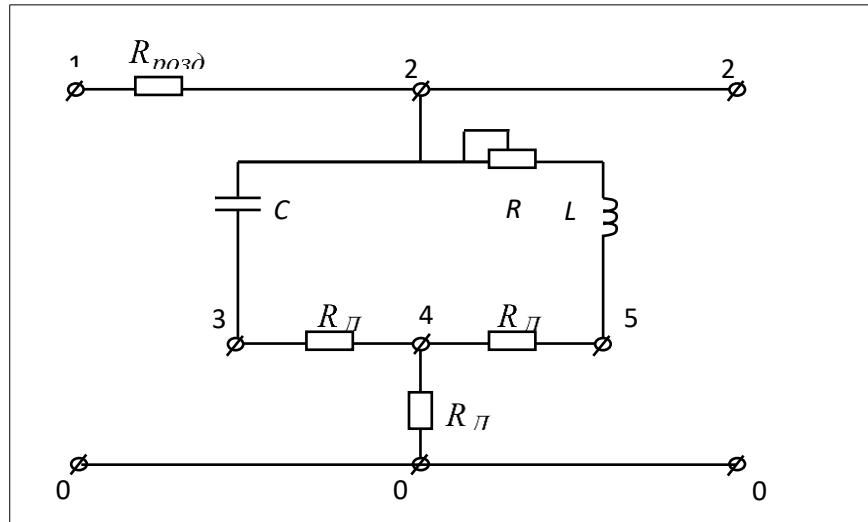


Рис.2

На лицевій стороні панелі показана схема сполучення її елементів, а також закріплені затискачі, які дозволяють виконати сполучення з іншими приладами установки.

Крім конденсатора C і котушки індуктивності L , в досліджувану схему входять резистор змінного опору $R=0\dots 1$ кОм, ввімкнений у вітку з котушкою індуктивності. У вітку з конденсатором, вітку з котушкою індуктивності та нерозгалужену частину кола ввімкнено калібровані резистори з опором $R_D = 1$ Ом, кожен з яких призначено для вимірювання струмів у відповідних вітках за величиною спаду напруги U_D . Так як $U_D = IR_D$, а $R_D = 1$ Ом, то сила струму у відповідній вітці чисельно дорівнює напрузі. В зв'язку з малим значенням опору R_D його впливом на властивості контура можна знехтувати.

Резистор $R_{розд}$ служить для розділення потенціалів на затискачах генератора синусоїдного сигналу ГЗЧ (затискач 1) і досліджуваного

контура (затискач 2) при дослідженні залежності напруги на контурі від частоти (схема рис.5).

На дослідну панель подається синусоїдна напруга сталої амплітуди від вимірювального генератора звукових частот ГЗЧ, в ролі якого використовують відповідну панель лабораторного стенду або спеціальний вимірювальний генератор.

Вимірювання струмів і напруг на елементах досліджуваного контура здійснюється за допомогою двопробеневого осцилографа. Використання такого осцилографа дозволяє одночасно спостерігати дві змінні в часі величини, наприклад, напругу, що подається на затискачі 1-0, і напругу на контурі (затискачі 2-0), або напругу на контурі і струм в його нерозгалуженій частині (відповідні пари затискачів 2-0 та 4-0), або струм у вітці з конденсатором і вітці з котушкою (затискачі 3-0 та 5-0 при замкнутих затискачах 4-0).

Правила користування вимірювальним генератором та установкою приведені додатках 2 та 3.

Схема для дослідження залежності струмів I_C, I_L у вітках від частоти ω показана на рис. 3. Осцилограми цих струмів при резонансі зображені на рис.4.

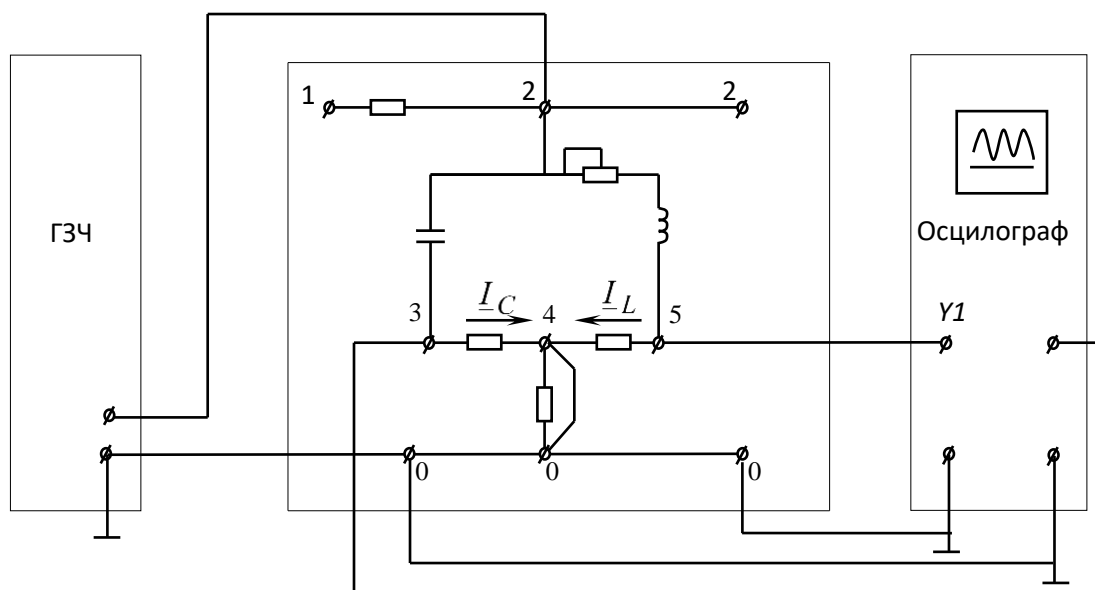


Рис. 3

Вимірювальні прилади установки з дослідною панеллю сполучаються за допомогою екранованих кабелів. При цьому екрани гнучких кабелів виконані у вигляді сітчастої оболонки з мідних провідників, які сполучені з корпусами приладів і, як правило, сполучаються з точками схем з нульовим потенціалом.

Схема для дослідження залежності від частоти напруги на контурі і сумарного струму $I = I_L + I_C$ віток з конденсатором і котушкою показана на рис.5

Напруги, пропорційні цьому струму, подають на вхід Y_1 осцилографа. На вхід Y_2 подають напругу, пропорційну напрузі U на контурі.

При дослідженні залежності напруги U на контурі від частоти сигнал від генератора слід подавати не на затискачі 2-0, а на затискачі 1-0 (щоб розділити потенціали на виході генератора і на контурі).

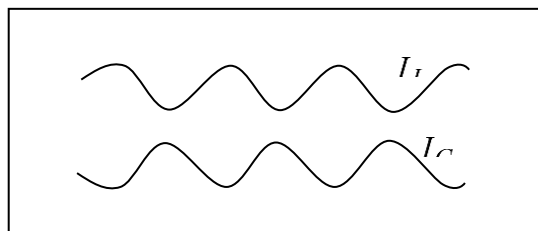


Рис.4. Вигляд осцилограм струмів I_L та I_C при резонансі.

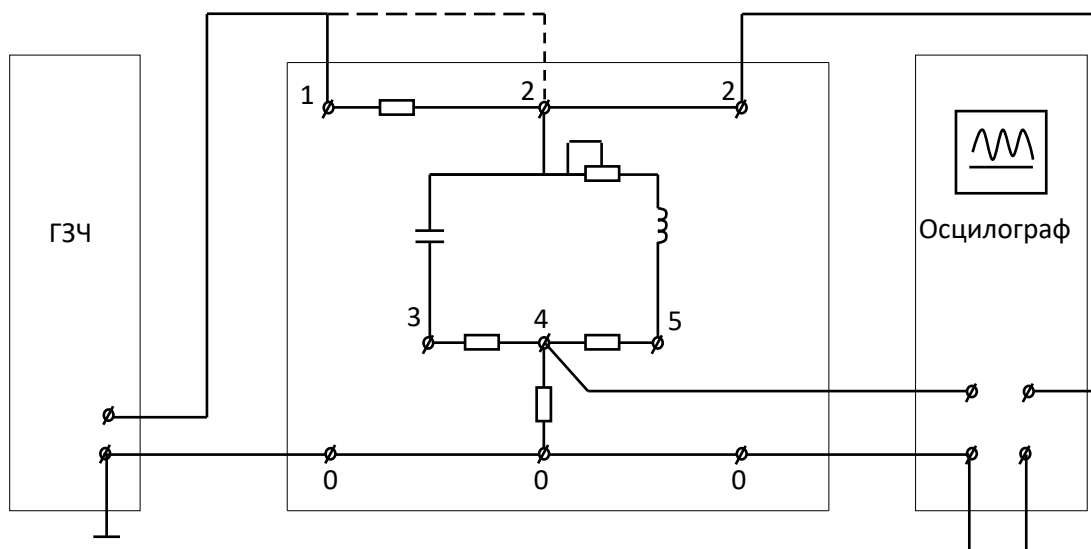


Рис.5

5. Завдання по проведенню дослідів і обробці їх результатів

1. Зібрати коло за схемою рис.3. Значення опору R резистора виставити найменшим (повернути його вісь до упору проти годинникової стрілки). Ввімкнути осцилограф та генератор. Виставити напругу на виході генератора в межах 1...10 В. Змінюючи його частоту в діапазоні 20 Гц – 20 кГц, знайти частоту резонансу, виходячи з того, що при резонансі струми I_L та I_C практично однакові за величиною і протилежні за фазою (рис.4). Зняти частоту $\omega_{рез}$ і занести в таблицю.
2. Зняти частотну залежність величин I_L та I_C . Для цього частоту генератора змінювати в 1,1 разів відносно $\omega_{рез}$ (п'ять точок при $\omega > \omega_{рез}$ і п'ять точок при $\omega < \omega_{рез}$). Дані занести в таблицю. При вимірюванні струму користуватись відносними одиницями (числом поділок на екрані осцилографа).
За одержаними даними побудувати графіки $I_L(\omega)$, $I_C(\omega)$.
3. Аналогічно до п.2 зняти частотні залежності величин I , U і побудувати графіки (при знятті значень $U(\omega)$ сигнал від генератора подавати на затискач 1).
4. Порівняти графіки, одержані за результатами виконання п.2 та п.3. Зробити висновки.
5. Встановити максимальне значення опору R . Повторити досліди за п.2 та п.3.
6. побудувати векторну діаграму струмів при резонансі для досліду за п.5.
7. Зробити загальні висновки по роботі.

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: вивчення будови та принципу дії однофазних трансформаторів; визначення параметрів його схеми заміщення за даними дослідів ненавантаженого режиму і короткого замикання.

1. Стислі теоретичні відомості

Принцип дії, будова, класифікація і призначення трансформаторів.

Трансформатором називається статичний електромагнітний пристрій, який призначений для перетворення електричної енергії змінного струму з одними параметрами (наприклад, струму, його форми та початкової фази) в електричну енергію з іншими параметрами при збереженні частоти струму незмінною.

Будова трансформатора схематично показана на рис. 2. На замкнутому магнітопроводі 3, зібраному з листової електротехнічної сталі або навитому з станції електротехнічної стрічки, розміщені дві ізольовані обмотки 1 і 2 з числами витків w_1 та w_2 . Обмотку 1 називають *первинною*; обмотка 2, до затискачів якої приєднується споживач, називають *вторинною*.

Змінний струм, який протікає по первинній обмотці, створює в феромагнітному осерді змінний магнітний потік Φ . Цей потік пронизує обидві обмотки і спричиняє виникнення в кожній з них змінної е.р.с. Через те вторинна обмотка може розглядатися як джерело змінного струму. Якщо вторинне коло буде замкнуте, то по ньому буде протікати струм.

На рис.2. зображений двообмотковий трансформатор. На осерді – магнітопроводі 3 можна розташувати декілька вторинних обмоток з різною кількістю витків і отримати відповідно декілька різних вторинних напруг. Такі трансформатори називають багатообмотковими.

За функціональною ознакою трансформатори можна поділити на декілька основних класів: *силові* або *трансформатори живлення* (в тому числі підвищуючі і понижуючі напругу мережі); *імпульсні*, які використовують для перетворення імпульсів електричного струму або напруги; *вимірювальні* (понижуючі, призначені для вимірювання головним чином великих напруг і струмів); *узгоджувальні* (в тому числі міжкаскадні, вихідні та інші), які призначені для узгодження повних електричних опорів; *радіочастотні*, які призначені для роботи в діапазоні високих частот.

Застосування трансформаторів в системах передачі і розподілу електроенергії

Відомо, що для передачі електроенергії на великі відстані будують лінії електропередач і з'єднують ними райони виробництва і споживання електроенергії. При цьому частина енергії неминуче втрачається на нагрівання провідників лінії передачі. Використання силових трансформаторів якраз і дозволяє зменшити їх до мінімуму.

Втрати в електричних проводах $P_{ел}$ (Вт) при передачі електричної енергії залежить від сили струму і величини опору проводів:

$$P_{ел} = I^2 \cdot R \quad (1)$$

де I – сила струму в електричних проводах, А;

R – опір проводів лінії передачі, Ом

Легко бачити, що заданих параметрах лінії (зокрема, величині R) зменшення втрат можливе тільки за рахунок зменшення сили струму I .

Зменшення втрат за рахунок зниження опору провідників невігідне тому, що вимагає збільшення площі перерізу проводів, тобто додаткових

витрат дефіцитних матеріалів, що абсолютно неприпустимо при великих відстанях. Очевидно, більш доцільно йти іншим шляхом – шляхом зниження сили струму, тим більше, що втрати в лінії пропорційні квадрату струму, і його зменшення, наприклад, в 2, 3, 4 рази зменшує втрати відповідно в 4, 9, 16 разів. Однак зменшення струму не повинно впливати на величину потужності, яка передається по лінії – вона повинна залишатися незмінною. Відомо, що потужність дорівнює добутку струму на напругу:

$$P = U \cdot I \quad (2)$$

де U – напруга, В;

I – сила струму, А.

Отже, передача постійної за величиною потужності при малому значенні струму можлива лише в тому випадку, коли одночасно із зменшенням струму буде зростати напруга. Наприклад, якщо струм зменшиться в 2, 3 або 4 рази, напруга повинна відповідно збільшитися в 2, 3, або 4 рази.

З багатьох технічних причин генератори електричної енергії неможливо виготовляти на дуже високі напруги. Навіть найбільш громіздкі генератори електричного струму мають напругу не більше 20...24 кВ. Але таку напругу можна використовувати лише на невеликих відстанях від електростанції. Для того щоб передача електроенергії на відстань в декілька сотень і навіть тисяч кілометрів була вигідною, необхідні значно більші напруги (500, 750 кВ і більше). В цьому випадку і приходиться на допомогу трансформатор. В місці виробництва електроенергії – на електростанціях – напруга підвищується і передається до місця споживання, де для зручності споживачів напруга понижується до 500, 380, 220, 127, 36, 24, 12, 6 В. Приблизна схема передачі електроенергії на велику відстань приведена на рис. 1. На цьому рисунку T_1 – підвищуючий трансформатор; T_2 – понижуючий трансформатор.

За допомогою трансформаторів зручно ізолювати електричні кола одне від одного, зв'язуючи їх тільки магнітним шляхом.

Інтенсивність магнітного поля, тобто магнітна індукція, пропорційна струму, залежить від числа витків первинної обмотки і властивостей феромагнітного осердя (від магнітної проникності). Чим більша магнітна проникність феромагнетика, тим більший магнітний потік Φ_0 та е.р.с. E_0 .

З принципу дії трансформатора випливає, що він може працювати тільки на змінному струмі, тому що при постійному магнітному потоці е.р.с. в обмотках виникати не будуть.

Величина е.р.с., яка індукується в одному витку первинної і вторинної обмоток, визначається за законом електромагнітної індукції:

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} \quad (3)$$

Для магнітного потоку, який змінюється за синусоїдним законом,

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t \quad (4)$$

де Φ і Φ_m – миттєве та амплітудне значення потоку.

Звідси маємо:

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} = -\Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t = \omega \cdot \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

Позначимо амплітудне значення е.р.с. в одному витку

$$E_m = \omega \cdot \Phi_m; \quad (6)$$

тоді

$$e = E_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (7)$$

Таким чином, індуктивна е.р.с. відстає за фазою від потоку на $\frac{\pi}{2}$, а

діюче значення е.р.с. в одному витку

$$E = \frac{\omega \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 \cdot f \cdot \Phi_m = \sqrt{2}\pi \cdot f \cdot \Phi_m, \quad (8)$$

де f – частота мережі живлення, Гц

Якщо в первинній обмотці w_1 витків, а у вторинній w_2 витків, то повна е.р.с. кожної обмотки буде:

$$E_1 = 4.44 \cdot w_1 \cdot f \cdot \Phi_m = 4.44 \cdot w_1 \cdot f \cdot B_m \cdot S, \text{ В} \quad (9)$$

$$E_2 = 4.44 \cdot w_2 \cdot f \cdot \Phi_m = 4.44 \cdot w_2 \cdot f \cdot B_m \cdot S, \text{ В} \quad (10)$$

де B_m – магнітна індукція, Тл;

S – площа поперечного перерізу осердя трансформатора (див. рис. 1.2), м²;

w_1, w_2 – кількість витків первинної і вторинної обмоток трансформатора.

Відношення е.р.с. первинної і вторинної обмоток або відношення їх числа витків називається *коефіцієнтом трансформації*:

$$k_{mp} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (11)$$

Для підвищуючих трансформаторів $w_1 > w_2$ і $k_{тр} > 1$. Для понижуючих трансформаторів $w_1 < w_2$ і $k_{тр} < 1$. Таким чином, якщо ми хочемо підвищити отриману від генератора напругу в 10, 100 або 1000 разів, то необхідно так підібрати обмотки трансформатора, щоб кількість витків w_2 вторинної обмотки була більшою кількості витків w_1 первинної обмотки відповідно в 10, 100, 1000 раз.

Таким чином, будь який трансформатор може працювати і як підвищуючий, і як понижуючий. Все залежить від того, до якої з обмоток буде підведена напруга для перетворення. Обмотка трансформатора, до якої підводиться енергія змінного струму, називається *первинною*. Обмотка трансформатора, до якої під'єднується навантаження, називається *вторинною*.

Первинна активна потужність, яка споживається трансформатором з мережі дорівнює:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (12)$$

Вторинна активна потужність, тобто потужність, яка віддається споживачу дорівнює:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (13)$$

Якщо не враховувати втрати в трансформаторі, тоді:

$$P_1 \approx P_2; \quad \varphi_1 \approx \varphi_2 \quad (14)$$

і важати, що напруги обмоток мало відрізняються від їх е.р.с. тоді:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2 \text{ або } \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{1}{k_{mp}} \quad (15)$$

При пониженні напруги вторинної обмотки в k_{mp} разів вторинний струм буде більше струму первинної обмотки відповідно в k_{mp} разів навпаки.

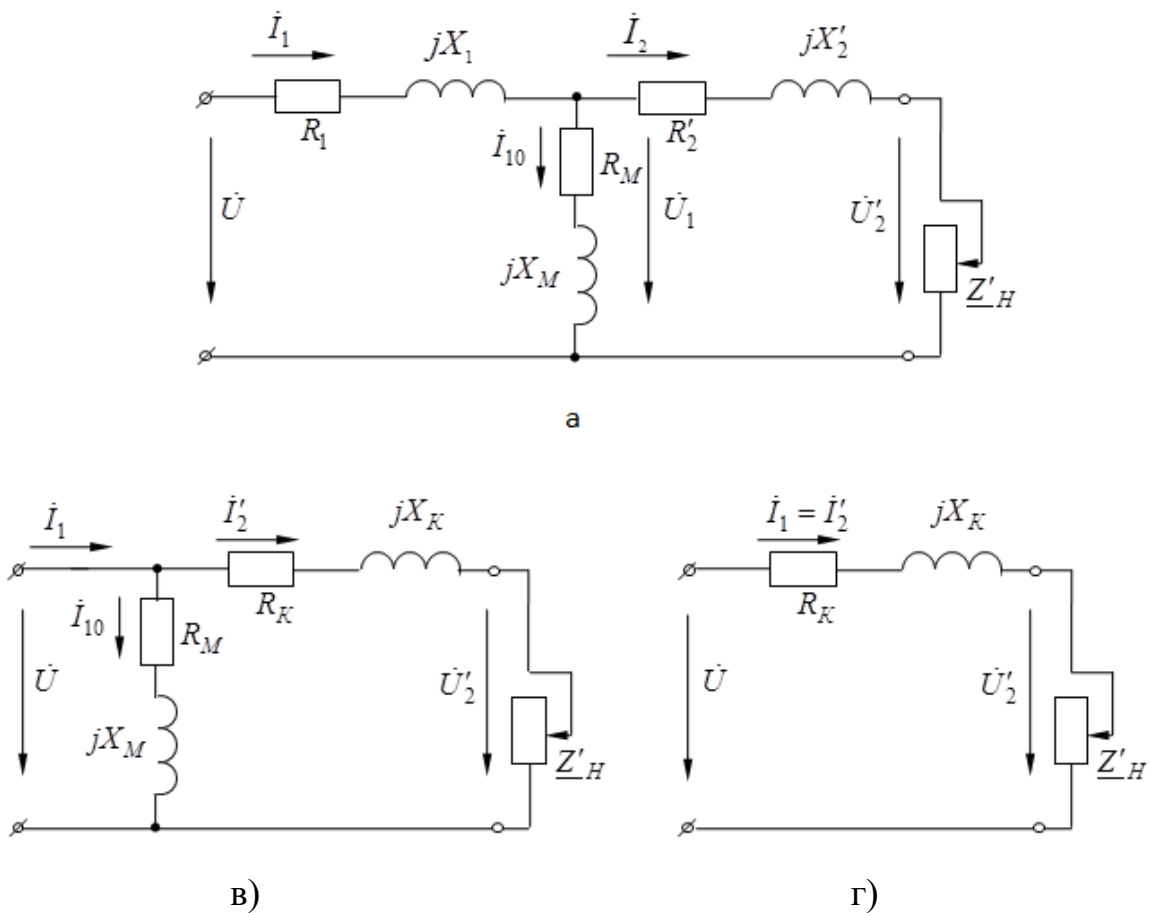


Рис. 1.

Еквівалентні схеми заміщення трансформатора для аналізу і розрахунків режимів його роботи, тому їх називають *розрахунковими схемами заміщення трансформатора (рис 1)*.

3. Завдання для підготовки до роботи

3.1 Дати відповіді на контрольні питання.

3.2 Визначити основні параметри трансформатора, позначені в табл. 1 знаки запитання, за вихідними даними, наведеними в тій же таблиці.

№ шифру	$S_{ном}$, кВ·А	$U_{1ном}$, В	$U_{2ном}$, В	$I_{1ном}$, А	$I_{2ном}$, А	w_1 , витків	w_2 , витків	$k_{тр}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
0								

3.3 Одержані в дослідах короткого замикання і не навантаженого режиму, значення $P_{ст}$ та P_m становить відповідно 300 та 200 Вт. Визначити параметри елементів схеми заміщення трансформатора, виходячи з деяких і результатів виконати п. 3.2. побудувати схему заміщення.

4. Опис лабораторної установки і схем дослідів

В склад установки входять:

1. Досліджуваний трансформатор з параметрами $U_{1\text{ном}} = 220 \text{ В}$, $S_{\text{ном}} = 0,25 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $f = 50 \text{ Гц}$.
2. Джерело напруги 220 В , 50 Гц .
3. Джерело регульованої напруги $0 \dots 36 \text{ В}$, 50 Гц .
4. Амперметр.
5. Вольтметр.
6. Ватметр.
7. Елементи навантаження трансформатора (резистивні, індуктивні, ємнісні).

Схема дослідів в ненавантаженому режимі зображена на рис.2.

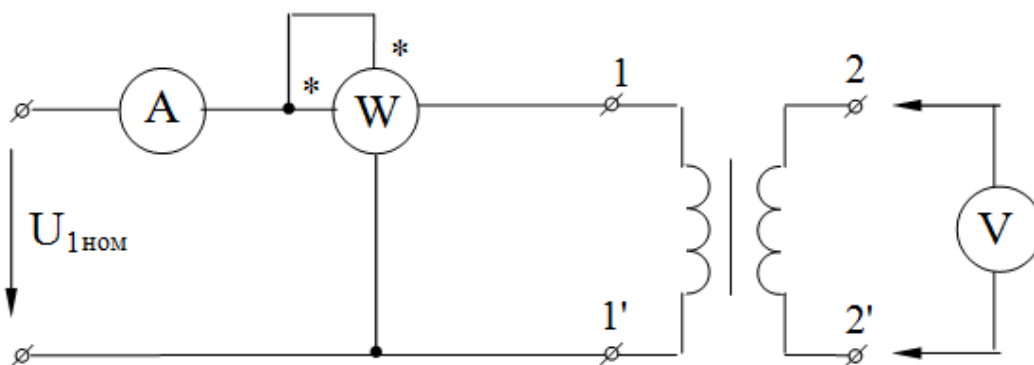


Рис. 2.

На рис.3 зображена схема дослідів короткого замикання.

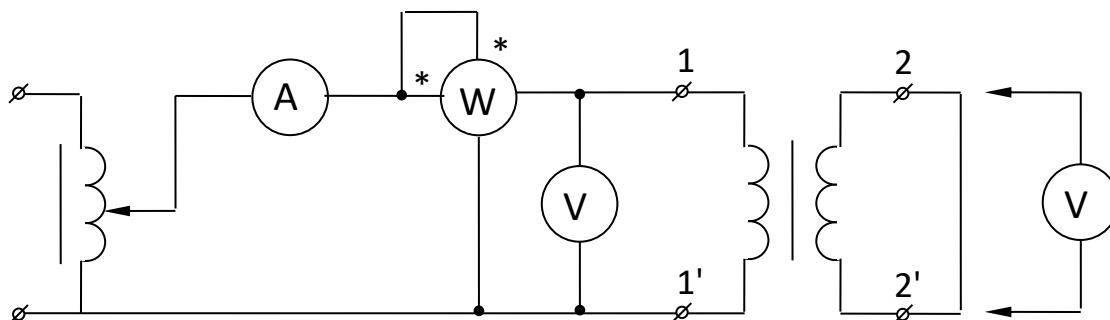


Рис. 3.

Схема дослідження навантаженого режиму при різнохарактерному навантаженні представлена на рис.4.

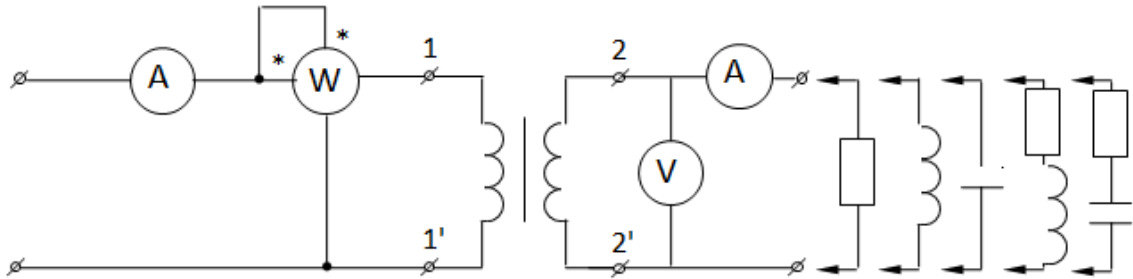


Рис. 4

5. Завдання по проведенню дослідів і обробці їх результатів

1. Виписати паспортні значення $U_{1\text{ном}}$, $S_{\text{ном}}$ трансформатора. Знайти значення $I_{\text{ном}}$.
2. Скласти схему для дослідження ненавантаженого режиму, провести дослід і визначити $U_{2\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$, $I_{\text{нн}}$ коефіцієнт трансформації k , а також потужність втрат в сталі $P_{\text{ст}}$. Знайти значення коефіцієнта взаємної індукції M між обмотками. Дані вимірювань занести у таблицю.
3. Скласти схему для дослідження режиму короткого замикання. При проведенні цього дослідів напругу, що подається на первинну обмотку, треба збільшувати від нуля до значення $U_{\text{кз}}$, при якому струми в обмотках досягнуть номінальних значень. Іншими словами, слід пам'ятати, що струми у обмотках не повинні перевищувати номінального значення. З даного дослідів знайти потужність втрат в міді $P_{\text{м}}$, напругу короткого замикання $U_{\text{кз}}$.
4. Скласти схему для дослідів трансформатора у навантаженому режимі. Дані щодо $Z_{\text{н}}$ одержати у керівника практикуму. Провести вимірювання величин для заповнення таблиці.

5. За одержаними результатами побудувати векторну діаграму трансформатора.
6. Побудувати схему заміщення трансформатора.
- 7- За даними досліду за пунктом 4 визначити величини внесених у первинну обмотку опорів.
8. Сформулювати висновки по роботі.

Лабораторна робота № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО КОЛА ПРИ СПОЛУЧЕННІ ФАЗ ГЕНЕРАТОРА І НАВАНТАЖЕННЯ ЗІРКОЮ

Мета роботи: експериментальне дослідження режимів трифазного кола з симетричним генератором і симетричним та несиметричним приймачем при сполученні зіркою і наявності та відсутності нульового проводу.

1.Стислі теоретичні відомості

1.1. Трифазна симетрична система е.р.с.

Під трифазною симетричною системою е.р.с. розуміють сукупність трьох синусоїдних е.р.с. однакової частоти та амплітуди, зсунутих за фазою на 120° одна відносно одної. Графік їх миттєвих значень зображено на рис. 1, а, векторна діаграма – на рис. 2.

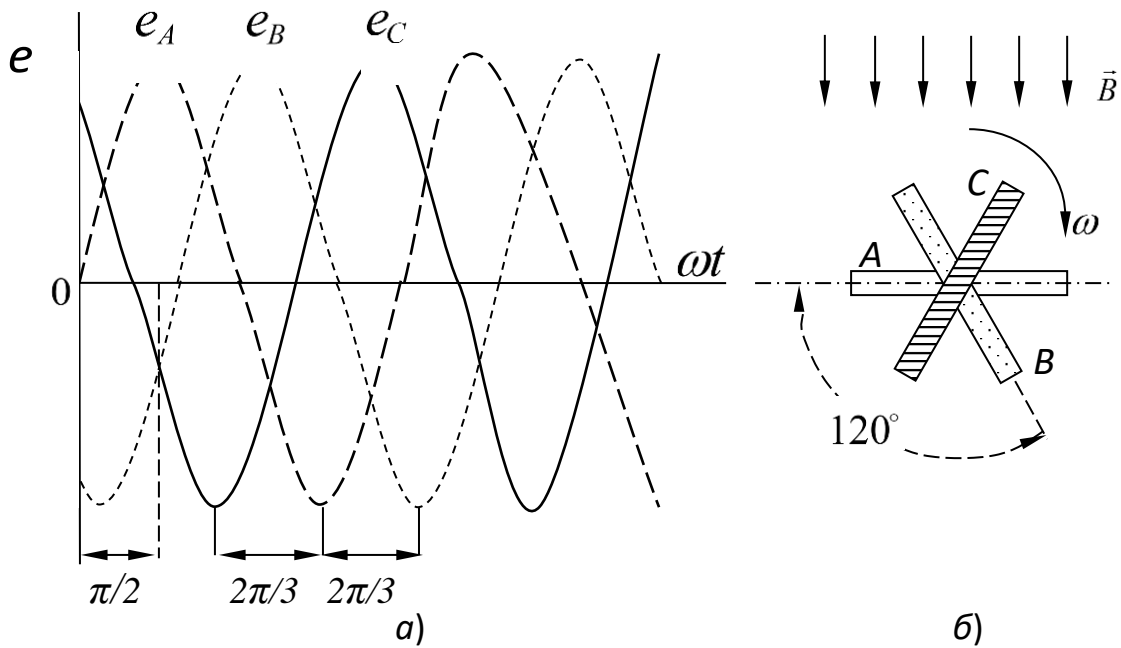


Рис. 1

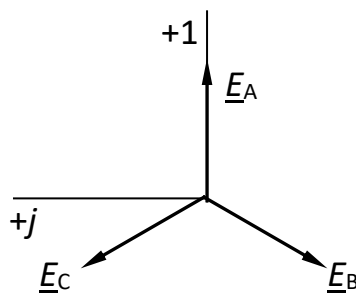


Рис. 2

Пояснити принцип одержання трифазної системи е.р.с. можна так. Нехай в рівномірному магнітному полі з постійною кутовою швидкістю обертаються три однакові жорстко зчеплені одна з одною котушки (рис. 1, б). Площини котушок зміщені в просторі на 120° . В кожній з котушок наводиться синусоїдна е.р.с. однакової амплітуди, але за фазою вони зсунуті на 120° . Е.р.с. трифазного генератора позначають на комплексній площині так, як зображено на рис. 2. Для е.р.с. у фазі A вибрана початкова фаза $\varphi = 0$, тоді

$$\begin{aligned}
 e_A &= E_m \sin \omega t, \\
 e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ), \\
 e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Миттєвим значенням е.р.с. відповідають комплексні діючі значення

$$\begin{aligned}\underline{E}_A &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ}; \\ \underline{E}_B &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{-j120^\circ} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \left(-0,5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right); \\ \underline{E}_C &= \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j120^\circ} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \left(-0,5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right).\end{aligned}\quad (2)$$

Послідовність чергування фаз

Послідовність проходження е.р.с. через однакові значення (наприклад, через максимальне значення) називають послідовністю чергування фаз.

Розрізняють пряму послідовність фаз, коли позитивний максимум настає спочатку у фазі *A*, а потім у фазі *B*, у фазі *C*, знову у фазі *A* і т.д., і зворотню послідовність фаз, коли порядок чергування максимумів е.р.с. протилежний і настає спочатку у фазі *A*, потім у фазі *C*, у фазі *B*, знову у фазі *A* і т. д.

Часто необхідно знати послідовність фаз у проводах трифазного кола, наприклад, щоб визначити напрям обертання вала асинхронного двигуна при його вмиканні в мережу. Для визначення послідовності фаз можна скористатися фазопоказником, схема якого зображена на рис. 3, *a*. До проводів трифазного кола приєднують дві лампи й конденсатор, які сполучені між собою зіркою, і приймають за фазу *A* ту, в яку ввімкнено конденсатор.

Якщо модулі провідності кожної лампи і конденсатора однакові $R_1 = R_2 = X_C$, то яскраве горіння лампи буде відповідати її приєднанню до фази *B*, а слабе горіння лампи – до фази *C*.

Для визначення послідовності фаз можна замість конденсатора скористатись котушкою з відповідним індуктивним опором $X_L = R$ (рис. 3, *б*). Якщо котушка приєднана до фази *A*, то яскраве горіння лампи буде відповідати її приєднанню до фази *C*, слабе горіння лампи – до фази *B*.

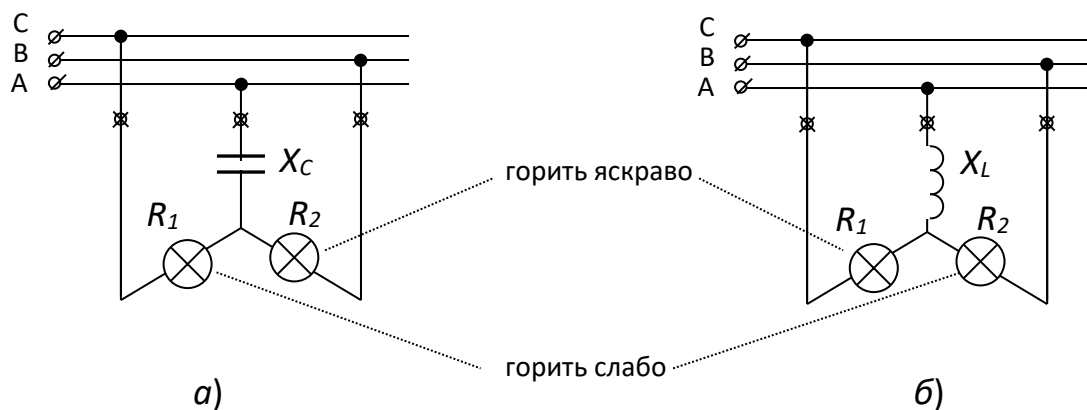


Рис. 3. Схема фазопоказчика
 а) з конденсатором; б) з індуктивною котушкою

1.3. Трифазне коло. Схеми сполучення фаз генератора і приймача

Сукупність джерела трифазної е.р.с., трифазного навантаження та з'єднувальних проводів називають трифазним колом. Під фазою трифазного кола розуміють ділянку кола, по якій протікає один і той же струм. Під фазою також розуміють аргумент величини, що синусоїдно змінюється. Наприклад, струми, що протікають по різних ділянках (фазах) трифазних кіл, зсунуті один відносно одного за фазою.

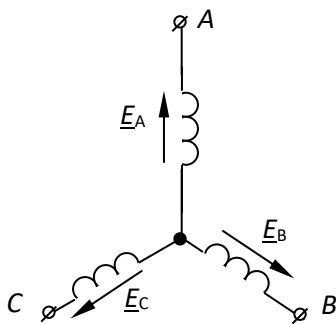


Рис. 4

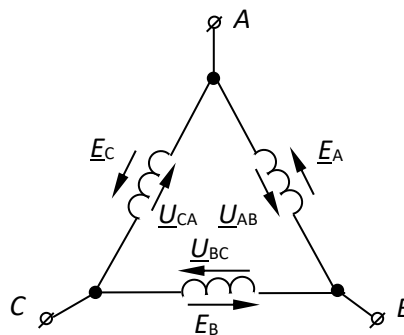


Рис. 5

Обмотки трифазного генератора з'єднують зіркою (рис. 4.) або трикутником (рис. 5). При з'єднанні зіркою однойменні затискачі ("початки" або "кінці") обмоток генератора об'єднують в одну точку, що називається нульовою або нейтральною точкою генератора та позначається 0 або N. Аналогічно поступають з однойменними затискачами навантаження і позначають їх 0' або n. Нульовим (нейтральним) проводом

називають провід, що з'єднує нейтральні точки генератора та навантаження. Струм нейтрального провода позначається I_0 або I_N (рис. 6). Проводи, що з'єднують точки A, B, C генератора з навантаженням, називають лінійними. Струми, що протікають по цих проводах, теж називають лінійними. За додатній напрям струмів у лінійних проводах беруть напрям від генератора до навантаження, а в нульовому – від навантаження до генератора (рис. 6).

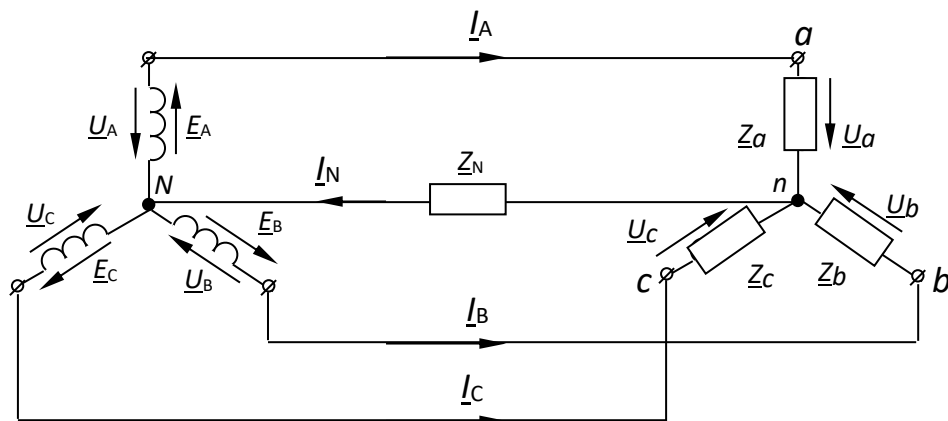


Рис. 6

Напругу між лінійними проводами називають лінійною та позначають відповідно U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , причому порядок індексів вказує додатній напрямок напруги в зовнішньому колі.

Напругу між лінійними і нейтральним проводами називають фазною напругою і позначають U_A, U_B, U_C . Фазні напруги відрізняються від фазних е.р.с. на величину спаду напруги в обмотці генератора.

1.4. Співвідношення між фазними і лінійними струмами і напругами

Якщо напруги виразити комплексними величинами, то комплексна лінійна напруга визначається як різниця відповідних комплексних фазних напруг:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B; \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Той факт, що вектори лінійних напруг дорівнюють різниці векторів фазних напруг, наочно демонструє векторна діаграма (рис. 7, а).

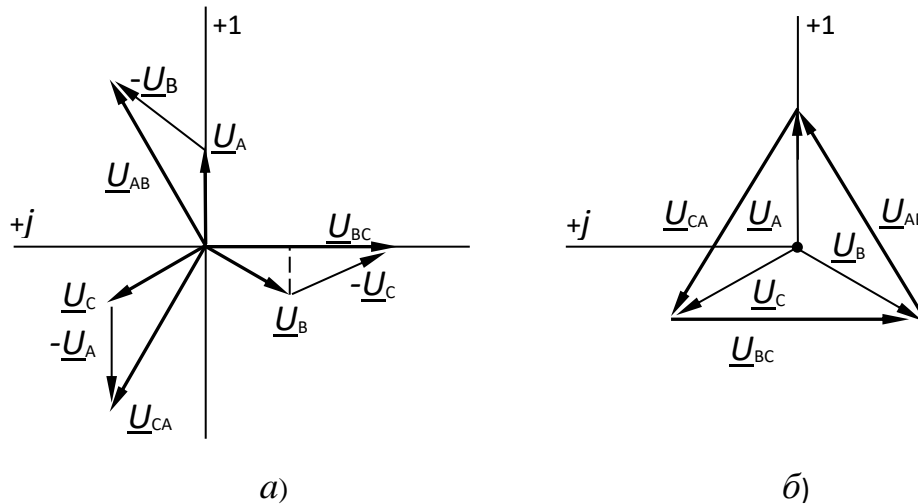


Рис. 7. Векторна діаграма фазних і лінійних напруг при з'єднанні обмоток генератора зіркою

Вектори лінійних напруг U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} завжди утворюють замкнутий трикутник, тому що їх сума дорівнює нулю. Це стає очевидним, якщо вектори лінійних напруг перемістити паралельно самим собі, як показано на векторній діаграмі рис. 7, б.

Розглядаючи діаграми (рис. 7), бачимо, що вектори двох сусідніх фазних напруг разом із вектором відповідної лінійної напруги утворюють замкнутий трикутник. При симетричній системі напруг цей трикутник рівнобедрений, його кути становлять 30° , 30° , 120° . Отже,

а) між діючими значеннями фазних U_ϕ і лінійних U_L напруг існує співвідношення

$$0,5U_L = U_\phi \cos 30^\circ, \text{ або } U_L = 2U_\phi \cos 30^\circ = \sqrt{3}U_\phi, \quad (4)$$

тобто лінійна напруга в $\sqrt{3} \approx 1,73$ раз більша фазної;

б) векторна діаграма симетричних лінійних напруг зсунута на 30° відносно діаграми фазних напруг (рис. 7, а).

Лінійний струм I_L при з'єднанні фаз генератора зіркою дорівнює фазному струму генератора (таке ж співвідношення справедливе для навантаження при сполученні його фаз зіркою): $I_L = I_\Phi$.

При з'єднанні фаз генератора в трикутник (рис. 5) лінійна напруга дорівнює фазній напрузі генератора $U_L = U_\Phi$. Додатні напрямки для струмів у сторонах трикутника–навантаження вибирають за годинниковою стрілкою. Індeksi струмів відповідають вибраним для них додатнім напрямкам: перший індекс відповідає точці, з якої струм витікає, другий – точці, до якої струм притікає. При з'єднанні фаз навантаження трикутником лінійні струми не дорівнюють фазним струмам навантаження і визначаються через фазні за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \quad (5)$$

Розрахунок симетричного кола зірка-зірка

Трифазні кола є різновидом кіл синусоїдного струму, тому розрахунок і дослідження процесів у них проводиться тими ж методами і прийомами, якими користуються при розрахунку кіл синусоїдного струму.

Трифазний приймач називають **симетричним**, якщо комплексні опори всіх фаз однакові. В іншому разі його називають **несиметричним**.

Дослідження симетричного трифазного кола, що складається з симетричного генератора і симетричного приймача, зводиться до розрахунку однієї фази.

Нехай у коло ввімкнутий споживач, фази якого мають однакові опори \underline{Z} і з'єднані зіркою. У симетричному колі фазна напруга

$$U_\Phi = U_L / \sqrt{3}; \quad (6)$$

фазний і лінійний струми

$$I_\Phi = I_L = \frac{U_\Phi}{Z_\Phi}; \quad (7)$$

активна потужність фази

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad (8)$$

реактивна потужність фази

$$Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad (9)$$

активна потужність кола з врахуванням того, що $U_{\phi} I_{\phi} = \frac{U_{Л} I_{Л}}{\sqrt{3}}$,

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi_{\phi}. \quad (10)$$

Розрахунок кола зірка-зірка в загальному випадку. Напряга зміщення нейтралі і шляхи її зменшення

Трифазне коло при з'єднанні зірка-зірка можна розглядати як складне коло з двома вузлами: N – нульова точка генератора; n – нульова точка приймача. Для визначення напруг і струмів в трифазній системі при різних опорах фаз приймача розглянемо трифазне коло, зображене на рис 6, де \underline{Z}_N – опір нейтрального (нульового) провода, а опори лінійних проводів і обмоток генератора, якщо ними не можна знехтувати, повинні бути враховані в опорах фаз приймача $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$.

Скориставшись методом двох вузлів, визначимо напругу між нейтраллю приймача n і нейтраллю генератора N , яку називають **напрягою зміщення нейтралі**:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N}, \quad (11)$$

де $\underline{Y}_a, \underline{Y}_b, \underline{Y}_c, \underline{Y}_N$ – провідності фаз і нейтралі.

Напруги на окремих фазах приймача (при знехтуванні опорами обмоток генератора і лінійних проводів) знайдемо як різницю векторів:

$$\underline{U}_a = \underline{E}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{E}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{E}_C - \underline{U}_{nN}. \quad (12)$$

На рис. 8 побудована векторна діаграма, на якій показані е.р.с. і напруги $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c, \underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$ і \underline{U}_{nN} .

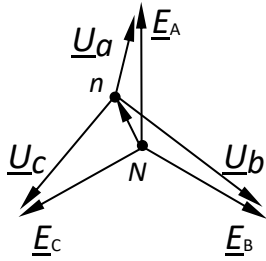


Рис. 8

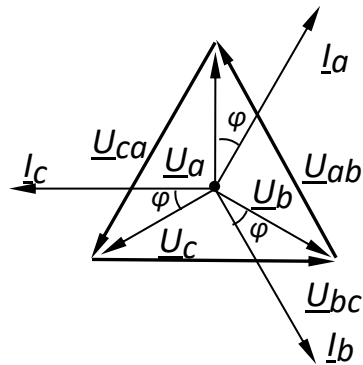


Рис. 9

Струми в окремих фазах приймача (фазні струми) і відповідні їм струми лінійних проводів (лінійні струми) визначаються так:

$$\begin{aligned} I_a &= I_A = U_a Y_a; \\ I_b &= I_B = U_b Y_b; \\ I_c &= I_C = U_c Y_c. \end{aligned} \quad (13)$$

а струм в нейтральному проводі

$$I_N = U_{nN} Y_N. \quad (14)$$

При цьому у відповідності з першим законом Кірхгофа (рис. 6)

$$I_N = I_A + I_B + I_C = I_a + I_b + I_c. \quad (15)$$

Якщо навантаження симетричне ($Z_a = Z_b = Z_c$), то струм I_N дорівнює нулю і нульовий провід можна вилучити зі схеми без зміни режиму її роботи. На рис. 9 наведено суміщені топографічну діаграму напруг та векторну діаграму струмів при симетричному навантаженні (схема рис. 6) та індуктивному характері навантаження.

Електрорушійні сили трифазного генератора E_A , E_B , E_C , як правило, утворюють симетричну систему, але при $U_{nN} \neq 0$ напруги U_a , U_b , U_c виявляються несиметричними, що добре видно з векторної діаграми рис. 8.

Напруги на затискачах приймачів, які включені в різні фази, тим сильніше відрізняються одна від одної, чим більше зміщення нейтралі \underline{U}_{nN} , тому на практиці намагаються зменшити \underline{U}_{nN} до нуля. Отримати $\underline{U}_{nN} = 0$ можна двома способами.

По-перше, напруги на затискачах приймача будуть симетричними, якщо вирівняти навантаження окремих фаз.

Дійсно, якщо навантаження симетричне $\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}_\phi$, то

$$\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c = \underline{Y}_\phi (\underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C) = 0.$$

При рівномірному навантаженні

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_a + \underline{E}_B \underline{Y}_b + \underline{E}_C \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c + \underline{Y}_N} = 0 \quad (16)$$

і струм в нейтральному проводі

$$\underline{I}_N = \underline{U}_{nN} \underline{Y}_N = 0.$$

У цьому випадку четвертий (нейтральний) провід стає зайвим і приймачі енергії можна приєднувати до генератора трьома проводами, утворюючи трифазне трипровідне коло.

По-друге, напруги на затискачах приймача будуть симетричними при $\underline{Y}_N = \infty$, тобто якщо нейтральний провід має дуже малий опір ($Z_N \approx 0$). У цьому випадку зміщення нейтралі відсутнє незалежно від навантаження окремих фаз:

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \infty} = 0. \quad (17)$$

Аналізувати результати розрахунків, а також графічно виконувати деякі розрахунки доцільно за допомогою топографічних діаграм. В [3] приведені приклади розрахунків і побудови суміщених векторних діаграм струмів та топографічних діаграм напруг для більшості випадків робочих і аварійних режимів трифазних кіл, що зустрічаються на практиці.

Вибір схеми сполучень трифазної системи в залежності від характеру навантаження.

Приймачі електроенергії можна розділити на дві групи. До першої відносять трифазні електродвигуни, які мають симетричні обмотки і забезпечують рівномірне навантаження фаз. Трифазні електродвигуни включають в трифазне коло зіркою без нейтрального провода або трикутником.

До другої групи приймачів відносять електричні лампи, нагрівальні прилади та інші приймачі, які не можуть забезпечити строго рівномірного навантаження фаз. Ці приймачі вмикають зіркою з нейтральним проводом.

У трифазних колах, що живлять однофазні приймачі, при зміні числа включених приймачів напруга на їх затискачах по можливості не повинна змінюватися. Якщо прийняти, що напруги на затискачах джерела живлення підтримуються незмінними, та знехтувати спадом напруги у проводах, то напруги на приймачах не відрізняються від напруг на затискачах джерела живлення та незмінні незалежно від числа та потужності включених у кожній групі приймачів. Якщо обірвати нейтральний провід, то між нейтральними точками приймача та джерела живлення з'явиться напруга. Фазні напруги на приймачах будуть залежати від співвідношення їх опорів в усіх фазах та будуть змінюватися при зміні числа приймачів у будь-якій групі. Тому з'єднання груп однофазних приймачів зіркою без нейтрального проводу не використовується і в нейтральних проводах ніколи не встановлюють запобіжників.

При наявності нейтрального проводу у випадку перегорання запобіжника в одному з проводів магістральної лінії перестають працювати приймачі, під'єднані лише до цього проводу.

Струм в нейтральному проводі в більшості випадків значно менший лінійних струмів. Тому в трифазних установках нейтральний провід має площу перерізу в 2..3 рази меншу в порівнянні з лінійними проводами.

Обрив нейтрального проводу при різних опорах фаз приймача приведе (із-за зміщення нейтралі) до зміни фазних струмів і напруг приймача. Зміна ж фазних напруг абсолютно неприпустима.

Переваги трифазних систем

Широке поширення трифазних систем пояснюється в основному трьома причинами:

- передача енергії на значні відстані трифазним струмом економічно більш вигідна, ніж змінним струмом з іншою кількістю фаз;
- найпоширеніші елементи систем – трифазний асинхронний двигун та трифазний трансформатор – досить прості у виробництві, економічні і надійні в роботі;
- система володіє властивістю незмінності величини миттєвої потужності за період синусоїдного струму, якщо навантаження в усіх трьох фазах трифазного генератора однакове.
- трифазне коло із нейтральним проводом має також ту перевагу, що може живити приймачі, розраховані для роботи при двох різних номінальних напругах, що відрізняють у $\sqrt{3}$ раз. Приймачі у такому колі можна включати між лінійними проводами на лінійну напругу та між лінійними проводами і нейтральним проводом на фазну напругу.

Зокрема, низьковольтні (до 1000 В) трифазні кола із нейтральними проводами, що найчастіше зустрічаються на практиці, мають номінальні напруги

$$U_L=220 \text{ В}, \quad U_\phi=127 \text{ В};$$

$$U_L=380 \text{ В}, \quad U_\phi=220 \text{ В}.$$

2. Контрольні питання

1. Дайте визначення трифазної симетричної системи е.р.с. Яким чином можна її одержати?
2. Зобразіть векторну діаграму та графіки миттєвих значень е.р.с. трифазної симетричної системи. Як записують миттєві значення та комплексні діючі значення е.р.с., що їм відповідають?
3. Що називають трифазним колом, фазою трифазного кола?

4. Які типи з'єднання обмоток генератора (навантаження) у трифазних колах використовують найчастіше?
5. Що називають нейтральною (нульовою) точкою генератора і навантаження, нейтральним (нульовим) проводом?
6. Які напруги (струми) називаються фазними (лінійними)? Які співвідношення мають місце в трифазному колі при різних схемах сполучення генератора і приймача?
7. Який трифазний приймач називається симетричним? Запишіть формули, за якими визначаються фазні струми та струм нейтрального проводу в трифазному колі при симетричному і несиметричному навантаженні.
8. Як визначаються значення фазних напруг (струмів) в трифазній системі зірка-зірка, якщо задані значення лінійних напруг (струмів) і опори фаз навантаження?
9. Запишіть вирази для напруги між нейтральними точками при наявності та відсутності нульового проводу в трифазному колі.
10. Як залежать фазні напруги приймачів від напруги зміщення нейтралі? Зобразіть топографічну діаграму напруг трифазного кола для випадку, коли $\underline{U}_{nN} \neq 0$. Як можна забезпечити виконання умови $\underline{U}_{nN} = 0$?
11. Для чого служить нейтральний провід? Яка перевага трифазного кола з нейтральним проводом порівняно з колом без нього?
12. Який переріз має нейтральний провід в порівнянні з лінійним і чому? Чому в нейтральних проводах ніколи не встановлюють запобіжників? Коли стає зайвим нейтральний провід в трифазній системі?

3. Завдання для самостійної підготовки

- 3.1. Дати відповіді на контрольні питання.
- 3.2. В колі (рис. 6) значення параметрів $U_\phi=220$ В, $\underline{Z}_a=100$ Ом, $\underline{Z}_b=j100$ Ом, $\underline{Z}_c = -j100$ Ом, $\underline{Z}_N = \infty$. Знайти напругу зміщення нейтралі U_{nN} та

струми в фазах приймача. Побудувати векторну діаграму струмів і суміщену з нею топографічну діаграму напруг.

3.3. Зобразити схему ввімкнення електронного фазометра для вимірювання кута зсуву фаз між напругами \underline{U}_A та \underline{U}_{AB} .

4. Опис випробувальної панелі лабораторної установки

На універсальному стенді встановлені всі необхідні для виконання лабораторної роботи блоки, а саме: “Блок живлення трифазний”, “Блок фазометра”, “Блок амперметрів”, “Блок мультиметра”.

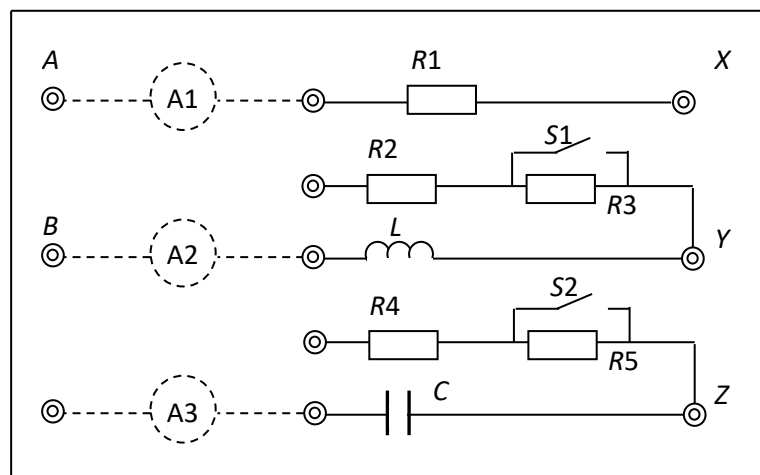


Рис. 10

Вигляд дослідної панелі показано на рис. 10. На лицевій стороні панелі зображена схема сполучення елементів фаз трифазного приймача і встановлені затискачі, необхідні для складання досліджуваних схем, а також перемикачі $S1$ і $S2$.

За допомогою дослідної панелі можна зібрати схему:

1) активного симетричного приймача (при $R1=R2=R3=R4$ і замкнутих перемикачах $S1$ та $S2$ розімкнуті); 2) активного несиметричного (перемикачі $S1$ та $S2$ розімкнуті); 3) несиметричного приймача з різнохарактерними опорами фаз (в фазі A – резистор $R1$, в фазі B – котушка індуктивності L , в фазі C – конденсатор C).

5. Завдання по проведенню дослідів і обробці їх результатів

5.1. Перевірити симетричність трифазної системи е.р.с. Для цього вольтметром виміряти значення е.р.с. в кожній з фаз джерела, а електронним фазометром – початкові кути фазних та лінійних е.р.с. відносно \underline{E}_A . Дані досліду 1 занести в таблицю 1. За одержаними значеннями побудувати топографічну діаграму фазних і лінійних напруг генератора.

Табл.1

Фазні величини	$U_{A,B}$	$U_{B,B}$	$U_{C,B}$	φ_A	φ_B	φ_C
				0°		
Лінійні величини	$U_{AB,B}$	$U_{BC,B}$	$U_{CA,B}$	φ_{AB}	φ_{BC}	φ_{CA}

5.2. Виміряти фазні струми і напруги при сполученні фаз генератора і приймача за схемою зірка-зірка без нульового проводу у випадку активного симетричного навантаження ($\underline{Z}_a=\underline{Z}_b=\underline{Z}_c=R=200$ Ом). Виміряти напругу U_{nN} між нульовими (нейтральними) точками n та N . Дані занести в таблицю 2.

5.3. Сполучити провідником точки n та N . При цьому спостерігати за зміною струмів і напруг у фазах приймача. Виміряти значення величини за п.2, а також струм I_N в нейтральному проводі. Дані занести в таблицю 2.

Табл.2

№ досліду	Дослід 2	Дослід 3	Дослід 4	Дослід 5	Дослід 6	Дослід 7	Дослід 8	Дослід 9
Вимірювана величина								
\underline{Z}_a								
\underline{Z}_b								
\underline{Z}_c								
U_a								
U_b								
U_c								
φ_a								
φ_b								
φ_c								
I_a								
I_b								
I_c								
I_N								
U_{nN}								

5.4. Змінивши значення R_b та R_c (шляхом переведення в нижнє положення тумблерів $S1$ та $S2$), виміряти струми та напруги в фазах приймача, струм в нейтральному проводі, а також кути зсуву фаз напруг \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c відносно \underline{U}_A .

5.5. Розімкнути нейтральний провід, виміряти струми і напруги в фазах приймача, а також кути зсуву фаз напруг \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c відносно \underline{U}_A .

5.6. Змінивши характер навантажень в фазах \underline{Z}_a та \underline{Z}_c ($Z_b = j\omega L$, $Z_c = -\frac{j}{\omega C}$), провести вимірювання струмів у всіх фазах приймача, лінійних і фазних напруг та фазових кутів напруг \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c відносно \underline{U}_A при відсутності нульового проводу.

5.7. Ті ж дані, а також значення I_a виміряти при наявності нульового проводу.

5.8. При наявності нульового проводу і розімкнутому лінійному проводі однієї із фаз (імітація обриву лінійного проводу) провести вимірювання напруг і струмів у фазах приймача, а також струм в нейтральному проводі.

5.9. Ті ж дані виміряти в схемі при відсутності нульового проводу.

5.10. За результатами вимірювання побудувати суміщені векторні діаграми струмів та топографічні діаграми напруг (п.п. 2...9) і сформулювати висновки по роботі.

Література

1. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник / В.С. Маляр. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 312 с.
2. Матвієнко М. П. МЗЗ Основи електротехніки. Підручник. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 228 с
3. Теоретичні основи електротехніки: підруч. у 3-х т. / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Водолюб і ін.; за заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка. – К: Політехніка. – 2004. – Т.1. – 272 с.
4. Збірник задач з теоретичних основ електротехніки. Частина 1: навч. посіб. / Воробкевич А.Ю., Маляр В.С., Совин Р.Я. і ін. за ред А.Ю. Воробкевича, О.І. Шегедина. – К.: Магнолія Плюс, 2011. – 224 с
5. Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник. – Київ: КП, 2020. – 266 с
6. Шегедин О.І., Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки: навч. посіб. / О.І. Шегедин, В.С. Маляр, – Львів: Магнолія Плюс, 2007. – Ч. 1. – 172 с.

ЗМІСТ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	34
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4	44
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	55
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	64
ЛІТЕРАТУРА	82