Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Лінійні електричні кола постійного струму
Лінійні електричні кола синусоїдного струму

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації»
спеціальності G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 621.3.01.049.76
С20

Укладачі: *Спінул Людмила Юріївна*, канд. техн. наук, доц.
Чибеліс Валерій Іванович, канд. техн. наук, доц.
Беленок Надія Володимирівна, ст. викладач
Скринник Олексій Миколайович, зав. лаборатор.

Рецензент *Щерба М.А.*, д.т.н., професор, зав. кафедри ТЕ, ФЕА , КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Островерхов М.Я.*, д-р техн. наук, проф.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 08.05.2026 р.)
за поданням вченої ради факультетуелектроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 27.04.2026 р.)

С20 **Електротехніка**. Лінійні електричні кола постійного струму. Лінійні електричні кола синусоїдного струму. [Електронний ресурс] : лаб. практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації» спец. G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Л. Ю. Спінул та ін. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 111 с.

Представлено лабораторний практикум з дисципліни "Електротехніка", у яких проводитися аналіз моделей реального джерела постійного струму; законів Ома та Кірхгофа; потенціальних діаграм електричного кола; еквівалентних перетворень пасивних ділянок електричних кіл; активного двополюсника; послідовного, паралельного та мішаного сполучення елементів електричного кола синусоїдного струму; трифазного електричного кола при з'єднанні джерела і споживача зіркою з нейтральним проводом та без нейтрального проводу.

Призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Також буде корисним для для здобувачів ступеня бакалавра неелектричних освітніх програм.

УДК 621.3.01.049.76

Реєстр. № НП 25/26-360. Обсяг 5,3 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
https://kpi.ua
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 4

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ 6

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛУ
ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ 7

ЛАБОРАТОРНІ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ 9

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1
Моделювання реального джерела постійної напруги 12

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2
Експериментальна перевірка законів Кірхгофа і Ома.
Дослідження розподілу потенціалів в електричному колі 21

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3
Дослідження еквівалентних перетворень сполучень опорів
за схемами «зірка» та «трикутник» 35

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4
Дослідження активного двополюсника постійного струму 46

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5
Дослідження послідовного,паралельного сполучення споживачів
електричного кола синусоїдного струму 60

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6
Дослідження змішаного сполучення споживачів
електричного кола синусоїдного струму 87

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7
Дослідження трифазного електричного кола
при з'єднанні джерела і приймача зіркою 99

ВСТУП

З метою підвищення учбової активності і особистої відповідальності студентів за результати навчання в учбовий процес впроваджуються нові технології, які передбачають адаптацію кожної форми аудиторних занять до відповідної спеціальності майбутніх фахівців.

Так, для студентів, що навчаються за освітньою програмою «Технічні та програмні засоби автоматизації» спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» акцент перенесено з практичних занять на лабораторний практикум, в якому гармонічно поєднані теоретична і прикладна сторони загальної електротехніки. Даний лабораторний практикум повніше враховує вимоги нової програми. Відповідно до програми викладений цикл лабораторних робіт складається з двох розділів: «Лінійні електричні кола постійного струму» і «Лінійні електричні кола синусоїдного струму».

Виконуючи лабораторні роботи студенти набувають вміння:

- використовувати сучасні вимірювальні та контрольні прилади;
- моделювати усталені режими роботи лінійних і нелінійних електричних та магнітних кіл постійного і змінного струму;
- на підставі дослідних даних та їхньої математичної і графічної обробки проводити порівняльний аналіз електромагнітних процесів у зазначених колах;

Лабораторний практикум структуровано наступним чином: 1) мета роботи; 2) теоретичні положення і розрахункові співвідношення, які висвітлюють зміст роботи; 3) порядок виконання роботи; 4) математична і графічна обробка дослідних даних; 5) результати роботи, подані у вигляді висновку; 6) контрольні питання для перевірки степені опрацювання і засвоєння досліджуваного матеріалу.

Лабораторний практикум орієнтований на підвищення зацікавленості студентів у вивченні курсу електротехніки, на розвиток їхньої

спостережливості та допитливості. Найбільш ефективним для проведення лабораторних робіт є дослідницький метод, коли після короткого усного або письмового інструктажу студенти самостійно ведуть спостереження і виміри, імітуючи науковий пошук. Лабораторна робота проводиться під керівництвом викладача, який контролює підготовку кожного студента (наявність протоколу, знання мети роботи, тощо), слідкує за правильністю виконання експерименту, перевіряє та підписує отримані результати. Для зарахування з певними балами лабораторної роботи студент повинен оформити протокол-звіт і відповісти по суті виконаної роботи.

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

1. При виконанні робіт на електротехнічних пристроях слід неухильно дотримуватись правил техніки безпеки, оскільки електрична напруга від 36 (В) є небезпечною для життя людини.

2. Заборонено виконувати дослідження на робочому місці поодинці.

3. Електричне коло дозволяється складати лише за умови відсутності напруги на вихідних затискачах джерел живлення, що забезпечується відповідним положенням вимикачів активних блоків НДЛС та загальним вимикачем розподільчого щита лабораторії. Це правило стосується і випадків, коли під час дослідів виникає потреба будь-яких змін в електричному колі, що досліджується (замінити вимірювальний прилад, приєднати додаткове джерело живлення, змінити характер навантаження).

4. Без дозволу викладача студентам забороняється вмикати джерела живлення і подавати напругу на складене ними електричне коло. Увімкнення та вимкнення електричного кола слід здійснювати однією рукою. Інша рука при цьому не повинна торкатися елементів електричного кола. Бажано, щоб обличчя особи, яка виконує комутаційні операції, знаходилось якомога далі від комутаційної апаратури.

5. Забороняється торкатися до струмопровідних частин електричного кола, доки коло знаходиться під напругою.

6. Забороняється виконувати будь-які операції з обладнанням розподільного щита лабораторії. У разі виявлення іскріння контактів, запаху горілої ізоляції або нагрітого металу слід негайно вимкнути блок НДЛС з джерелами, які живлять електричне коло, та знеструмити вимірювальні прилади. Негайно звернутися за допомогою до викладача, який має право вимкнути рубильник на розподільному щиті.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ПРОТОКОЛУ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Важливою складовою практичної підготовки майбутніх фахівців є набуття ними вміння якісно оформлювати проведенні дослідницькі роботи шляхом складання відповідного протоколу (зразок включено у зміст кожної роботи). При оформленні протоколу потрібно дотримуватись правил, викладених нижче.

1. Усі зображені в протоколі електричні схеми мають бути накресленні за допомогою лінійки і циркуля.

2. Щоб запобігти помилці, результати кожного досліду має перевірити керівник. При одержанні неправильних даних дослід необхідно повторити. Тільки після перевірки керівником відповідності результатів досліду можна отримані дані заносити у таблицю.

3. У процесі математичної обробки дослідних даних слід записувати усі формули що використовуються при розрахунках, а в разі складних розрахунків дати проміжні величини, потрібні для визначення кінцевого результату.

4. При графічній обробці даних на осях координат слід обов'язково вказувати масштаб, позначення величини і одиниць, в яких вони відображені.

Усі точки, знайдені дослідним шляхом, треба з'єднувати плавною лінією (краще за допомогою лекал). Не дозволяється перетинання кривої через одну точку.

Якщо графіки показують результати однорідних спостережень за однакових умов, то їх доцільно будувати в одній координатній системі, причому графіки мають відрізнятися особливими позначками нанесених точок (хрестиками, кружками, точками).

У випадку, коли дві-три різнорідні функції мають однаковий аргумент, наприклад $U(\omega)$, $I(\omega)$, $\cos\varphi(\omega)$, то їх можна зобразити в одній координатній площині. По осі абсцис слід відкласти у вибраному масштабі аргумент (у даному прикладі ω), і ця вісь буде спільною для графіків. Для

кожної з величин (U, I, $\cos\varphi$) має бути окрема вісь ординат з відповідним масштабом. Можна використати одну вісь ординат за різних величин, але тоді їх необхідно відкладати у відносних одиницях і обов'язково вказати які величини прийняті за базисні.

5. Висновки висвітлюють вміння дослідника аналізувати і оцінювати результати досліджень, тому їх потрібно формулювати чітко, коротко і по суті роботи.

ЛАБОРАТОРНІ ЕЛЕКТРОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

В електротехнічній практиці найбільш широкого застосування отримали електромеханічні та електронні електровимірювальні прилади безпосередньої оцінки. Прикладом таких приладів можуть бути амперметри, вольтметри, ватметри і т. ін.

Електромеханічні прилади порівняно із електронними значно простіші, надійніші і дешевші. В залежності від типу вимірювального механізму вони поділяються на магнітоелектричні, електромагнітні і електродинамічні.

Принцип дії магнітоелектричних приладів ґрунтується на взаємодії магнітного поля постійного магніту і рухомої котушки із струмом. Ці прилади мають рівномірну шкалу, відрізняються високою точністю та чутливістю, невеликою потужністю споживання електричної енергії. Магнітоелектричні прилади дозволяють визначити як величину так і напрям постійного струму або напруги. Один із затискачів приладів позначається знаком «–», другий «+».

Електровимірювальні прилади магнітоелектричної системи знаходять використання також при вимірах в колах змінного струму. В цьому випадку в коло вимірювальної котушки вмикають перетворювач змінного струму в постійний або пульсуючий струм. Відхилення стрілки приладу пропорційне середньому значенню струму.

Принцип дії електромагнітних приладів ґрунтується на втягуванні стального осердя в нерухому котушку із струмом. Ці прилади використовуються для виміру постійних та змінних струмів і напруг. Вони відрізняються простою конструкцією, високою здатністю до перевантаження, надійністю в експлуатації, низкою вартістю. До недоліків приладів потрібно віднести меншу точність виміру порівняно із магнітоелектричною системою приладів, більшою потужністю споживання електроенергії, нерівномірністю шкали, залежністю від зовнішніх магнітних полів, а також обмеженим діапазоном частот змінного струму. Для розширення меж виміру змінних

струмів і напруг використовуються вимірювальні трансформатори струму та напруги.

Електромагнітні прилади показують діюче значення вимірюваного струму та напруги.

Принцип дії електродинамічної системи приладів ґрунтується на взаємодії струмів в різних котушках одна із яких нерухома, а друга міняє своє положення відносно першої. Шкали вольтметрів і амперметрів – нерівномірні, а ватметрів – практично рівномірні.

Електродинамічні прилади забезпечують найбільш високу точність виміру при частотах змінного струму до 20 кГц. Недоліками їх є значна потужність споживання електроенергії, низька перенавантажена властивість.

Електровимірювальні прилади виготовляються із однією або кількома межами виміру. Межа виміру амперметра визначається номінальним струмом, межа вольтметра – номінальною напругою, межа ватметра – номінальною напругою і струмом.

Амперметр – це прилад, за допомогою якого вимірюють значення струму I. У електричне коло амперметр завжди вмикається послідовно. Опір амперметра дуже малий, тому він не вносить похибок у значення вимірювальної величини. Для визначення струму у розгалуженому колі користуються комутатором струму, тоді до амперметра приєднують вилку.

Умовно-графічне позначення амперметру: коло Ø 10 мм (A)

Вольтметр – це прилад, за допомогою якого вимірюють напругу U. У електричне коло вольтметр завжди вмикається паралельно. Опір вольтметра дуже великий, тому він не вносить похибок у значення вимірювальної величини. Для визначення напруги на різних елементах кола або на ділянках кола користуються щупами, які приєднують до вольтметру.

Умовно-графічне позначення вольтметру: коло Ø 10 мм (V)

Ватметр – це прилад, за допомогою якого вимірюють активну потужність P. Ватметр містить обмотку струму та обмотку напруги. У електричне коло

ватметр вмикається змішано. Обмотка струму приєднується у коло послідовно, обмотка напруги приєднується у коло паралельно. Початки обмоток на схемі позначають зіркою (*).

Умовно-графічне позначення ватметру: коло Ø 10 мм

Абсолютна похибка – різниця між виміром приладу і дійсним значенням вимірювальної величини.

$$\Delta A = A_В - A_Д$$

де ΔA – абсолютна похибка; $A_В$ – значення виміряне приладом;

$A_Д$ – дійсне значення вимірювальної величини.

Відносна похибка γ, як правило, визначається у відсотках

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_Д} \cdot 100$$

Оскільки дійсне значення вимірювальної величини не відомо, то для визначення найбільших похибок вимірів користуються **класом точності** приладів, що визначає найбільшу допустиму основну приведену похибку $\gamma_{пр}$ виражену у відсотках. Її знаходять, як відношення максимальної абсолютної похибки до кінцевого значення робочої частки шкали приладу.

$$\gamma_{пр} = \frac{(\Delta A)_{max}}{A_{ном}} \cdot 100$$

Окремим типам вимірювальних приладів встановлюють різні класи точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Наприклад, прилад класу точності 1,5 має $\gamma_{пр} = \pm 1{,}5\%$

Відносна похибка вимірювання може бути найдена

$$\gamma = \gamma_{пр} \frac{A_{ном}}{A_д}$$

Звідси виходить, що відносна похибка вимірювання залежить від дійсного значення вимірювальної величини та зростає при її зменшені. З цієї ж причини вимірювальний прилад або його границю вимірювання вибирають так, щоб при вимірюванні стрілка приладу по можливості знаходилась в середній частині шкали.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: Ознайомити студентів з робочим місцем – універсальним навчально-дослідним лабораторним стендом (НДЛС) та умовами його експлуатації. Надати студентам навички складання схем. Навчитися користування вимірювальними приладами, а також будувати вольт-амперні характеристики активних та пасивних ділянок електричного кола та визначати параметри еквівалентної схеми заміщення джерела постійної напруги.

1.1 Основні теоретичні положення

Сукупність пристроїв, що утворюють шляхи для електричного струму, називають **електричним колом**. Основними елементами електричних кіл є джерела електроенергії, пристрої для її передавання та перетворення параметрів напруг і струмів, а також приймачі електроенергії. **Джерелами електроенергії** називають *пристрої, в яких теплова, хімічна, механічна енергія перетворюється на електричну*. Приймачами є пристрої, в яких електрична енергія перетворюється на інші види енергії: механічну, теплову, хімічну тощо.

В лабораторних роботах першого циклу досліджуються електричні кола з лінійними елементами – елементами, які мають прямолінійні вольт-амперні характеристики (ВАХ). **Вольт-амперна характеристика –** *це залежність між струмом, що проходить через елемент, та напругою на його затискачах*. ВАХ лінійного приймача електроенергії, наприклад резистора, являє пряму лінію, яка проходить через початок координат (рис. 1.1, *а*).

Як відомо, рівняння такої прямої $y = k \cdot x$. В координатах напруга – струм ($y = U$, $x = I$) рівняння приймає вигляд

$$U = I \cdot R,$$

де коефіцієнтом пропорційності є опір резистора R. Таке співвідношення називають компонентним рівнянням для резистора або законом Ома для пасивної ділянки кола. На рис. 1.1, *а* надані ВАХ для трьох лінійних резисторів

$R_1 > R_2 > R_3$ (при одній і тій самій напрузі U_1 найменший струм I_1 протікає через найбільший опір R_1).

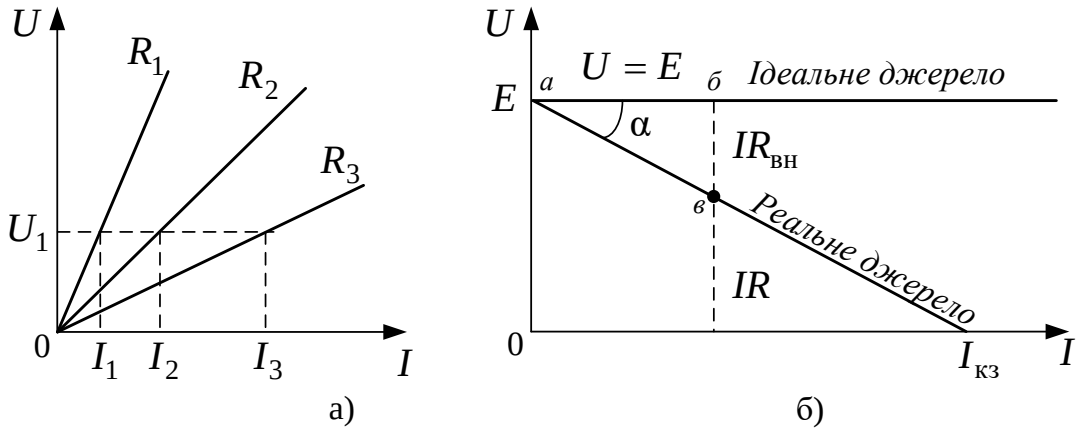


Рис. 1.1. Вольт-амперні характеристики: лінійних резисторів (а), ідеального та реального джерел напруги (б)

Джерело електроенергії характеризується, насамперед, електрорушійною силою (ЕРС) *Е*. **Електрорушійна сила (ЕРС)** – *це фізична скалярна величина, яка чисельно дорівнює роботі сторонніх сил з перенесення одиничного додатного заряду від від'ємного полюса до додатного всередині джерела*.

Під дією стороннього електричного поля на затискачах джерела виникає різниця потенціалів. Електрорушійна сила чисельно дорівнює різниці потенціалів між додатним і від'ємним затискачами джерела енергії в режимі неробочого ходу. ВАХ реального лінійного джерела зображена на рис. 1.1, *б*. Це пряма лінія, яка відсікає відрізки на осях.

Рівняння такої прямої має вигляд: $y = k \cdot x + b$, причому коефіцієнт k приймає від'ємне значення. В координатах струму і напруги ВАХ реального джерела напруги записується як рівняння $U = E - I \cdot R_{вн}$, де коефіцієнт $R_{вн}$ – внутрішній опір джерела.

Із рівняння виходить, що за відсутності струму ($I = 0$) напруга на джерелі збігається зі значенням ЕРС. В режимі короткого замикання ($R_н = 0$) через

реальне джерело протікає найбільший із можливих струмів – струм короткого замикання $I_{кз}$, а напруга на клемах дорівнює нулю ($U = 0$).

У ідеального джерела напруги відсутній внутрішній опір ($R_{вн} = 0$) і напруга на затискачах не залежить від струму (ВАХ показана на рис. 1.1, *б*. Напруга на затискачах реального джерела залежить від струму, який протікає через джерело, отже, реальне джерело має внутрішній опір $R_{вн}$, на якому спостерігається спад напруги $I \cdot R_{вн}$. Розрахункову формулу для обчислення значення внутрішнього опору отримують із співвідношення

$$R_{вн} = (E - U)/I.$$

Значення внутрішнього опору можна визначити також за вольт-амперною характеристикою (рис. 1.1, *б*). Якщо прийняти, що m_u – масштаб за віссю напруг, m_i – масштаб за віссю струмів, то $m_u \cdot бв = IR_{вн}$, $m_i \cdot аб = I$.

Звідки

$$R_{вн} = \frac{m_u \cdot бв}{m_i \cdot аб} = tg\alpha \cdot k, \text{ де } k = \frac{m_u}{m_i}.$$

На рис. 1.2 зображене найпростіше електричне коло, що складається із джерела G_1 (*частина кола всередині пунктирного прямокутника*), навантаженого на резистор $R_н$. Резистор приєднаний до джерела з'єднувальними провідниками, малими опорами яких зазвичай нехтують. Через це потенціали вздовж провідників не змінюються, і напруги на джерелі та резисторі однакові $U_{дж} = U_н = U_{12}$. В контурі протікає один струм $I = I_н$,

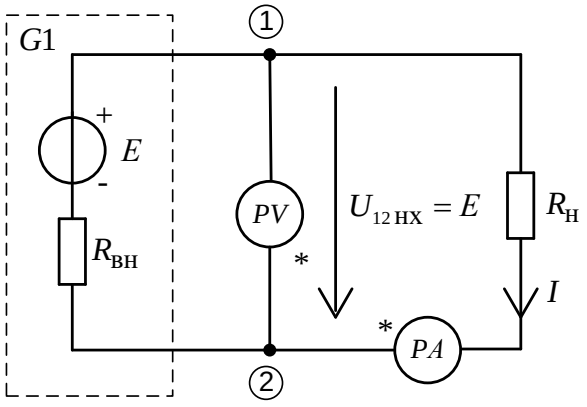


Рис. 1.2

тому: $U_{н} = E - I \cdot R_{вн}$. Підставляючи у цей вираз компонентне рівняння резистора замість напруги на навантаженні $I \cdot R_{н} = E - I \cdot R_{вн}$, можна отримати закон **Ома для нерозгалуженого кола**:

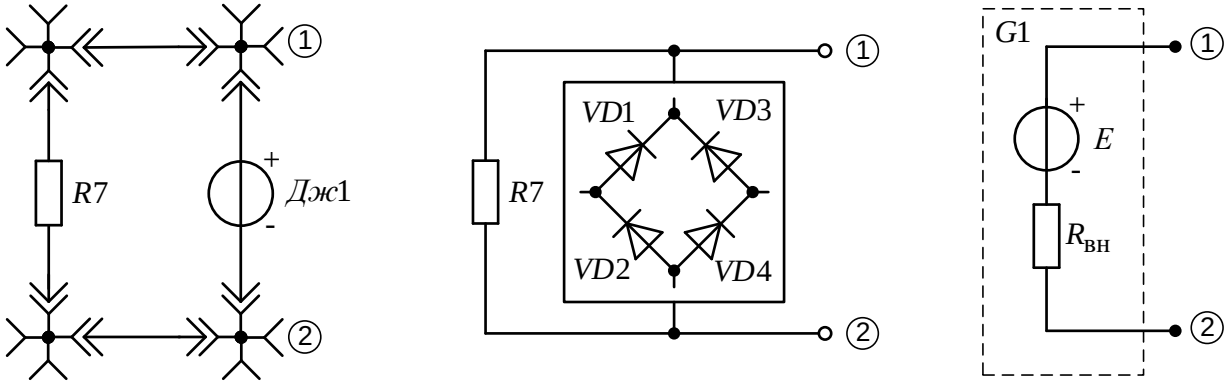
$$I = E/(R_{вн} + R_{н}).$$

1.2 Порядок проведення роботи

Експериментальну схему збирають на складальному полі універсального науково-дослідного лабораторного стенда. Для виконання лабораторної роботи кожна бригада отримує додаткові комплектуючі, а саме: з'єднувальні проводи, набірні резистори, які впаяні у прозорі пластмасові корпуси з двома штирьовими затискачами, та перемички. Живлення схеми здійснюється від одного з двох джерел із блока постійної напруги стенда (за рекомендацією викладача): нерегульованого *Дж*$_1$ або регульованого *Дж*$_2$. В якості навантаження застосовують резистори із магазину опорів, який розміщено у блоці опорів стенда.

Під час експериментальних досліджень потрібно скористатися цифровим мультиметром (*клас точності 3*).

Слід звернути увагу, що джерела із блока постійних напруг стенда вмикаються в схеми разом з паралельно увімкненими балансними опорами (резистор R_7 на рис. 1.1) в складних колах з кількома джерелами енергії.



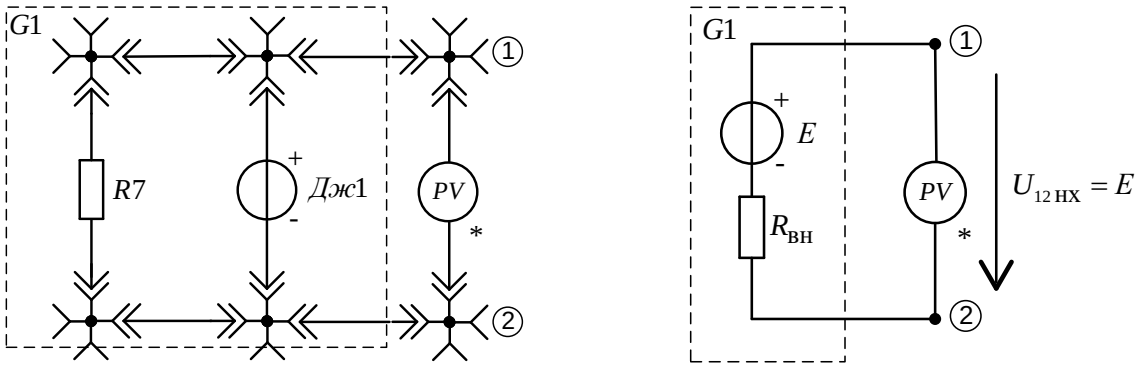
а) б) в)

Рис. 1.3. Схема джерела постійної напруги G_1: монтажна на складальному полі науково-дослідного стенда (а), спрощена структурна (б), заміщення (в)

Увімкнення балансних опорів пояснюється схемотехнічними особливостями побудови джерел блоку постійної напруги. До складу цих джерел входить мостова схема випрямлення на діодах, яка не допускає протікання струму проти напрямку дії електрорушійної сили. З метою лінеаризації навантажувальної характеристики та створення умов для протікання струму проти напрямку дії електрорушійної сили паралельно до випрямляча вмикають баластний резистор.

1. Зібрати на складальному полі стенда схему, яка виконує функції джерела постійної напруги G_1 (рис. 1.3, *а*).

2. Приєднати до точок ① і ② вольтметр (рис. 1.4) і визначити величину електрорушійної сили E джерела живлення G_1. Одержаний результат записати в перший рядок табл. 1.1.



а) б)

Рис. 1.4. Схема реального джерела постійної напруги G_1 в режимі неробочого ходу: монтажна (а), заміщення (б)

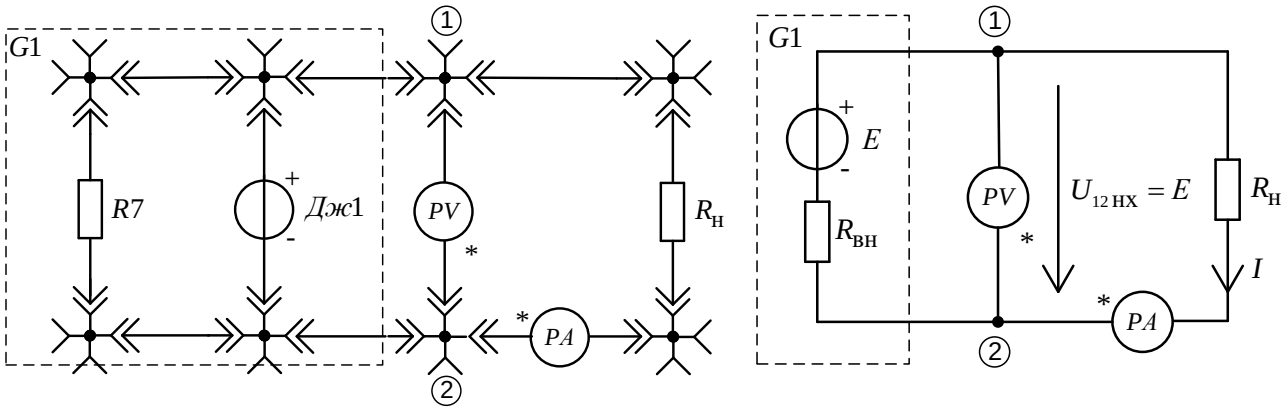
Таблиця 1.1

Перше джерело ЕРС				
$E_1 = U_{12\,НХ}, B$	$U_{G1} = U_Н = U_{12}, B$	$I_Н, A$	$R_{ВН1} = \frac{E_1 - U_Н}{I_Н}, Ом$	$R_Н, Ом$
	–	0	–	$R_Н \to \infty$
	$U_1 =$	$I_1 =$		$R_1 =$
	$U_2 =$	$I_2 =$		$R_2 =$
	$U_3 =$	$I_3 =$		$R_3 =$

Друге джерело ЕРС				
$E_2 = U_{12\,\text{НХ}}, B$	$U_{G2} = U_{\text{Н}} = U_{12}, B$	$I_{\text{Н}}, A$	$R_{\text{ВН2}} = \dfrac{E_2 - U_{\text{Н}}}{I_{\text{Н}}}, Ом$	$R_{\text{Н}}, Ом$
	–	0	–	$R_{\text{Н}} \to \infty$
	$U_1 =$	$I_1 =$		$R_1 =$
	$U_2 =$	$I_2 =$		$R_2 =$
	$U_3 =$	$I_3 =$		$R_3 =$

3. Приєднати до схеми джерела постійної напруги G_1 навантаження $R_{\text{Н}}$ (рис. 1.5). В якості навантаження задіяти магазин опорів. Увімкнути у схему амперметр послідовно з навантаженням.

4. Зняти дані для побудови вольт-амперної характеристики джерела напруги G_1. Для цього при трьох різних значеннях опору навантаження виміряти напругу між затискачами джерела $U_{\text{G}_1} = U_{12} = U_{\text{Н}}$ за допомогою вольтметра і струм через навантаження $I_{\text{Н}}$ за допомогою амперметра. Результати досліджень записати у відповідні рядки табл. 1.1.



а) б)

Рис. 1.5. Схема для дослідження вольт-амперних характеристик джерела напруги та резистора навантаження: монтажна (а), заміщення (б)

5. Повторити досліди пунктів 1…4 робочого завдання для джерела постійної напруги G_2, зібраного із джерела регульованої постійної напруги $Дж_2$ і резистора R_6.

6. Зняти дані для побудови вольт-амперних характеристик двох резисторів навантаження зі значеннями опорів R_1, R_3. Для цього змінити 5-7 разів значення напруги регульованого джерела G_2 у схемі, зображеній на рис. 1.5, і записати відповідні покази амперметра.

1.3 Опрацювання результатів вимірювання

1. За дослідними даними побудувати вольт-амперну характеристику $U_{G_1}(I)$ джерела постійної напруги G_1.

2. Розрахувати значення внутрішнього опору $R_{вн}$ джерела постійної напруги G_1 для трьох робочих режимів і записати результати у відповідні рядки табл. 1.1.

3. Нарисувати схему заміщення реального джерела постійної напруги G_1 (рис. 1.3, в) та позначити параметри елементів схеми. Значення внутрішнього опору розрахувати як середнє арифметичне трьох величин, отриманих за дослідними даними.

4. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

1.4 Запитання і завдання для самоперевірки

1. Чим різняться вольт-амперні характеристики реального джерела енергії та ідеального джерела напруги?

2. Який вигляд має паралельна схема заміщення реального джерела, до складу якої входить ідеальне джерело струму? Які досліди потрібно виконати для визначення параметрів такої схеми заміщення?

3. Нарисуйте паралельну схему заміщення реального джерела G_1, скориставшись параметрами отриманої послідовної схеми заміщення.

1.5 Дані дослідів для дистанційної форми навчання

Джерело постійної напруги G_1 Таблиця 1.2

№	E_1, B	U_1, В	U_2, В	U_3, В	I_1, мА	I_2, мА	I_3, мА	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом
1	20	18.5	18.9	19.4	154	105	65	120	180	300
2	20	18.5	19.2	19.4	185	96	72	100	200	270
3	18	16.2	16.8	17.2	148	99	64	110	170	270
4	25	23.4	23.8	24.2	156	119	81	150	200	300
5	23	20.2	21.3	21.9	184	112	73	110	190	300
6	18	16.2	16.8	17.2	162	105	69	100	160	250
7	22	20,3	20,8	21,3	239	173	106	85	120	200
8	20	18,3	18,9	19,3	174	108	74	105	175	260
9	18	16,9	17,1	17,4	141	114	81	120	150	215
10	20	18,2	18,7	19,0	140	104	78	130	180	242
11	26	23,9	24,5	24,9	171	129	92	140	190	270
12	24	22,1	22,6	23,0	184	129	92	120	175	250
13	21	18,7	19,5	19,8	187	122	94	100	160	210
14	29	18,0	18,6	19,0	180	124	88	100	150	215
15	18	16,2	16,9	17,2	202	121	86	80	140	200
16	22	20,4	20,9	21,3	195	135	82	105	155	260
17	20	18,6	19,1	19,5	186	119	67	100	160	290
18	22	20,8	21,2	21,4	173	118	79	120	180	270
19	20	18,3	19,0	19,4	183	106	65	100	180	300
20	20	18,4	19,0	19,4	153	100	61	120	190	320
21	17	15,6	16,1	16,3	104	73	51	150	220	320
22	24	21,9	22,7	23,2	209	126	84	105	180	275
23	21	19,2	19,9	20,3	192	120	75	100	165	270
24	19	17,8	18,1	18,5	137	101	62	130	180	300
25	22	20,5	20,9	21,3	171	123	76	120	170	280
26	20	18,7	19,1	19,5	170	119	72	110	160	270
27	18	16,7	17,2	17,5	167	101	60	100	170	290
28	21	19,4	19,9	20,4	169	111	68	115	180	300
29	20	18,2	18,9	19,3	182	108	69	100	175	280
30	20	18.5	18.9	19.4	154	105	65	120	180	300

Джерело постійної напруги G_2 Таблиця 1.3

№	E_1, B	U_1, В	U_2, В	U_3, В	I_1, мА	I_2, мА	I_3, мА	R_1, Ом	R_2, Ом	R_3, Ом
1	20	18.5	18.9	19.4	154	105	65	120	180	300
2	20	18.5	19.2	19.4	185	96	72	100	200	270
3	18	16.2	16.8	17.2	148	99	64	110	170	270
4	25	23.4	23.8	24.2	156	119	81	150	200	300
5	23	20.2	21.3	21.9	184	112	73	110	190	300
6	18	16.2	16.8	17.2	162	105	69	100	160	250
7	22	20,3	20,8	21,3	239	173	106	85	120	200
8	20	18,3	18,9	19,3	174	108	74	105	175	260
9	18	16,9	17,1	17,4	141	114	81	120	150	215
10	20	18,2	18,7	19,0	140	104	78	130	180	242
11	26	23,9	24,5	24,9	171	129	92	140	190	270
12	24	22,1	22,6	23,0	184	129	92	120	175	250
13	21	18,7	19,5	19,8	187	122	94	100	160	210
14	29	18,0	18,6	19,0	180	124	88	100	150	215
15	18	16,2	16,9	17,2	202	121	86	80	140	200
16	22	20,4	20,9	21,3	195	135	82	105	155	260
17	20	18,6	19,1	19,5	186	119	67	100	160	290
18	22	20,8	21,2	21,4	173	118	79	120	180	270
19	20	18,3	19,0	19,4	183	106	65	100	180	300
20	20	18,4	19,0	19,4	153	100	61	120	190	320
21	17	15,6	16,1	16,3	104	73	51	150	220	320
22	24	21,9	22,7	23,2	209	126	84	105	180	275
23	21	19,2	19,9	20,3	192	120	75	100	165	270
24	19	17,8	18,1	18,5	137	101	62	130	180	300
25	22	20,5	20,9	21,3	171	123	76	120	170	280
26	20	18,7	19,1	19,5	170	119	72	110	160	270
27	18	16,7	17,2	17,5	167	101	60	100	170	290
28	21	19,4	19,9	20,4	169	111	68	115	180	300
29	20	18,2	18,9	19,3	182	108	69	100	175	280
30	20	18.5	18.9	19.4	154	105	65	120	180	300

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ КІРХГОФА І ОМА. ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТЕНЦІАЛІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ КОЛІ.

Мета роботи: експериментально перевірити справедливість законів Ома та Кірхгофа. Навчитися будувати потенціальні діаграми для контурів електричних кіл постійного струму. Порівняти експериментальні данні з результатами теоретичного аналізу для нерозгалуженого та розгалуженого лінійних кіл.

2.1 Основні теоретичні відомості

Електричне коло – це сукупність пристроїв, що утворюють шлях для проходження електричного струму, електромагнітні процеси в яких можна описати за допомогою понять про електрорушійну силу, струм і напругу. Призначення електричного кола полягає в виробленні, передачі, розподілі і взаємному перетворенні електромагнітної енергії і деяких інших видів енергії. **Елементи електричного кола** – це окремі пристрої, що входять до складу кола та виконують в ньому певні функції. Основні елементи електричних кіл – джерела і споживачі електричної енергії. У **споживачах** електрична енергія перетворюється у теплову, механічну, світлову та інші види енергії. В **джерелах** – теплова, механічна, світлова, хімічна енергія перетворюється в електричну. У процесі перетворення різних видів енергії в електричну у джерелі виникає ЕРС (**електрорушійна сила**), яка спричинює електричний струм у замкненому колі. В ході цього перетворення частина енергії втрачається в самому джерелі. Тому джерела характеризуються двома параметрами – ЕРС E та внутрішнім опором R_0. Споживачі енергії характеризуються тільки опором R.

Для зображення і розрахунку електричні кола замінюють електричними схемами, використовуючи умовні зображення. Найпростіше електричне коло зображено на рис. 2.1. Струм у цьому колі та напругу на його ділянках

визначать за допомогою закону Ома, який можна використати як для усього кола, так і для окремих його ділянок.

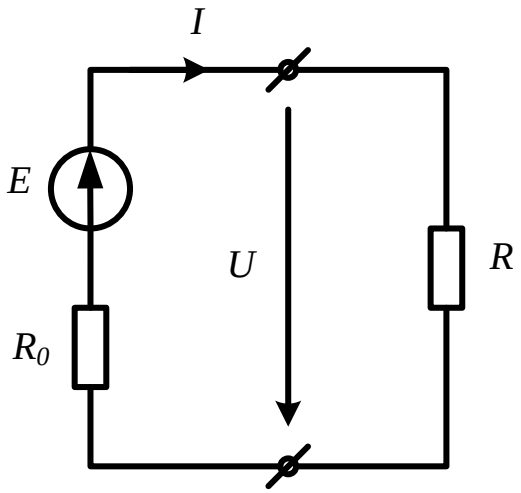


Рис. 2.1

Закон Ома:

для всього кола $I = \frac{E}{R_0 + R}$;

для ділянки без ЕРС $I = \frac{U}{R}$;

для ділянки з ЕРС $I = \frac{E - U}{R_0}$.

Де I – електричний струм;

U – електрична напруга на споживачі;

R_0, R – опори джерела та споживача відповідно.

За законом Ома експериментально можна визначити параметри електричного кола, якщо виміряти струм I та напругу U.

Із рівняння для ділянки без ЕРС визначимо опір споживача:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Рівняння для ділянки з ЕРС дає змогу визначити параметри джерела. Якщо записати $I \cdot R_0 = E - U$ або $E = U + I \cdot R_0$, то в режимі холостого ходу, коли $I = 0$

$$E = U_{x.x},$$

тобто ЕРС джерела дорівнює напрузі на його розімкнених затискачах.

Коли відомі ЕРС джерела та напруга на його затискачах, легко визначити його внутрішній опір:

$$R_0 = \frac{E - U}{I}.$$

Простим називається коло, що складається з одного джерела електричної енергії та будь-якої кількості послідовно або паралельно з'єднаних споживачів енергії, які поступовим перетворенням можна звести до одного еквівалентного

опору. **Складним** називають коло, в якому групи споживачів не можна звести до одного еквівалентного опору. Ділянка кола, вдовж якої струм в будь-який момент часу має одне й те саме значення, називається **гілкою**; точка, в якій з'єднуються три або більше гілки називається **вузлом**. Будь-який замкнений шлях, утворений декількома гілками, являє собою **контур**. Контур, в який входить хоча б одна нова гілка, називається незалежним.

Перший закон Кірхгофа випливає із закону повного струму. Його можна сформулювати двояко.

1. Алгебраїчна сума струмів, що сходяться в будь-якому вузлі електричного кола, дорівнює нулю (струми, які входять до вузла, враховують з одним знаком, які виходять з вузла – з іншим):

$$\sum I = 0.$$

2. Сума струмів, які входять в будь-який вузол електричного кола, дорівнює сумі струмів, які виходять з цього вузла:

$$\sum I_{вх} = \sum I_{вих}.$$

Другий закон Кірхгофа також можна сформулювати двояко.

1. Алгебраїчна сума ЕРС, які діють в будь-якому контурі електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруг на всіх опорах контуру:

$$\sum E = \sum I \cdot R \ .$$

Визначаючи $\sum E$ та $\sum I \cdot R$ зі знаком «+» враховують E та I, напрям яких збігається з обраним напрямом обходу контуру.

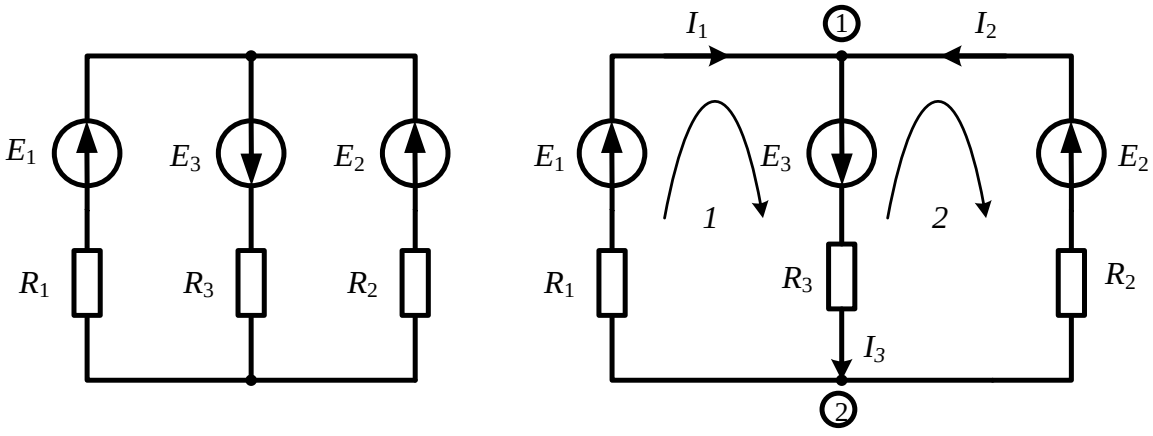
1. Алгебраїчна сума напруг, які діють у будь-якому контурі електричного кола, дорівнює нулю:

$$\sum U = 0.$$

Метод розрахунку, який базується на застосуванні законів Кірхгофа, є класичним і основним для розрахунку складних електричних кіл. Інші методи

розрахунку ґрунтуються на цих законах, і мета їх використання – зменшити трудомісткість розрахунків.

Струми у колі, яке досліджується в даній лабораторній роботі, розраховують за допомогою законів Кірхгофа. Методику розрахунку покажемо на конкретному прикладі (рис. 2.2а).



а) б)

Рис. 2.2

1. Для схеми рис. 2.2 визначаємо кількість вузлів n і гілок m: $n=2$, $m=3$.

2. Визначаємо кількість незалежних рівнянь, які необхідно скласти за законами Кірхгофа. Схема містить три гілки, в кожній з яких протікає свій струм, отже загальне число рівнянь для цього кола дорівнює трьом.

3. З першим законом складають $(n-1)$ незалежне рівняння, в даному випадку 1. За другим законом складають $(m-n+1)$ незалежне рівняння. Для даного кола 3-2+1=2 рівняння (слід відзначити, що кількість рівнянь, які складаються за другим законом Кірхгофа, дорівнює числу незалежних контурів).

Довільно вибираємо позитивний напрям струмів I_1, I_2, I_3 (рис. 2.2,*б*) і складаємо рівняння за першим законом Кірхгофа для будь-якого з вузлів, наприклад, для вузла 1 (струми, що входять в вузол, враховуємо зі знаком «+», струми, які виходять з вузла, із знаком «–»):

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Довільно задаємо напрям обходу незалежних контурів 1 і 2 та складаємо рівняння за другим законом Кірхгофа:

- 1 контур $E_1 + E_3 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3,$
- 2 контур $-E_2 - E_3 = -I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3$ або $E_2 + E_3 = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3.$

Розв'язуючи систему рівнянь

$$\left.\begin{aligned} &I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ &I_1 R_1 + I_3 R_3 = E_1 + E_3 \\ &I_2 R_2 + I_3 R_3 = E_2 + E_3 \end{aligned}\right\}$$

отримуємо невідомі струми $I_1,\ I_2,\ I_3.$

Необхідно відзначити, що в результаті розв'язання рівнянь можна отримати від'ємне значення будь-якого струму. Це означає, що дійсний напрям струму є оберненим раніше довільно обраному. Слід пам'ятати, що порядок розрахунку кола за методом законів Кірхгофа не залежить від того, які величини задані, а які потрібно визначити. Так, за відомими значеннями струмів і опорів можна розрахувати ЕРС; за відомими ЕРС і струмами – опори тощо.

Потенціальна діаграма – це графік розподілу потенціалів вздовж певної ділянки кола або контура. За віссю абсцис відкладають послідовно опори ділянок кола між зазначеними точками, а за віссю ординат – потенціали відповідних точок кола. Потенціальну діаграму можна побудувати, скориставшись результатами вимірювань значень потенціалів точок або результатами розрахунку цих потенціалів.

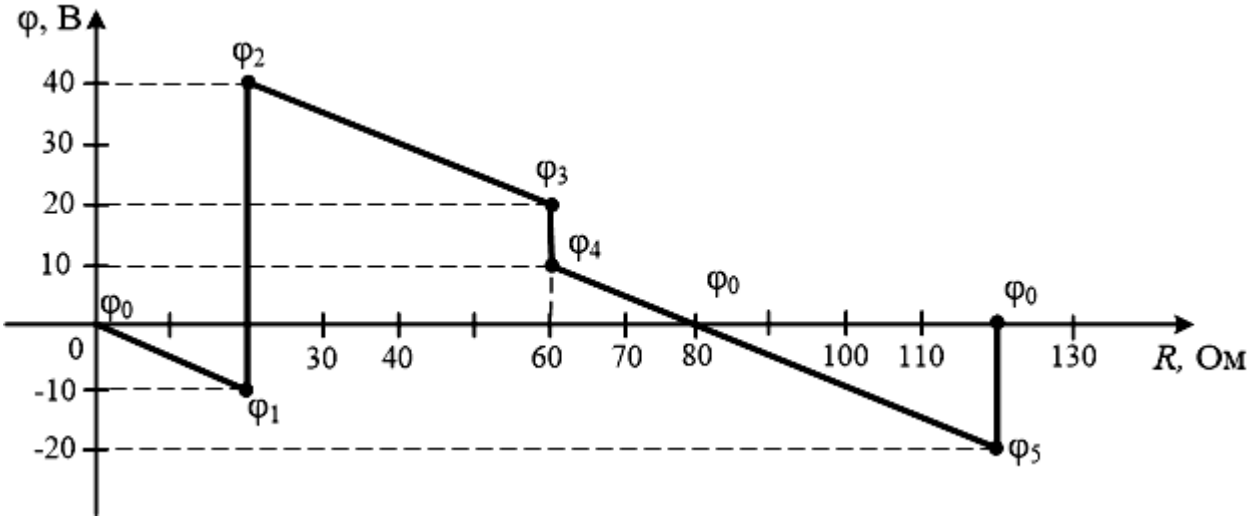


Рис. 2.3

Послідовність побудови потенціальної діаграми:

1. Обрати напрямок обходу контуру (вітки);
2. Позначити буквами або цифрами точки контуру (вітки);
3. Обрати масштаб для опорів і масштаб для потенціалів;
4. На осі абсцис відмітити відрізки, довжини яких в масштабі відповідають величинам опорів окремих ділянок контуру (вітки), дотримуючись послідовності розташування цих ділянок в електричному колі;
5. Позначити для відмічених кінців відрізків ординати, які в масштабі пропорційні потенціалам відповідних точок електричного кола;
6. З'єднати побудовані точки прямими лініями.

За наданою потенціальною діаграмою, окрім потенціалу будь-якої точки контуру (вітки), можна визначити напругу між будь-якими точками (як різницю потенціалів) та величину і напрямок струму на окремій ділянці кола.

Значення струму визначається тангенсом кута нахилу лінії потенціальної діаграми для певної ділянки кола α

$$I = tg\alpha \frac{m_\varphi}{m_R},$$

де m_φ – масштаб за віссю потенціалів;

m_R – масштаб за віссю опорів ділянок кола.

2.2 Порядок виконання роботи

1. Визначення параметрів основних елементів електричного кола.

1.1. Визначення величини ЕРС E та величини внутрішнього опору R_0 кожного джерела.

1.1.1. Підключивши вольтметр до кожного джерела, виміряти їх ЕРС E_1 та E_2 і записати їх значення у таблицю 2.1.

1.1.2. Скласти коло, показане на рис. 2.4. Ввімкнути нерегульоване джерело живлення і виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою $R_0 = \frac{E-U}{I}$ і записати його значення у табл. 2.1.

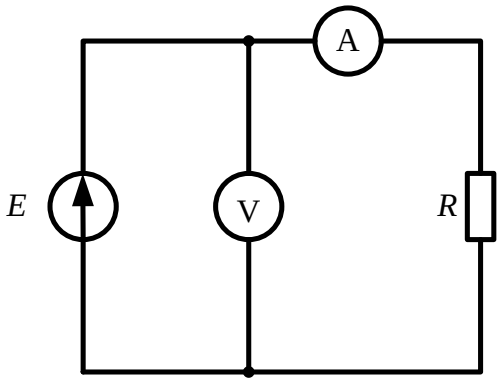


Рис. 2.4

1.1.3. У колі, показаному на рис. 2.4. замінити нерегульоване джерело живлення регульованим і виміряти струм у колі і напругу на затискачах джерела. Обчислити внутрішній опір джерела за формулою $R_0 = \frac{E-U}{I}$ і записати його значення у табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

E_1[В]	R_{01}[Ом]	E_2[В]	R_{02}[Ом]	R_1[Ом]	R_2[Ом]	R_3[Ом]

1.2. Визначити величину опору навантаження, позначеного як R_1, R_2, R_3. Для цього потрібно виконати наступне:

1.2.1. Резистор, величина опору якого буде визначатися, підключити до будь-якого джерела по схемі на рис. 2.4.

1.2.2. Виміряти напругу і струм у колі.

1.2.3. Розрахувати величину опору резистора, користуючись законом Ома: $R = \frac{U}{I}$. Повторити п.1.2.1.-1.2.3 для кожного резистора. Отримані результати записати у табл. 2.1.

2. Перевірка у ході експерименту справедливості законів Кірхгофа.

2.1. Скласти коло зображене на рис. 2.5.

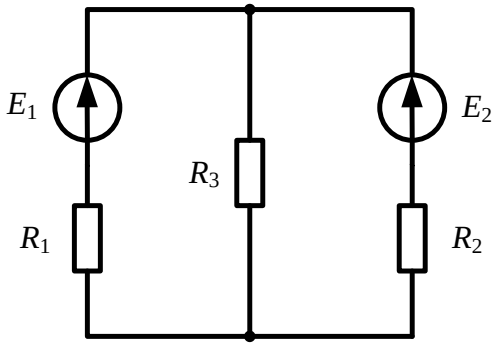


Рис.2.5

2.2. Перевірити справедливість першого закону Кірхгофа. Для цього потрібно:

2.2.1. Виміряти струми з урахуванням їх знаків та занести у табл. 2.2. Для правильного урахування знаку струму необхідно дотримуватись однакового підключення амперметру у кожну гілку (наприклад, затискач амперметра позначений «*» включати у верхнє гніздо, а затискач, позначений «mA» – у нижнє).

2.2.2. Вказати на схемі напрям струмів. За позитивний обирається напрям струму від затискача амперметра «mA» до затискача «*». Напрям струму від «*» до «mA» вважати негативним.

2.2.3. За результатами вимірювань переконатися у виконанні першого закону Кірхгофа.

Таблиця 2.2

I_1,[A]	I_2,[A]	I_3,[A]	U_{E1}[B]	U_{E2}[B]	U_{R1}[B]	U_{R2}[B]	U_{R3}[B]

2.3. Перевірити справедливість другого закону Кірхгофа. Для цього необхідно:

2.3.1. Позначити полярність напруг на всіх ділянках кола. Струм через резистор тече в напрямку зменшення потенціалу, тобто від точки з більшим потенціалом «+» до точки з меншим потенціалом «–». Напруга завжди має напрям від «+» до «–». Тому на резисторі напрями напруги і струму збігаються. Для джерел ЕРС спрямована від «–» до «+», тому напруга на затискачах джерела ЕРС спрямована назустріч ЕРС.

2.3.2. Виміряти напруги, які вказані в табл.2.2, підключаючи вольтметр у відповідності з позначеною на схемі полярністю напруг (затискач вольтметра «V» підключати до точки «+»).

2.3.3. За результатами вимірювань напруг на різних ділянках кола розрахувати алгебраїчну суму напруг $\sum U$ в усіх можливих контурах і переконатися у справедливості другого закону Кірхгофа.

3. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 2.6.

3.1. Виміряти напруги між пронумерованими точками електричного кола (рис. 2.6). Значення напруг записати у відповідні рядки табл. 2.3.

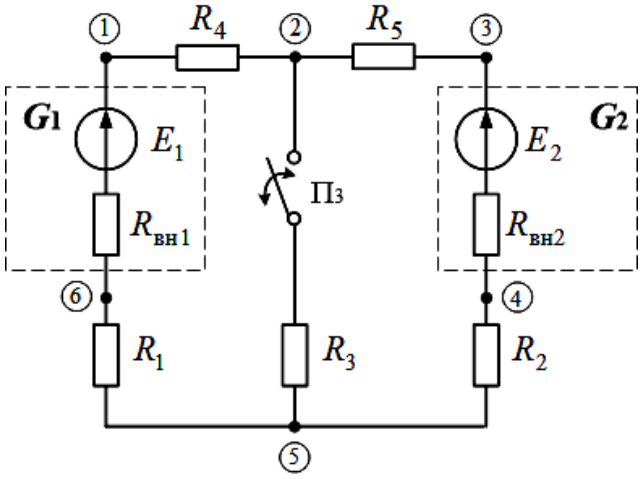


Рис. 2.6

Таблиця 2.3

Вид роботи	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}	U_{56}	U_{61}	$\sum U_{ij}$
Дослід							
Розрахунок							

3.2 Виміряти потенціали всіх пронумерованих точок кола (рис. 2.6) відносно опорної $\varphi_i = 0$ за умови замкненого ключа $П_3$. Номер опорного вузла зазначає викладач. Значення потенціалів записати у табл. 2.4. Вирахувати напруги на ділянках кола як різниці потенціалів (наприклад, $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$), записати результати у табл. 2.4 та порівняти з результатами вимірів напруг із табл. 2.3.

Таблиця 2.4

Вид роботи	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}	U_{56}	U_{61}
Дослід												
Розрахунок												

2.3 Опрацювання результатів вимірювання

1. Використавши закон Ома, розрахувати за відомими значеннями ЕРС і опорів (табл. 2.1) струми у гілках кола, яке показано на рис. 2.5 і порівняти їх з результатами експерименту, записаними у табл. 2.2.

2. Розрахувати за законами Кірхгофа струми у колі, показаному на рис. 2.5 (значення ЕРС і опорів взяти з табл. 2.1). Результати обчислень порівняти з результатами експерименту, записаними у табл.2.2.

3. Розрахувати напруги на елементах кола і потенціали пронумерованих точок кола, використовуючи розраховані значення струмів у вітках кола та дані про параметри елементів. Результати розрахунків записати у відповідні рядки табл. 2.3 та 2.4 і порівняти з результатами лабораторних досліджень;

4. Побудувати потенціальну діаграму для контура з двома джерелами ЕРС.

5. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

2.4 Запитання і завдання для самоперевірки

1. Чим відрізняється складне електричне коло від простого?

2. Як визначити з досліду параметри лінійного електричного кола постійного струму (ЕРС і внутрішній опір джерела електричної енергії, опір приймачів)?
3. Як формулюється закон Ома для вітки електричного кола? Для нерозгалуженого кола?
4. Як формулюються перший та другий закони Кірхгофа?
5. Яким чином можна перевірити, чи задовольняють одержані дослідним шляхом струми і напруги перший та другий закони Кірхгофа?
6. Скільки незалежних рівнянь необхідно і достатньо скласти для розгалуженого електричного кола за першим законом Кірхгофа? За другим законом Кірхгофа? Всього?
7. Що являє собою потенціальна діаграма для електричного контура?
8. Як визначити за потенціальною діаграмою напругу між будь-якими двома точками електричного кола? Величину та напрямок струму на ділянці електричного кола?

2.5 Дані дослідів для дистанційної форми навчання

Таблиця 2.5

№	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}	U_{56}	U_{61}	$\sum U_{ij}$
1	9.8	-0.8	8.0	-0.2	2.7	-19.5	
2	10.7	-2.7	10.0	-0.8	2.4	-19.6	
3	8.2	-2.6	10.0	-0.8	2.6	-17.4	
4	11.6	-1.8	12.0	-0.5	3.2	-24.4	
5	10.7	-6.2	17.0	-1.8	2.5	-22.2	
6	8.2	-4.5	12.9	-1.3	2.0	-17.4	
7	10.6	0.3	7.0	0.1	3.4	-21.4	
8	9.9	-2.3	10.0	-0.7	2.5	-19.4	
9	7,8	-2,5	10,9	-0,7	2,0	-17,6	
10	8,9	-3,6	12,9	-0,9	2,0	-19,4	
11	12,0	-2,7	13,9	-0,8	2,8	-25,2	
12	11,3	-1,7	11,0	-0,5	3,2	-23,3	
13	9,8	-3,9	12,9	-1,0	2,4	-20,2	
14	8,4	-5,7	15,9	-1,6	2,4	-19,4	
15	9,1	-1,0	7,0	-0,3	2,6	-17,4	
16	10,1	-2,2	11,0	-0,7	3,3	-21,5	
17	8,9	-3,9	12,9	-1,4	3,1	-19,6	
18	10,0	-4,7	14,9	-1,3	2,7	-21,6	
19	9,9	-3,1	10,9	-1,0	2,8	-19,5	
20	9,7	-1,5	9,0	-0,5	2,8	-19,5	
21	8,2	-0,7	7,0	-0,2	2,2	-16,5	
22	11,3	-3,6	12,9	-1,1	3,8	-23,4	
23	10,2	-1,6	9,0	-0,5	3,4	-20,4	
24	8,4	-3,2	11,9	-1,0	2,5	-18,6	
25	9,3	-4,5	14,9	-1,4	3,1	-21,5	
26	9,2	-2,5	11,0	-0,8	2,7	-19,6	
27	8,7	-3,2	10,9	-1,1	2,3	-17,6	
28	9,9	-3,5	12,9	-1,2	2,4	-20,5	
29	9,2	-5,5	14,9	-1,7	2,6	-19,5	

Таблиця 2.6

№	φ_1	φ_2	φ_3	φ_4	φ_5	φ_6	U_{12}	U_{23}	U_{34}	U_{45}	U_{56}	U_{61}
1	0.0	-9.8	-9.0	-17.0	-16.7	-19.5	9.8	-0.8	8.0	-0.2	2.7	-19.5
2	10.7	0.0	2.7	-7.3	-6.5	-8.9	10.7	-2.7	10.0	-0.8	2.4	-19.6
3	5.6	-2.6	0.0	-10.0	-9.2	-11.8	8.2	-2.6	10.0	-0.8	2.6	-17.4
4	21.8	10.2	12.0	0.0	0.5	-2.7	11.6	-1.8	12.0	-0.5	3.2	-24.4
5	19.6	8.9	15.1	-1.8	0.0	-2.5	10.7	-6.2	17.0	-1.8	2.5	-22.2
6	17.4	9.2	13.7	0.8	2.0	0.0	8.2	-4.5	12.9	-1.3	2.0	-17.4
7	0.0	-10.6	-10.9	-17.9	-18.0	-21.4	10.6	0.3	7.0	0.1	3.4	-21.4
8	9.9	0.0	2.3	-7.7	-7.0	-9.5	9.9	-2.3	10.0	-0.7	2.5	-19.4
9	5,3	-2,5	0,0	-10,9	-10,3	-12,2	7,8	-2,5	10,9	-0,7	2,0	-17,6
10	18,3	9,4	12,9	0,0	0,9	-1,0	8,9	-3,6	12,9	-0,9	2,0	-19,4
11	22,4	10,4	13,2	-0,8	0,0	-2,8	12,0	-2,7	13,9	-0,8	2,8	-25,2
12	23,3	12,0	13,7	2,7	3,2	0,0	11,3	-1,7	11,0	-0,5	3,2	-23,3
13	0,0	-9,8	-5,9	-18,8	-17,8	-20,2	9,8	-3,9	12,9	-1,0	2,4	-20,2
14	8,4	0,0	5,7	-10,2	-8,6	-11,0	8,4	-5,7	15,9	-1,6	2,4	-19,4
15	8,1	-1,0	0,0	-7,0	-6,7	-9,3	9,1	-1,0	7,0	-0,3	2,6	-17,4
16	18,9	8,7	11,0	0,0	0,7	-2,6	10,1	-2,2	11,0	-0,7	3,3	-21,5
17	16,5	7,6	11,5	-1,4	0,0	-3,1	8,9	-3,9	12,9	-1,4	3,1	-19,6
18	21,6	11,6	16,3	1,4	2,7	0,0	10,0	-4,7	14,9	-1,3	2,7	-21,6
19	0,0	-9,9	-6,7	-17,7	-16,7	-19,5	9,9	-3,1	10,9	-1,0	2,8	-19,5
20	9,7	0,0	1,5	-7,4	-6,9	-9,7	9,7	-1,5	9,0	-0,5	2,8	-19,5
21	7,5	-0,7	0,0	-7,0	-6,8	-9,0	8,2	-0,7	7,0	-0,2	2,2	-16,5
22	20,7	9,4	12,9	0,0	1,1	-2,7	11,3	-3,6	12,9	-1,1	3,8	-23,4
23	17,0	6,9	8,5	-0,5	0,0	-3,4	10,2	-1,6	9,0	-0,5	3,4	-20,4
24	18,6	10,2	13,4	1,5	2,5	0,0	8,4	-3,2	11,9	-1,0	2,5	-18,6
25	0,0	-9,3	-4,9	-19,8	-18,4	-21,5	9,3	-4,5	14,9	-1,4	3,1	-21,5
26	9,2	0,0	2,5	-8,5	-7,7	-10,4	9,2	-2,5	11,0	-0,8	2,7	-19,6
27	5,5	-3,2	0,0	-10,9	-9,8	-12,1	8,7	-3,2	10,9	-1,1	2,3	-17,6
28	19,3	9,4	12,9	0,0	1,2	-1,2	9,9	-3,5	12,9	-1,2	2,4	-20,5
29	16,8	7,7	13,2	-1,7	0,0	-2,6	9,2	-5,5	14,9	-1,7	2,6	-19,5

Таблиця 2.7

№	R_1 [Ом]	R_2 [Ом]	R_3 [Ом]	R_4 [Ом]	R_5 [Ом]
1	50	75	120	180	250
2	45	68	100	200	230
3	55	68	110	170	220
4	55	75	150	200	260
5	45	75	110	190	255
6	40	63	100	160	215
7	38	50	85	120	170
8	44	65	105	175	225
9	38	54	120	150	205
10	40	61	130	180	230
11	45	68	140	190	240
12	50	63	120	175	200
13	40	53	100	160	210
14	43	54	100	150	190
15	40	50	80	140	185
16	51	65	105	155	200
17	55	73	100	160	200
18	49	68	120	180	250
19	52	75	100	180	235
20	55	80	120	190	240
21	60	80	150	220	265
22	60	69	105	180	225
23	55	68	100	165	220
24	53	75	130	180	235
25	57	70	120	170	220
26	48	68	110	160	200
27	45	73	100	170	205
28	44	75	115	180	215
29	50	70	100	175	230

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ СПОЛУЧЕНЬ ОПОРІВ ЗА СХЕМАМИ «ЗІРКА» ТА «ТРИКУТНИК»

Мета роботи: Перевірити справедливість співвідношень, що використовують для розрахунку еквівалентних опорів для послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів.

Здійснити еквівалентні перетворення резисторів, які утворюють сторони несиметричного «трикутника» на сполучення резисторів «зіркою». Здійснити еквівалентні перетворення сполучення резисторів симетричною «зіркою» на сполучення резисторів «трикутником».

3.1 Основні теоретичні відомості

Розрахунок електричного кола у багатьох випадках можна значно полегшити, якщо застосувати еквівалентні перетворення. **Еквівалентним перетворенням** називають заміну будь-якої частини кола на іншу схемну реалізацію з відмінною структурою і параметрами елементів за умови, що така заміна не призводить до зміни струмів та напруг у тій частині кола, яка не перетворюється. Еквівалентні перетворення зменшують кількість віток або(і) вузлів схеми, а отже, і кількість рівнянь, що визначають її електричний стан. Особливу значущість набувають еквівалентні перетворення під час аналізу простих кіл, до складу яких входить лише одне джерело енергії й елементи, що з'єднані між собою послідовно, паралельно, зіркою або трикутником. Розрахунок струмів і напруг на ділянках простих кіл найчастіше виконують методом еквівалентних перетворень (згортки). На першому етапі схему заміщення кола спрощують до одного контуру з ідеальним джерелом напруги або до двоконтурної схеми з ідеальним джерелом струму, а на другому етапі розгортають спрощену схему до вихідної структури.

Зауваження. Вочевидь, що просте коло, як і будь-яке складне з кількома джерелами енергії, можна проаналізувати класичними методами контурних струмів та вузлових потенціалів.

Основними видами еквівалентних перетворень пасивних ділянок електричних кіл є заміна одним еквівалентним опором послідовно або паралельно увімкнених резисторів та взаємозаміна сполучення трьох резисторів «трикутником» на з'єднання трьох резисторів «зіркою».

Резистори з'єднані **послідовно**, якщо через всі елементи проходить один і той самий струм. При послідовному з'єднанні елементів їх опори додаються арифметично: $R_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^{n} R_k$.

Резистори з'єднані **паралельно**, якщо до елементів прикладена одна і та сама напруга. При паралельному з'єднанні елементів їх провідності додаються арифметично: $G_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^{n} G_k$.

Якщо до пари вузлів приєднані тільки два опори, формула для розрахунку еквівалентного опору набуває вигляду: $R_{\text{екв}} = \dfrac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Сполучення трьох резисторів, які утворюють сторони трикутника, називають «**трикутником**» (рис. 3.1,а). «**Зірка**» – це з'єднання трьох резисторів, яке має вигляд трипроменевої зірки (рис. 3.1,б). У вузлах ①, ②, ③ «зірка» і «трикутник» зв'язані з рештою схеми.

Правило еквівалентного перетворення «трикутника» опорів на «зірку»: опір променя зірки, приєднаного до вузла *a,* визначається як добуток двох опорів віток трикутника, прилеглих до вузла *a*, поділений на суму опорів усіх трьох віток трикутника:

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, \quad R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}.$$

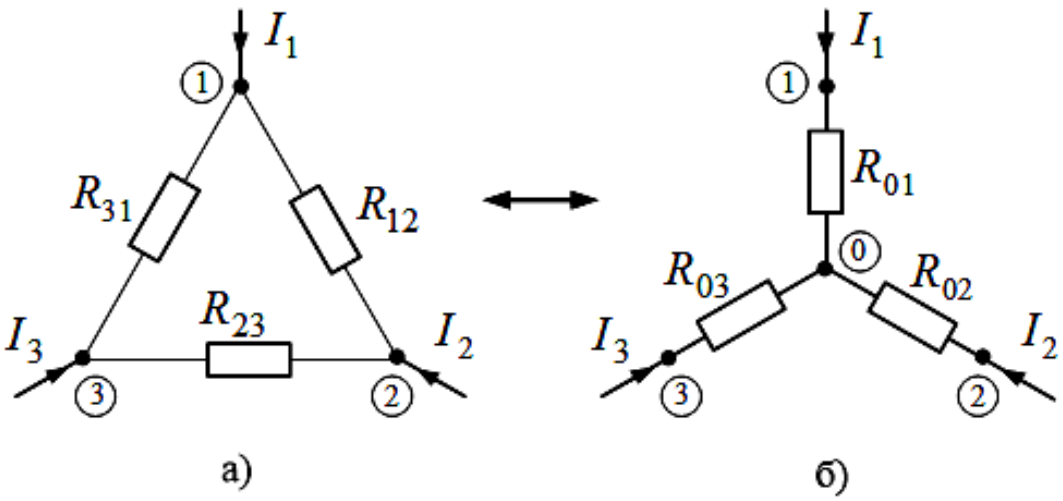


Рис. 3.1. Схема заміщення частини кола:
сполучення трьох резисторів «трикутником» (а), «зіркою» (б)

Правило еквівалентного перетворення «зірки» опорів на «трикутник»: опір сторони трикутника між вузлами *a* і *b* дорівнює сумі опорів променів зірки, прилеглих до вузлів *a* і *b*, та їхнього добутку, поділеному на опір третього променя зірки:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3},\ R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1},\ R_{31} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_2}.$$

Резистори з'єднані **мішано**, якщо деякі із сукупності резисторів з'єднані послідовно, деякі паралельно, а деякі, можливо, «трикутником» або «зіркою». Еквівалентний опір кола з мішаним з'єднанням резисторів відносно вхідних затискачів розраховується поетапно – схема нібито згортається до одного еквівалентного елемента. Розпочинати згортання слід з еквівалентних перетворень елементів, увімкнених якнайдалі від вхідних затискачів.

3.2 Порядок виконання роботи

1. Значення опорів резисторів R_{12}, R_{23}, R_{31}, які задає викладач, слід записати у рядки таблиці 3.1. В якості резисторів з номіналами R_{12}, R_{23}, R_{31} використати магазини опорів (два магазини розміщені у правій тумбі науково-дослідного стенда, третій магазин – переносний).

Таблиця 3.1

R_{12}	R_{23}	R_{31}

2. З'єднати три резистори R_{12}, R_{23}, R_{31} послідовно (рис. 3.2,а), потім паралельно (рис. 3.2,б) та мішано (рис. 3.2,в). Виміряти еквівалентний опір кожного сполучення резисторів за допомогою мультиметра у режимі омметра і записати значення у таблицю 3.2.

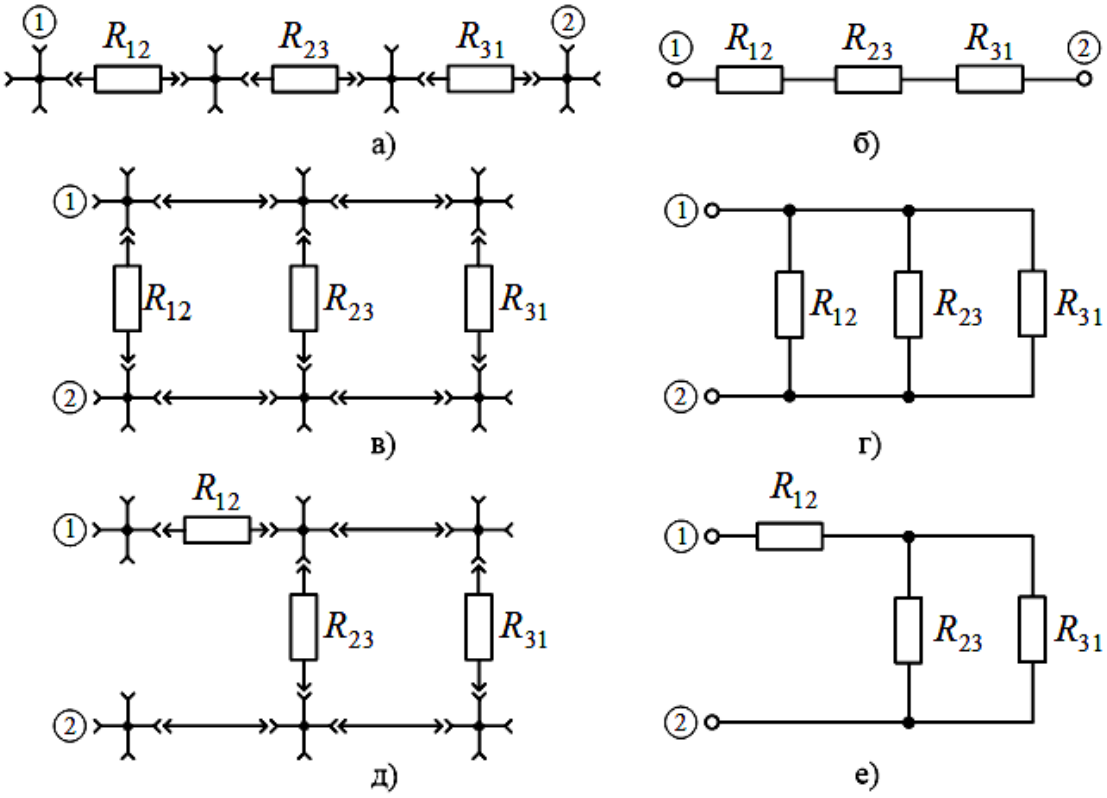
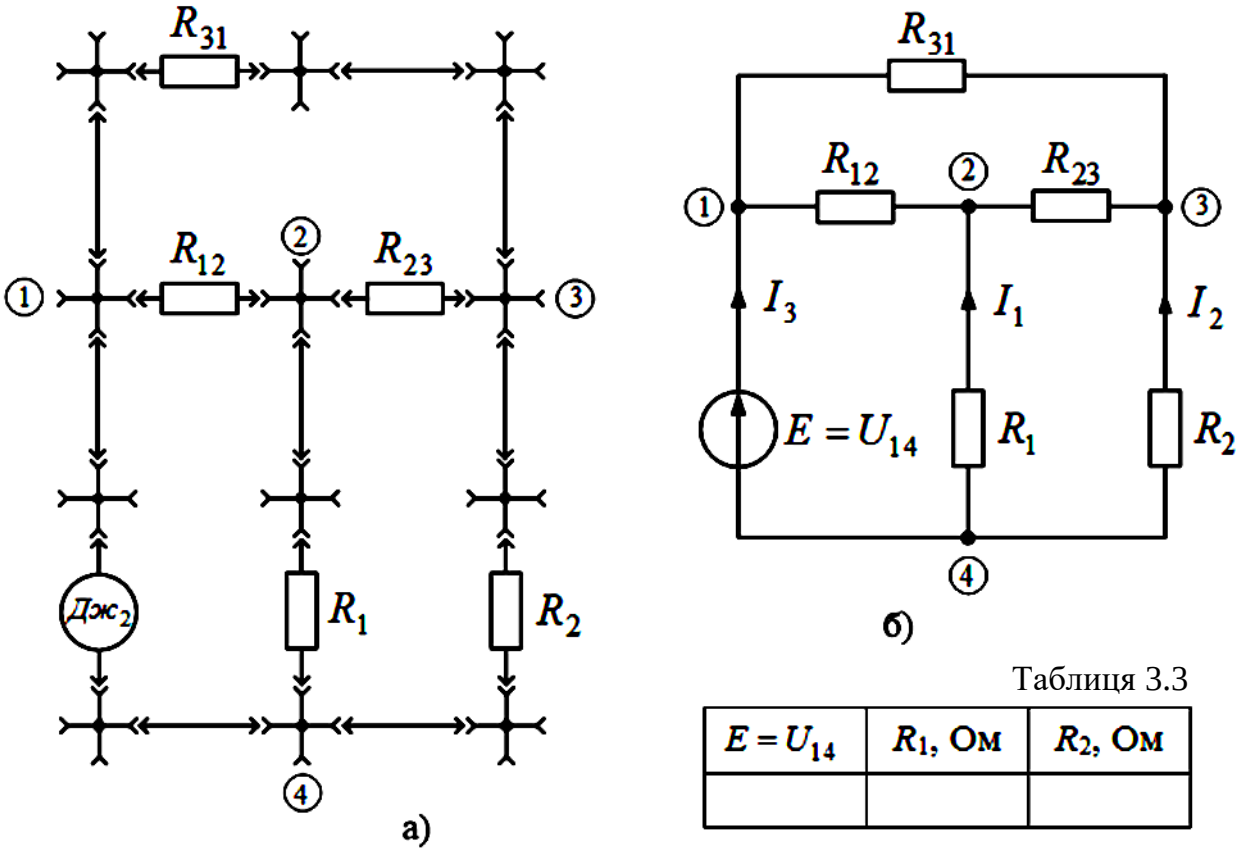


Рис. 3.2. Послідовне (а), (б), паралельне (в), (г) і мішане сполучення резисторів (д), (е)

Таблиця 3.2

Тип сполучення резисторів	**Еквівалентний опір сполучення резисторів**		
	показ омметра	**розрахункова формула**	**результат обчислення**
послідовно			
паралельно			
мішано			

3. Скласти електричне коло, в якому три резистори R_{12}, R_{23}, R_{31} сполучені «трикутником» (рис. 3.3,а). Значення напруги U_{14} між затискачами регульованого джерела напруги *Дж*$_2$, навантаженого на пасивне коло, задає викладач. Потрібно виміряти омметром значення опорів резисторів R_1, R_2 і записати разом з величиною U_{14} у таблицю 3.3. Довільно спрямувати струми I_1, I_2, I_3 у трьох вітках, які є зовнішньою частиною електричного кола щодо сполучення резисторів R_{12}, R_{23}, R_{31} «трикутником», і позначити напрями струмів на схемі заміщення, наприклад як на рис. 3.1,б.



Таблиця 3.3

$E = U_{14}$	R_1, Ом	R_2, Ом

Рис. 3.3. Схема кола, в якому резистори з’єднані «трикутником»: монтажна (а), схема заміщення з довільно спрямованими струмами (б)

4. Виміряти напруги U_{12}, U_{23}, U_{31} між вершинами трикутника ①, ②, ③ та вхідні щодо «трикутника» струми I_1, I_2, I_3 згідно з обраними напрямами. Результати вимірювань записати у перший рядок таблиці 3.4. Обов’язково указати значення опорів резисторів R_{12}, R_{23}, R_{31}.

Таблиця 3.4

Тип сполучення резисторів	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
Трикутник: R_{12} = , R_{23} = , R_{31} =						
Зірка: R_{01} = , R_{02} = , R_{03} =						

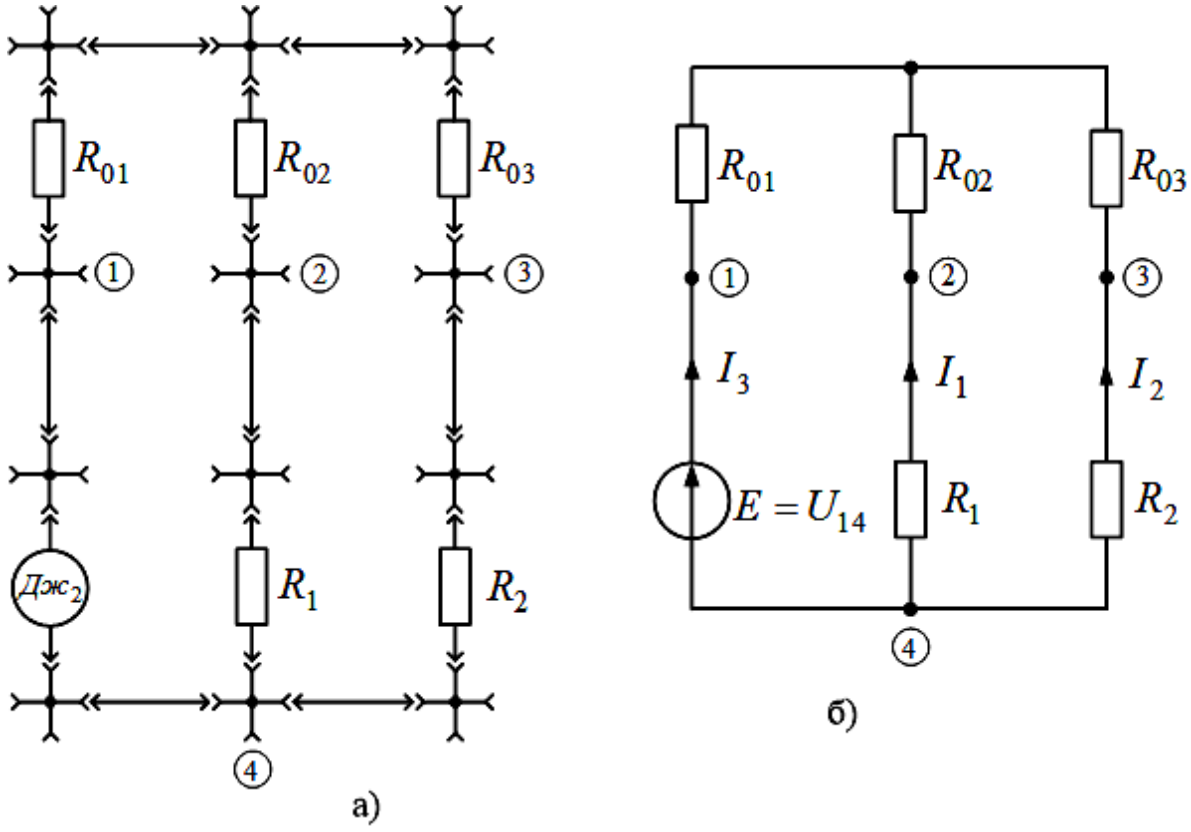


Рис. 3.4. Схема кола, в якому резистори R_{01}, R_{02}, R_{03} сполучені «зіркою»: монтажна (а), схема заміщення (б)

5. Здійснити еквівалентне перетворення сполучення резисторів R_{12}, R_{23}, R_{31} «трикутником» на сполучення «зіркою» резисторів R_{01}, R_{02}, R_{03}, значення опорів яких потрібно розрахувати і записати у перший стовпець таблиці 3.4.

6. Скласти електричне коло, в якому три резистори R_{01}, R_{02}, R_{03} сполучені «зіркою» (рис. 3.4). Виміряти напруги U_{12}, U_{23}, U_{31} між вузлами ①, ②, ③ та вхідні щодо «зірки» струми I_1, I_2, I_3. Результати вимірювань записати у другий

рядок таблиці 3.4. та порівняти з результатами вимірів у схемі на рис. 3.4. Упевнитись в тому, що здійснено еквівалентне перетворення.

7. Отримати у викладача інформацію щодо значень опорів резисторів R_{01}, R_{02}, R_{03}, сполучених на симетричну «зірку» (рис. 3.4), і записати ці значення у перший стовпчик таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Тип сполучення резисторів	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
Симетрична зірка: R_{01} = , R_{02} = , R_{03} =						
Симетричний трикутник: R_{12} = , R_{23} = , R_{31} =						

8. Виміряти напруги U_{12}, U_{23}, U_{31} між кінцями «променів зірки» ①, ②, ③ та вхідні струми I_1, I_2, I_3. Результати вимірювань записати у перший рядок таблиці 3.5.

9. Здійснити еквівалентне перетворення симетричної «зірки» на симетричний «трикутник» (рис. 3.1) із резисторів з опорами R_{12}, R_{23}, R_{31}, значення яких треба обчислити та записати у перший стовпець таблиці 3.5.

10. Скласти електричне коло, в якому три резистори R_{12}, R_{23}, R_{31} сполучені симетричним «трикутником» (рис. 3.4). Виміряти напруги U_{12}, U_{23}, U_{31} між вершинами трикутника ①, ②, ③ та вхідні струми I_1, I_2, I_3. Результати вимірювань записати у другий рядок таблиці 3.5 та упевнитись, що здійснено еквівалентне перетворення.

3.3 Опрацювання результатів досліджень

1. Розрахувати опори послідовно, паралельно і мішано увімкнених резисторів R_{12}, R_{23}, R_{31} (рис. 3.2) з номіналами, заданими викладачем (таблиця 3.1). Розрахункові формули та результати обчислень записати у таблицю 3.2. Порівняти отримані результати з виміряними у п.1 значеннями.

2. Розрахувати сили струмів I_1, I_2, I_3 у схемі, де три резистори з різними

номіналами R_{12}, R_{23}, R_{31} сполучені «трикутником» (рис. 3.3,б), методами контурних струмів та вузлових потенціалів. Зважаючи на малий опір регульованого джерела напруги *Дж*$_2$, вважати, що електричне коло живиться від ідеального джерела напруги з $E = U_{14}$.

3. Порівняти результати розрахунків з результатами лабораторних досліджень (таблиця 3.4).

4. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

3.4 Контрольні питання

1. Як перетворити активну «зірку» на активний «трикутник» (рис 3.5)?

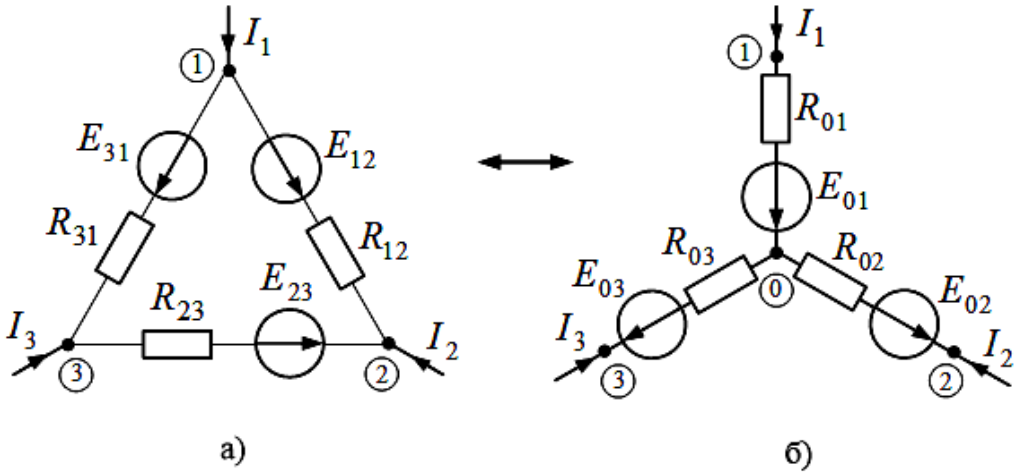


Рис. 3.5.

2. Як перетворити активний «трикутник» на активну «зірку» (рис 3.5)?

3. Яку дію називають еквівалентним перетворенням електричного кола? Які види еквівалентних перетворень Ви знаєте?

4. Яке сполучення опорів електричного кола називається «зіркою»? «трикутником»?

5. Як замінити з'єднання опорів «зіркою» на еквівалентний «трикутник»? «трикутник» на еквівалентну «зірку»?

6. Яким чином можна упевнитись в еквівалентності перетворення частини електричного кола?

3.5 Дані дослідів для дистанційної форми навчання

Таблиця 3.6

№	R_{12}	R_{23}	R_{31}	E	R_1	R_2
1	100	150	300	12	45	80
2	200	120	180	14	50	100
3	300	150	220	20	46	105
4	350	240	100	18	75	50
5	200	280	130	24	60	45
6	120	330	210	26	95	60
7	220	150	290	17	55	105
8	170	380	150	13	70	100
9	280	100	170	10	100	65
10	120	330	190	16	90	55
11	110	200	280	26	75	100
12	190	250	100	20	65	110
13	200	110	290	19	85	120
14	310	100	190	20	80	50
15	130	310	420	13	42	130
16	270	200	120	16	50	100
17	120	310	200	26	60	90
18	120	310	200	18	70	150
19	110	190	270	11	75	45
20	330	210	140	13	45	80
21	230	110	290	19	60	90
22	100	270	200	20	55	120
23	110	260	180	16	75	105
24	170	110	280	24	45	90
25	300	120	230	20	50	80
26	320	200	100	18	75	50
27	230	140	310	23	95	45
28	110	170	250	21	100	70
29	250	100	190	15	70	125
30	100	300	230	16	80	105

Таблиця 3.7

№	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
1	8.2	0.7	-8.9	-78	-35	112
2	10.7	-1.2	-9.6	-63	-43	107
3	16.6	-2.2	-14.4	-70	-51	121
4	14.0	-2.0	-12.1	-48	-112	161
5	18.0	-0.5	-17.5	-91	-133	224
6	15.1	4.3	-19.4	-113	-106	218
7	13,3	-0,6	-12,7	-65	-40	104
8	8,9	-1,1	-7,8	-55	-49	105
9	7,2	-0,1	-7,1	-26	-41	68
10	9,5	2,5	-12,0	-71	-71	142
11	15,8	2,3	-18,1	-132	-76	208
12	13,9	-3,8	-10,1	-88	-86	175
13	13,2	0,0	-13,2	-65	-46	111
14	15,8	0,0	-15,7	-51	-83	134
15	9,7	0,1	-9,8	-75	-24	98
16	12,6	-3,2	-9,5	-63	-63	126
17	17,0	0,4	-17,4	-140	-89	229
18	12,4	-4,3	-8,1	-78	-65	143
19	6,9	2,0	-8,9	-52	-43	96
20	10,9	-2,2	-8,7	-43	-52	95
21	14,7	-0,3	-14,5	-67	-47	114
22	12,7	-0,3	-12,5	-128	-61	190
23	9,5	0,4	-9,9	-84	-56	141
24	18,6	-0,4	-18,2	-113	-61	174
25	16,4	-1,2	-15,2	-65	-56	121
26	13,9	-1,7	-12,2	-52	-113	165
27	17,2	2,1	-19,3	-59	-78	137
28	11,8	3,3	-15,1	-88	-80	168
29	10,9	-1,1	-9,8	-55	-40	95
30	9,0	1,5	-10,5	-85	-51	136

Таблиця 3.8

№	U_{12}	U_{23}	U_{31}	I_1	I_2	I_3
1	8,2	-0,9	-7,4	-76	-54	130
2	9,8	-1,3	-8,5	-82	-54	135
3	14,4	-2,1	-12,3	-115	-71	186
4	12,1	0,9	-13,0	-74	-93	167
5	17,3	0,8	-18,1	-103	-119	222
6	15,2	1,6	-16,8	-111	-149	260
7	15,2	1,6	-16,8	-111	-149	260
8	9,1	-0,6	-8,5	-53	-43	96
9	5,9	0,6	-6,5	-39	-51	90
10	10,4	1,0	-11,4	-61	-81	142
11	17,1	-1,0	-16,1	-114	-95	209
12	14,8	-1,3	-13,4	-77	-57	134
13	11,2	-0,8	-10,3	-87	-69	156
14	14,2	1,2	-15,4	-70	-89	159
15	9,1	-1,9	-7,3	-87	-43	130
16	12,3	-1,4	-10,9	-70	-49	119
17	16,9	-1,4	-15,5	-142	-110	251
18	12,2	-1,8	-10,4	-82	-50	132
19	7,9	0,7	-8,6	-39	-51	90
20	9,6	-0,9	-8,6	-70	-51	122
21	13,9	-1,0	-12,9	-79	-63	142
22	14,0	-2,0	-11,9	-107	-66	173
23	10,1	-0,7	-9,4	-75	-61	136
24	19,0	-2,0	-16,9	-104	-74	179
25	14,4	-1,2	-13,2	-104	-80	183
26	11,3	1,0	-12,3	-86	-110	197
27	14,9	2,2	-17,1	-82	-124	205
28	13,6	1,0	-14,5	-71	-88	159
29	9,5	-1,1	-8,4	-74	-50	124
30	10,4	-0,6	-9,8	-69	-58	127

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОГО ДВОПОЛЮСНИКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета роботи: перевірити справедливість теореми про активний двополюсник. Ознайомитись з методами визначення параметрів елементів схем заміщення активного двополюсника.

Дослідити передавання енергії від активного двополюсника до пасивного та з'ясувати умови передавання максимальної кількості енергії. Засвоїти методику визначення сили струму у окремій вітці електричного кола методом активного двополюсника (еквівалентного генератора).

4.1 Основні теоретичні положення

Двополюсник – частина електричного кола довільної конфігурації, яка розглядається відносно двох затискачів. До затискачів можна приєднати джерело енергії або споживач електричної енергії. Еквівалентними називають двополюсники, які мають однакові вольт-амперні характеристики. Еквівалентна заміна одного двополюсника на інший не призводить до зміни режиму роботи тієї частини електричного кола, яка не входить до складу двополюсника.

Пасивний двополюсник – це двополюсник, до складу якого входять тільки пасивні елементи. Схема заміщення пасивного двополюсника в колах постійного струму являє собою резистор (рис. 4.1). Отже, пасивний двополюсник характеризується одним параметром – вхідним опором, який можна виміряти омметром чи розрахувати за наданими схемою кола та параметрами елементів, «згорнувши» схему відносно вхідних затискачів.

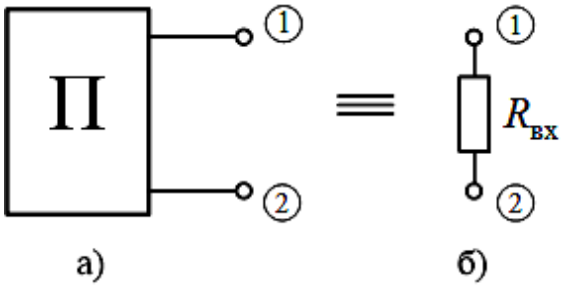


Рис. 4.1.

Активний двополюсник – це двополюсник, до складу якого входить хоча б одне джерело електричної енергії. На розімкнених затискачах активного двополюсника наявна напруга, яка називається напругою неробочого ходу (рис. 4.2, *а*). Схема заміщення активного двополюсника в колах постійного струму складається з двох елементів: послідовно з'єднаних незалежного джерела напруги і резистора (рис. 4.2, *б*) або паралельно з'єднаних незалежного джерела струму і резистора (рис. 4.2, *в*).

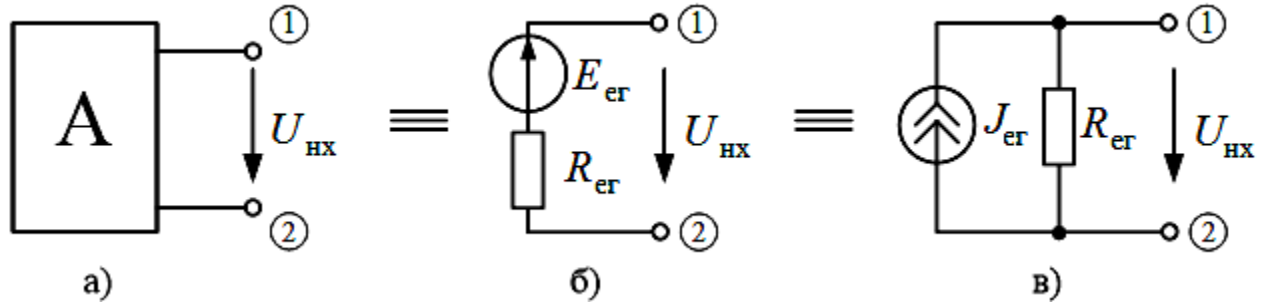


Рис. 4.2. Активний двополюсник: умовне позначення (а), послідовна схема заміщення (б), паралельна схема заміщення (в)

Вольт-амперна характеристика лінійного активного двополюсника наведена на рис. 4.3.

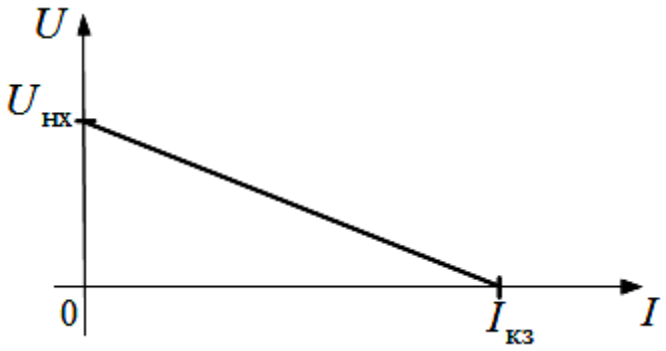


Рис. 4.3. Вольт-амперна характеристика активного двополюсника

Теорема про активний двополюсник (про еквівалентний генератор) встановлює порядок визначення параметрів елементів схем заміщення і має два формулювання: теорема Тевенена и теорема Нортона.

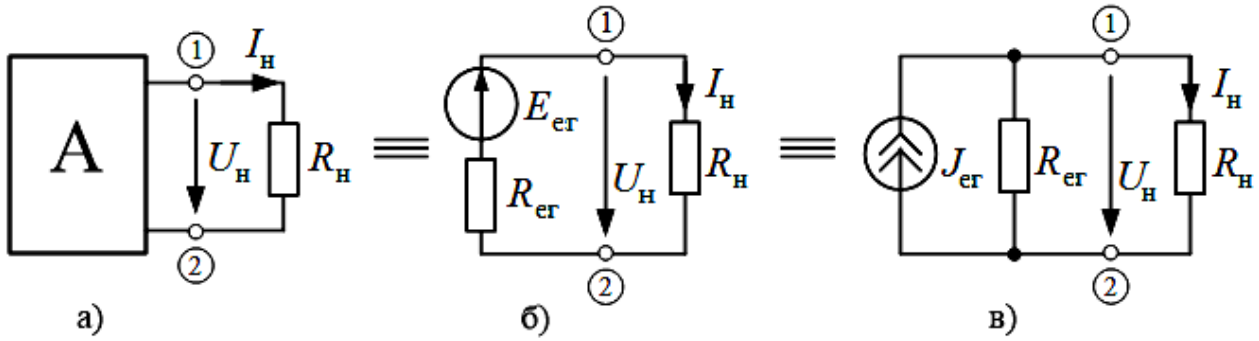


Рис. 4.4. Активний двополюсник: зображення на схемі (а), послідовна (а) і паралельна (б) схеми заміщення

Теорема Тевенена: *струм у будь-якій вітці електричного кола не зміниться, якщо активний двополюсник, до якого приєднана розглядувана вітка* $R_н$, *замінити еквівалентним генератором напруги, схема заміщення якого складається з послідовно увімкнених ідеалізованого джерела ЕРС і резистора* (рис. 4.4, *б*). *Значення ЕРС дорівнює напрузі неробочого ходу на розімкнених затискачах активного двополюсника. Значення опору дорівнює вхідному опору пасивного двополюсника, який утворюють з активного заміною всіх джерел на їхні внутрішні опори.*

$$I_н = \frac{E_{ег}}{R_{ег} + R_н},\ E_{ег} = U_{нх},\ R_{ег} = R_{вх}.$$

Із формули виходить, що в режимі короткого замикання виконується співвідношення $R_н = 0 \rightarrow I_{кз} = \frac{E_{ег}}{R_{ег}}$, яке надає змогу визначити опір еквівалентного генератора за результатами дослідів в режимах неробочого ходу і короткого замикання: $R_{ег} = \frac{E_{ег}}{I_{кз}}$.

Теорема Нортона: *Напруга на будь-якій вітці електричного кола не зміниться, якщо активний двополюсник, до якого приєднана розглядувана вітка* $R_н$, *замінити еквівалентним генератором напруги, схема заміщення якого складається з паралельно увімкнених ідеалізованого джерела струму і*

резистора (рис. 4.4, *в*). *Значення струму джерела дорівнює вихідному струму активного двополюсника у режимі короткого замикання. Опір резистора дорівнює вхідному опору пасивного двополюсника, який утворюється з активного заміною всіх джерел на їхні внутрішні опори.*

$$U_{\text{н}} = \frac{J_{\text{ег}}}{G_{\text{ег}} + G_{\text{н}}},\ J_{\text{ег}} = I_{\text{кз}},\ G_{\text{ег}} = G_{\text{вх}}.$$

Струм у будь-якій вітці електричного кола (напругу) можна визначити, якщо замінити всю схему відносно цієї вітки еквівалентним генератором. Метод розрахунку струму (напруги) лише *однієї вітки* складного електричного кола, який ґрунтується на представленні активного двополюсника схемою заміщення називають **методом еквівалентного генератора**. Рекомендована послідовність розрахунку струму у вітці:

1) Вилучити із схеми вітку, струм через яку треба визначити, і розрахувати напругу між вузлами активного двополюсника, до яких була приєднана ця вітка $U_{\text{нх}} = E_{\text{ег}}$;
2) Замінити джерела у складі активного двополюсника на внутрішні опори і визначити еквівалентний опір пасивного двополюсника, що утворився, відносно затискачів $R_{\text{вх}} = R_{\text{ег}}$;
3) Приєднати вилучену вітку до схеми еквівалентного генератора і за законом Ома визначити в ній струм. Якщо вітка, в якій визначається струм, являє собою послідовне з'єднання опору $R_{\text{н}}$ і джерела напруги з ЕРС $E_{\text{н}}$, то струм дорівнює: $I_{\text{н}} = \frac{E_{\text{ег}} \mp E_{\text{н}}}{R_{\text{ег}} + R_{\text{н}}}$.
4) **Потужність**, яку отримує навантаження $R_{\text{н}}$ від активного двополюсника, визначається за законом Джоуля-Ленца: $P_{\text{н}} = I_{\text{н}}^2 \cdot R_{\text{н}} = \left(\frac{E_{\text{ег}}}{R_{\text{ег}} + R_{\text{н}}} \right)^2 R_{\text{н}}$.
5) Математичний аналіз функції $P_{\text{н}} = f(R_{\text{н}})$ доводить, що максимальне значення потужність набуває в режимі узгодження навантаження, тобто за

умови $R_н = R_{ег}$. **Коефіцієнт корисної дії** показує, яку частину потужності активних джерел, які наявні в складі активного двополюсника, становить корисна потужність, що споживається навантаженням. Після заміни активного двополюсника схемою заміщення за теоремою Тевенена значення коефіцієнта корисної дії можна обчислити за виразом:

$$\eta = \frac{P_н}{P_{ген}} = \frac{R_н \cdot I^2}{R_{ег} \cdot I^2 + R_н \cdot I^2} = \frac{R_н}{R_{ег} + R_н}.$$

4.2 Порядок проведення роботи

1. Скласти електричне коло, монтажна схема якого зображена на рис. 4.4,*а*. Це схема активного двополюсника (еквівалентного генератора), що розглядається відносно вузлів ① та ②. Значення напруги U_{14} між затискачами керованого джерела напруги *Дж*$_2$, навантаженого на пасивне коло, задає викладач. Резистори R_1, R_2, R_3, R_4 – це набірні елементи з незмінними опорами. Під час складання схеми на робочому полі слід виміряти опори резисторів $R_1 \ldots R_4$. Результати вимірів напруги U_{14} та значення опорів резисторів $R_1 \ldots R_4$ записати у табл. 4.1.

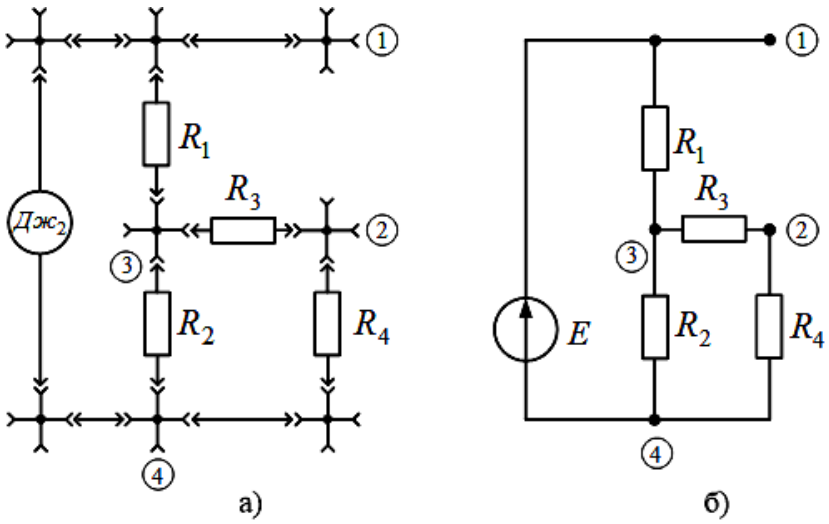


Рис. 4.4.

Таблиця 4.1

$E = U_{14}$	R_1	R_2	R_3	R_4

2. Виміряти напругу на розімкнених затискачах активного двополюсника у режимі неробочого ходу (рис. 4.5, *а*). Записати значення напруги неробочого ходу $U_{\text{нх}} = U_{12}\big|_{R_{\text{н}}=\infty}$ у перший рядок табл. 4.2.

3. Приєднати до затискачів ① та ② активного двополюсника амперметр (рис. 4.5,б) і виміряти струм короткого замикання $I_{\text{кз}} = I_{\text{н}}\big|_{R_{\text{н}}=0}$. Записати значення струму короткого замикання у перший рядок табл. 4.2.

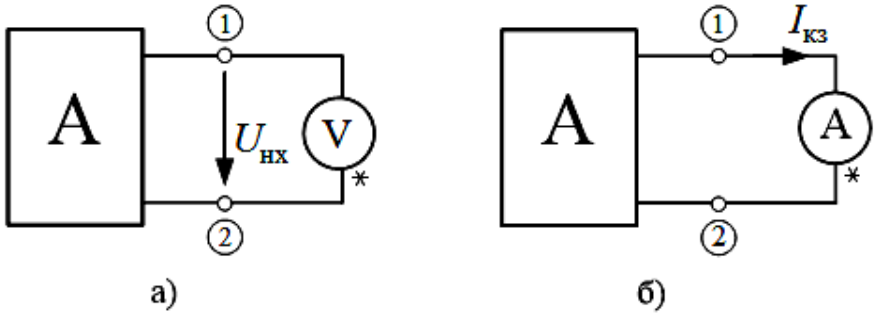


Рис. 4.5. Схеми для дослідження активного двополюсника в режимах: неробочого ходу (а) та короткого замикання (б)

Таблиця 4.2

Вид роботи	$U_{\text{нх}}$	$I_{\text{кз}}$	$R_{\text{ег}} = U_{\text{нх}} / I_{\text{кз}}$
Дослід			
Розрахунок			

4. Розрахувати значення опору активного двополюсника $R_{\text{ег}} = U_{\text{нх}} / I_{\text{кз}}$ за дослідними даними та записати у перший рядок табл. 4.2.

5. Скласти електричне коло для визначення вхідного опору пасивного двополюсника, який утворюється із активного заміною джерела енергії на його внутрішній опір. Зважаючи на малий опір керованого джерела напруги *Дж*$_2$, можна замінити джерело нульовим опором (рис. 4.3). Виміряти опір пасивного

двополюсника омметром. Порівняти отримане значення вхідного опору з розрахунковим значенням у табл. 4.2.

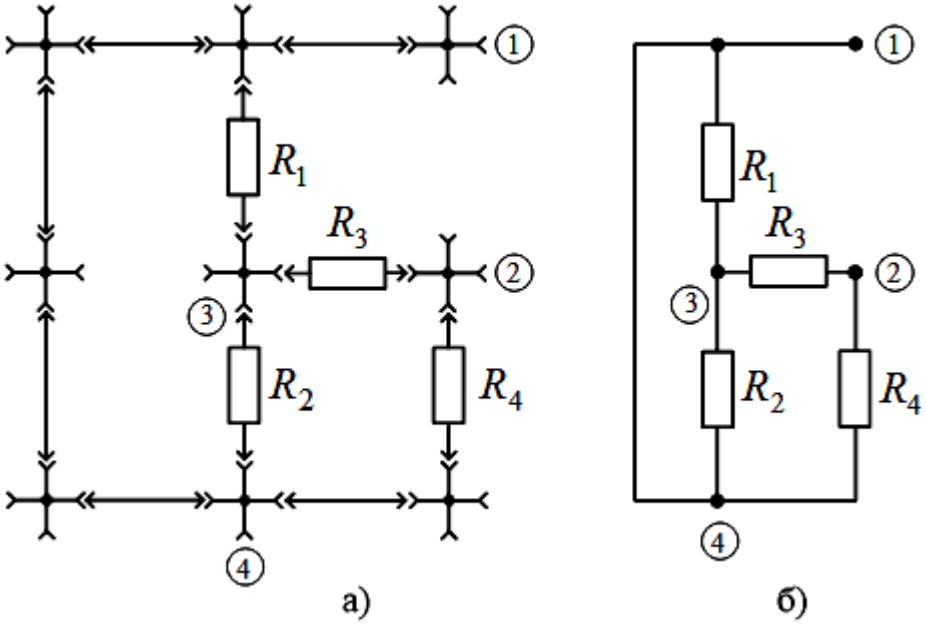


Рис. 4.6. Схема для вимірювання опору еквівалентного генератора: монтажна (а) та заміщення (б)

Зауваження. За відсутності омметра можна визначити опір пасивного двополюсника, скориставшись амперметром і вольтметром. Для цього потрібно приєднати до вхідних затискачів пасивного двополюсника ① та ② джерело напруги, наприклад регульоване *Дж*$_2$, і виміряти напругу між вузлами U_{12} та вхідний струм двополюсника. Вхідний опір двополюсника обчислити за законом Ома, поділивши напругу U_{12} на значення вхідного струму.

6. Приєднати до затискачів активного двополюсника ① та ② змінний резистор $R_{\text{н}}$ із магазину опорів навантаження $R_{\text{н}}$ (рис. 4.7). Виміряти напругу на виході активного двополюсника $U_{12} = U_{\text{н}}$ та струм через навантаження $I_{\text{н}}$ у робочих режимах, які різняться значеннями опору навантаження $R_{\text{н}}$. Зафіксувати покази вольтметра і амперметра для 10 значень опору навантаження, обираючи їх довільно у діапазоні від $0.2 \cdot R_{\text{ег}}$ до $4 \cdot R_{\text{ег}}$. При цьому слід обов'язково виконати дослід для $R_{\text{н}} = R_{\text{ег}}$.

Результати вимірювань записати у відповідні рядки табл. 5.3.

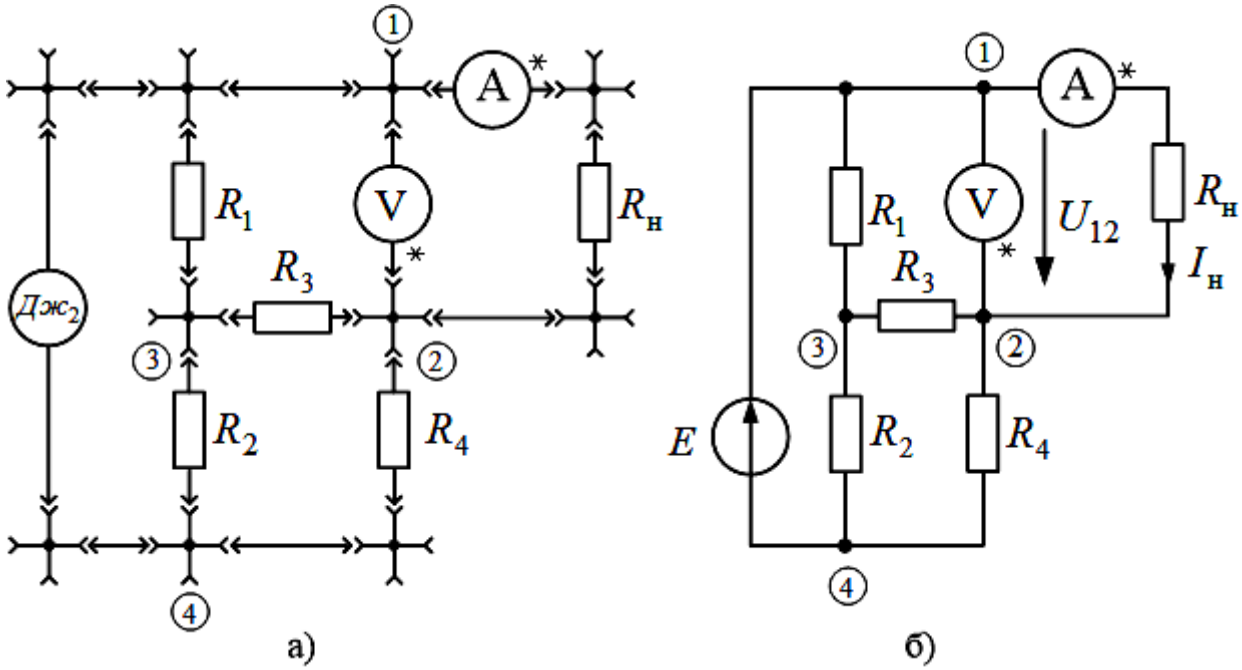


Рис. 4.7. Схема активного двополюсника, навантаженого на резистор $R_н$: монтажна (а) та заміщення (б)

Таблиця 4.3

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
$R_н$										
$U_н$										
$I_н$										
$P_н$										

4.3 Опрацювання результатів вимірювання

1. Обчислити напругу неробочого ходу на затискачах активного двополюсника ① та ② і струм короткого замикання за наданими параметрами елементів (E, R_1, R_2, R_3, R_4), з яких складений двополюсник (рис. 4.4).

Розраховані значення записати у другий рядок табл. 4.2. За цими значеннями визначити опір еквівалентного генератора і записати у другий рядок табл. 4.2. Порівняти з результатами, отриманими під час лабораторних досліджень.

2. Розрахувати вхідний опір пасивного двополюсника, який утворюється із активного заміною джерела енергії на його внутрішній опір (рис. 4.4). Порівняти отриманий результат з результатами обчислень опору еквівалентного генератора за дослідними даними та теоретичними розрахунками, записаними до табл. 4.2.

3. За даними табл. 4.2 та результатами обчислень п. 2 обробки результатів експерименту нарисувати дві схеми заміщення активного двополюсника (з ідеальним джерелом ЕРС та з ідеальним джерелом струму) і вказати параметри компонентів.

4. Упевнитись, що виміряна сила струму через навантаження в робочих режимах активного двополюсника (дані табл. 4.3) збігається з розрахованою за теоремою про активний двополюсник: $I_{\text{н}} = \dfrac{U_{\text{нх}}}{R_{\text{ег}} + R_{\text{н}}}$.

5. Побудувати навантажувальну характеристику активного двополюсника $U_{12} = f(I_{\text{н}})$, скориставшись результатами дослідів (табл. 4.3).

6. Дослідити передавання енергії від активного двополюсника до пасивного. Для цього, по-перше, за результатами досліду п. 6 робочого завдання розрахувати та записати в останній рядок табл. 4.3 значення потужностей, які споживає навантаження в різних робочих режимах ($P_{\text{н}} = U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}$). По-друге, побудувати графік залежності значення споживаної потужності від величини опору навантаження $P_{\text{н}} = f(R_{\text{н}})$.

7. Зробити і записати в протокол звіту висновки з виконаної роботи.

4.4 Запитання і завдання для самоперевірки

1. Що називають двополюсником? Пасивним двополюсником? Активним двополюсником?

2. Які ви знаєте схеми заміщення пасивного двополюсника та активного двополюсника?

3. Які двополюсники вважаються еквівалентними?

4. Які режими роботи активного двополюсника називають неробочим ходом і коротким замиканням?

5. Сформулюйте теорему про активний двополюсник.

6. Як дослідним шляхом визначити параметри елементів схеми заміщення активного двополюсника?

7. Як розрахувати вхідний опір, величину і напрямок дії еквівалентної ЕРС активного двополюсника?

8. Як змінюється потужність, що надходить у навантаження активного двополюсника, якщо величина опору навантаження зростає від нуля до нескінченості?

9. Як зміниться показ амперметра у колі, схема якого зображена на рис. 4.7, якщо послідовно з навантаженням увімкнути незалежне джерело напруги з ЕРС $E_{\text{н}} = 20(\text{В})$ за напрямом струму? Назустріч струму?

10. Побудуйте графік залежності коефіцієнта корисної дії для активного двополюсника, зображеного на рис. 4.7, від нормованого значення опору навантаження $\eta = f(R_{\text{н}}/R_{\text{ег}})$. За яких обставин коефіцієнт корисної дії наближається до 100%? Дорівнює 50%?

4.5 Дані дослідів для дистанційної форми навчання

Таблиця 4.4

№	$E = U_{14}$	R_1	R_2	R_3	R_4	$U_{нх}$	$I_{кз}$	$R_{ег} = U_{нх} / I_{кз}$
1	10	55	80	100	150	6.9	97	70
2	11	60	85	105	155	7.6	103	74
3	12	65	90	110	160	8,4	109	77
4	13	70	95	115	165	9,1	114	80
5	14	75	100	120	170	9,9	119	83
6	15	80	105	125	175	11	124	86
7	16	85	110	130	180	11	128	89
8	17	90	115	135	185	12	132	93
9	18	95	120	140	190	13	136	96
10	19	100	125	145	195	14	140	99
11	20	105	130	150	200	15	143	102
12	21	110	135	155	205	15	146	105
13	22	115	140	160	210	16	149	108
14	23	120	145	165	215	17	152	111
15	24	125	150	170	220	18	155	114
16	25	130	155	175	225	19	158	117
17	26	135	160	180	230	19	160	121
18	27	140	165	185	235	20	162	124
19	28	145	170	190	240	21	165	127
20	29	150	175	195	245	22	167	130
21	9	50	75	95	145	6,1	91	67
22	10	60	85	115	160	7	90	77
23	11	70	95	125	170	7,8	93	84
24	13	80	105	135	180	9,3	103	90
25	16	90	115	145	190	12	120	96
26	19	100	125	155	200	14	135	103
27	22	110	135	165	210	16	149	109
28	25	120	145	175	220	18	161	115
29	28	130	155	185	230	21	172	121
30	30	140	165	195	240	22	176	127

Таблиця 4.5

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$R_н$	14	28	42	56	70	105	140	175	210	245
	$U_н$	1.1	2	2.6	3	3.4	4.1	4.6	4.9	5.1	5.3
	$I_н$	81	70	61	54	49	39	33	28	24	22
	$P_н$	92	136	156	165	167	160	149	137	126	116
2	$R_н$	14.8	29.6	44.4	59.2	74	111	148	185	222	259
	$U_н$	1.3	2.2	2.9	3.4	3.8	4.6	5.1	5.4	5.7	5.9
	$I_н$	86	74	65	57	52	41	34	29	26	23
	$P_н$	110	161	185	195	197	189	175	160	147	136
3	$R_н$	15,4	30,8	46,2	61,6	77	115,5	154	192,5	231	269,5
	$U_н$	1,4	2,4	3,1	3,7	4,2	5	5,6	6	6,3	6,5
	$I_н$	91	78	68	61	54	44	36	31	27	24
	$P_н$	127	187	214	226	228	219	203	186	171	158
4	$R_н$	16	32	48	64	80	120	160	200	240	280
	$U_н$	1,5	2,6	3,4	4,1	4,6	5,5	6,1	6,5	6,9	7,1
	$I_н$	95	82	71	64	57	46	38	33	29	25
	$P_н$	145	213	245	258	261	251	232	213	196	181
5	$R_н$	16,6	33,2	49,8	66,4	83	124,5	166	207,5	249	290,5
	$U_н$	1,6	2,8	3,7	4,4	5	5,9	6,6	7,1	7,4	7,7
	$I_н$	99	85	75	66	60	48	40	34	30	27
	$P_н$	164	241	277	292	295	284	263	241	222	204
6	$R_н$	17,2	34,4	51,6	68,8	86	129	172	215	258	301
	$U_н$	1,8	3	4	4,7	5,3	6,4	7,1	7,6	8	8,3
	$I_н$	103	89	77	69	62	50	41	35	31	28
	$P_н$	183	270	310	326	331	318	294	270	249	229
7	$R_н$	17,8	35,6	53,4	71,2	89	133,5	178	222,5	267	311,5
	$U_н$	1,9	3,3	4,3	5,1	5,7	6,9	7,6	8,2	8,6	8,9
	$I_н$	107	92	80	71	64	51	43	37	32	29
	$P_н$	203	299	344	362	367	353	327	300	276	254
8	$R_н$	18,6	37,2	55,8	74,4	93	139,5	186	232,5	279	325,5
	$U_н$	2	3,5	4,6	5,5	6,1	7,4	8,2	8,8	9,2	9,5
	$I_н$	110	94	82	73	66	53	44	38	33	29
	$P_н$	225	331	379	399	404	388	359	329	303	279
9	$R_н$	19,2	38,4	57,6	76,8	96	144	192	240	288	336
	$U_н$	2,2	3,7	4,9	5,8	6,5	7,8	8,7	9,3	9,8	10
	$I_н$	113	97	85	75	68	54	45	39	34	30
	$P_н$	246	362	415	437	442	424	393	361	331	305

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	$R_н$	19,8	39,6	59,4	79,2	99	148,5	198	247,5	297	346,5
	$U_н$	2,3	3,9	5,2	6,1	6,9	8,3	9,2	9,9	10	11
	$I_н$	116	100	87	77	70	56	46	40	35	31
	$P_н$	268	393	451	475	481	462	428	393	361	332
11	$R_н$	20,4	40,8	61,2	81,6	102	153	204	255	306	357
	$U_н$	2,4	4,2	5,5	6,5	7,3	8,7	9,7	10	11	11
	$I_н$	119	102	89	79	71	57	48	41	36	32
	$P_н$	289	425	488	515	521	500	463	425	391	360
12	$R_н$	21	42	63	84	105	157,5	210	262,5	315	367,5
	$U_н$	2,6	4,4	5,8	6,8	7,7	9,2	10	11	12	12
	$I_н$	122	104	91	81	73	58	49	42	37	33
	$P_н$	312	458	526	554	561	539	499	458	421	388
13	$R_н$	21,6	43,2	64,8	86,4	108	162	216	270	324	378
	$U_н$	2,7	4,6	6	7,1	8,1	9,7	11	12	12	13
	$I_н$	124	107	93	83	75	60	50	43	37	33
	$P_н$	334	491	564	595	602	578	536	492	452	417
14	$R_н$	22,2	44,4	66,6	88,8	111	166,5	222	277,5	333	388,5
	$U_н$	2,8	4,8	6,3	7,5	8,5	10	11	12	13	13
	$I_н$	127	109	95	85	76	61	51	44	38	34
	$P_н$	357	525	603	636	644	618	573	526	483	446
15	$R_н$	22,8	45,6	68,4	91,2	114	171	228	285	342	399
	$U_н$	2,9	5	6,6	7,9	8,8	11	12	13	13	14
	$I_н$	129	111	97	86	78	62	52	44	39	35
	$P_н$	380	559	643	677	686	659	610	561	515	475
16	$R_н$	23,4	46,8	70,2	93,6	117	175,5	234	292,5	351	409,5
	$U_н$	3,1	5,3	6,9	8,2	9,2	11	12	13	14	14
	$I_н$	131	113	99	88	79	63	53	45	39	35
	$P_н$	404	594	682	719	729	700	648	596	547	505
17	$R_н$	24,2	48,4	72,6	96,8	121	181,5	242	302,5	363	423,5
	$U_н$	3,2	5,5	7,3	8,6	9,7	12	13	14	14	15
	$I_н$	133	114	100	89	80	64	53	46	40	35
	$P_н$	430	631	724	762	772	740	685	629	578	532
18	$R_н$	24,8	49,6	74,4	99,2	124	186	248	310	372	434
	$U_н$	3,4	5,7	7,5	8,9	10	12	13	14	15	16
	$I_н$	135	116	101	90	81	65	54	46	41	36
	$P_н$	454	666	765	805	815	782	724	665	610	563

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19	$R_н$	25,4	50,8	76,2	101,6	127	190,5	254	317,5	381	444,5
	$U_н$	3,5	6	7,8	9,3	10	13	14	15	16	16
	$I_н$	137	118	103	91	82	66	55	47	41	37
	$P_н$	478	702	806	849	859	824	763	701	644	593
20	$R_н$	26	52	78	104	130	195	260	325	390	455
	$U_н$	3,6	6,2	8,1	9,6	11	13	14	15	16	17
	$I_н$	139	119	104	93	83	67	56	48	42	37
	$P_н$	503	738	847	893	904	867	803	737	677	624
21	$R_н$	13,4	26,8	40,2	53,6	67	100,5	134	167,5	201	234,5
	$U_н$	1	1,7	2,3	2,7	3	3,7	4	4,4	4,6	4,7
	$I_н$	76	65	57	51	45	36	30	26	23	20
	$P_н$	77	113	130	137	139	133	123	113	104	96
22	$R_н$	15,4	30,8	46,2	61,6	77	115,5	154	192,5	231	269,5
	$U_н$	1,2	2	2,6	3,1	3,5	4,2	4,6	5	5,2	5,4
	$I_н$	75	64	56	50	45	36	30	26	23	20
	$P_н$	87	128	147	155	157	151	140	129	118	109
23	$R_н$	16,8	33,6	50,4	67,2	84	126	168	210	252	294
	$U_н$	1,3	2,2	2,9	3,5	3,9	4,7	5,2	5,6	5,8	6,1
	$I_н$	77	66	58	52	46	37	31	27	23	21
	$P_н$	101	148	170	179	181	174	161	148	136	125
24	$R_н$	18	36	54	72	90	135	180	225	270	315
	$U_н$	1,6	2,7	3,5	4,1	4,7	5,6	6,2	6,7	7	7,2
	$I_н$	86	74	65	57	52	41	34	30	26	23
	$P_н$	134	196	226	238	241	231	214	197	181	167
25	$R_н$	19,2	38,4	57,6	76,8	96	144	192	240	288	336
	$U_н$	1,9	3,3	4,3	5,1	5,8	6,9	7,7	8,3	8,7	9
	$I_н$	100	86	75	67	60	48	40	34	30	27
	$P_н$	193	283	326	343	348	334	309	284	261	241
26	$R_н$	20,6	41,2	61,8	82,4	103	154,5	206	257,5	309	360,5
	$U_н$	2,3	4	5,2	6,2	6,9	8,3	9,3	9,9	10	11
	$I_н$	113	96	84	75	67	54	45	38	34	30
	$P_н$	261	383	439	463	468	449	415	381	350	323
27	$R_н$	21,8	43,6	65,4	87,2	109	163,5	218	272,5	327	381,5
	$U_н$	2,7	4,6	6,1	7,2	8,1	9,7	11	12	12	13
	$I_н$	124	106	93	82	74	59	49	42	37	33
	$P_н$	334	490	563	593	600	576	533	489	449	414

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОСЛІДОВНОГО, ПАРАЛЕЛЬНОГО СПОЛУЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити коло однофазного змінного синусоїдного струму при послідовному та паралельному з'єднанні активних та реактивних елементів; навчитися вираховувати параметри кола і будувати за даними дослідів топографічні векторні діаграми.

5.1 Основні теоретичні положення

Змінний струм (ЕРС, напруга) – це струм (ЕРС, напруга), який змінює свою величину з часом.

Значення змінного струму (ЕРС, напруги), яке відповідає даному моменту часу, називається **миттєвими значеннями** і позначаються малими латинськими літерами *i*(*t*), *e*(*t*), *u*(*t*).

Змінний синусоїдний струм (ЕРС, напруга) – це струм (ЕРС, напруга), що змінює своє миттєве значення за синусоїдним законом.

Миттєве значення синусоїдних струму, напруги та ЕРС записується у вигляді

$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$; $u(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$; $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$

де I_m, U_m, E_m – це найбільші значення, тобто максимальні або **амплітудні значення**; f – **промислова частота** [Гц]; $\omega = 2\pi f$ – **кутова частота** [рад/с]; ψ_i, ψ_u, ψ_e - початкова фаза струму, напруги, ЕРС

В Україні промислова частота $f = 50$ Гц, тому при розрахунках необхідно враховувати кутову частоту $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с.

Величини, що змінюються синусоїдально, можна зображати аналітично (за допомогою формул), графічно (за допомогою хвильових діаграм) або векторно (за допомогою векторів, що обертаються із сталою швидкістю). Сукупність декількох векторів, що обертаються з однаковою частотою та відповідають

рівнянням електричного кола називається **векторною діаграмою**. Взаємне розташування векторів визначається їх початковими фазами.

Кут між векторами (або різниця початкових фаз) називається **кутом зсуву фаз**. **Зсув фаз** між напругою та струмом позначається $\varphi = \psi_u - \psi_i$. Зсув фаз не змінюється при обертанні векторів та визначає характер кола. φ може бути додатним, від'ємним або дорівнювати нулю.

Векторні діаграми слугують для полегшення додавання синусоїдних величин, оскільки алгебраїчне додавання миттєвих значень, що змінюються, досить важке. Крім того, векторна діаграми наглядно зображує кут зсуву фаз. Напрям кутової частоти ω завжди позначають проти ходу годинникової стрілки. Початкові фази позначають від осі «х» до вектора. Якщо початкова фаза додатна, то її напрям повинен збігатись із напрямом ω, якщо від'ємна – проти напряму ω. На векторній діаграмі кут φ позначають від вектору струму до вектору напруги (рис.1).

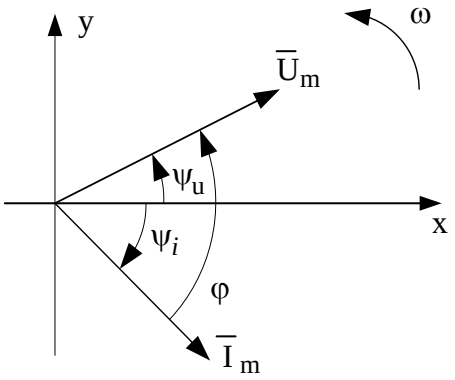


Рис. 5.1

Електротехнічні прилади, що використовуються для виміру у колах синусоїдального струму, відградуйовані у діючих значеннях. **Діючі значення** струму, напруги та ЕРС позначаються великими друкованими літерами (I, U, E) та зв'язані із амплітудою наступним співвідношенням:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m; \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m$$

Наприклад, якщо амперметр показав 0,75 А, це означає, що амплітуда струму $I_m = I \cdot \sqrt{2} = 0.75 \cdot \sqrt{2} = 1.061$ А. Діючими значеннями електричних величин користуються також при розрахунках електричних кіл змінного струму.

Діючі значення частіше використовують на векторних діаграмах. При цьому довжина вектору дорівнює не амплітуді, а діючому значенню струму, напруги та ЕРС. В цьому випадку обертання векторів не має значення і вони розглядаються як нерухомі. Тоді важливо знати лише взаємне їх розташування. Якщо не враховувати початкову фазу, то один із векторів, що приймається за опорний, розташовується вертикально або горизонтально, а потім зображуються останні вектори – під відповідним кутом до початкового (рис. 5.2).

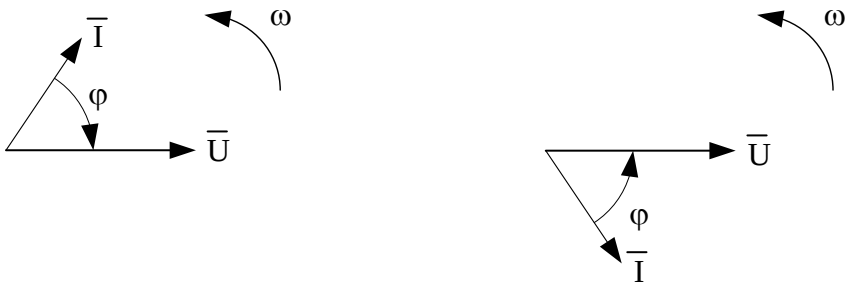
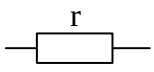


Рис. 5.2

Якщо напрям φ збігається з напрямом ω, то кут φ вважають додатним, якщо не збігається – від'ємним.

Електричні кола синусоїдного струму можуть містити резистивні, індуктивні та ємнісні елементи.

1. Резистивний елемент (резистор) враховує безповоротне перетворення електричної енергії в інші види енергії. Опір резистивного елементу називається *активним опором* та позначається *R*. Одиниця виміру [Ом].

   Умовно-графічне позначення 

2. Індуктивний елемент (котушка індуктивності) враховує наявність магнітного поля, що збуджує в електричному колі ЕРС. Опір

індуктивного елементу називається *індуктивним опором* та позначається $X_L = \omega \cdot L$. Одиниці виміру [Ом].

Умовно-графічне позначення

3. Ємнісний елемент (конденсатор) враховує наявність електричного поля, тобто здатність накопичувати електричні заряди. Опір ємнісного елементу називається *ємнісним опором* та позначається $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ Одиниці виміру [Ом].

Умовно-графічне позначення

Індуктивний та ємнісний опір називаються **реактивними**.

Вивчення методу векторних діаграм необхідно починати з розгляду окремих електричних кіл, що містять окремі елементи *R, L* та *C.*

Струм, що протікає через активний елемент *R,* збігається по фазі із прикладеною до нього напругою: $\psi_u - \psi_i = 0$ (рис. 5.3).

Струм, що протікає через індуктивність *L,* відстає по фазі від прикладеної до неї напруги на кут $\frac{\pi}{2}$: $\psi_u - \psi_i = 90^0$ (рис. 5.4).

Струм, що протікає через ємність *C* випереджає по фазі прикладену до неї напругу на кут $\frac{\pi}{2}$: $\psi_u - \psi_i = -90^0$ (рис. 5.5).

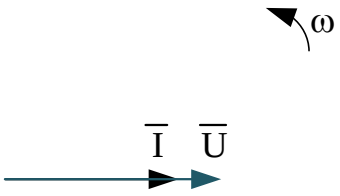


Рис. 5.3

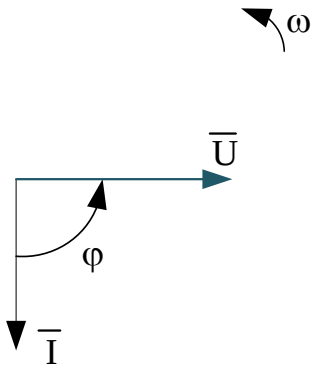


Рис. 5.4

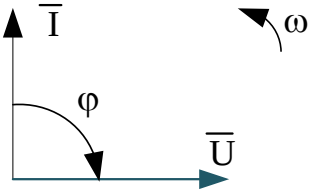


Рис. 5.5

Амплітудні та діючі значення струмів для кіл, що характеризуються одним параметром зв’язані законом Ома:

$$I_{m\,R} = \frac{U_{m\,R}}{R};\quad I_R = \frac{U_R}{R}$$

$$I_{m\,L} = \frac{U_{m\,L}}{X_L};\quad I_L = \frac{U_L}{X_L}$$

$$I_{m\,C} = \frac{U_{m\,C}}{X_C};\quad I_C = \frac{U_C}{X_C}$$

Послідовне з'єднання *R, L* та *C* елементів (рис. 5.6).

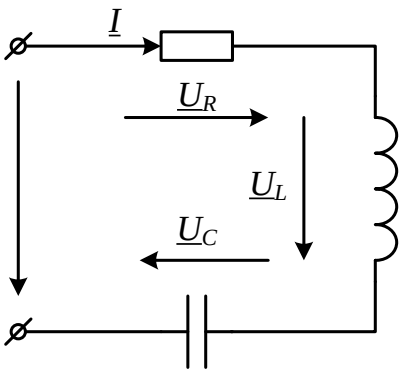


Рис. 5.6

При розгляді кіл з послідовним з'єднанням *R, L* та *C* елементів можна записати ІІ закон Кірхгофа для миттєвих значень $u = u_R + u_L + u_C$ або ІІ закон Кірхгофа у векторній формі для діючих значень $\overline{U} = \overline{U_R} + \overline{U_L} + \overline{U_C}$.

Побудову векторних діаграм, для кіл з послідовним з'єднанням, необхідно починати із вектору струму. Далі зображати вектори падінь напруги під відповідними кутами, які, для побудови вектору прикладеної до кола напруги, необхідно додати (рис. 5.7).

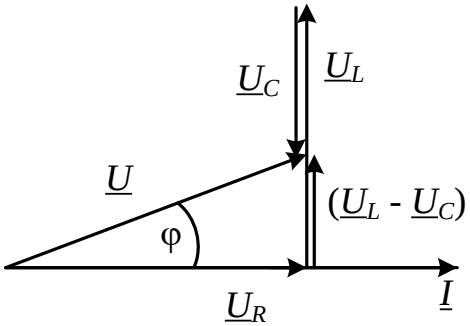


Рис. 5.7

Для розрахунку кола з послідовно з'єднаними елементами необхідно знати основні формули та їх застосування.

Повний опір кола змінного струму

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

де R – активний опір, $X = X_L - X_C$ – реактивний опір.

Закон Ома кола змінного струму

$$I = \frac{U}{Z}$$

Із векторної діаграми послідовного з'єднання R, L та C елементів можна виділити прямокутний трикутник (рис. 5.8) сторонами якого будуть: напруга на активному опорі – активна напруга U_a, різниця напруг на реактивних елементах – реактивна напруга $U_p = U_L - U_C$ та повна напруга U.

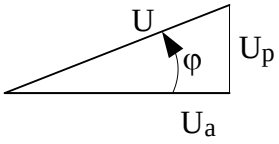


Рис. 5.8

Співвідношення у трикутнику напруг:

$$U_a = U\cos\varphi;\ U_p = U\sin\varphi;\ \ U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2};$$

Якщо всі сторони трикутника напруг розділити на струм, отримаємо трикутник опорів (рис. 5.9), сторонами якого будуть активний опір R, реактивний опір $X = X_L - X_C$ та повний опір Z.

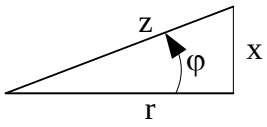


Рис. 5.9

Співвідношення у трикутнику опорів:

$$R = Z\cos\varphi;\ X = X_L - X_C = Z\sin\varphi;\ \ Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

Якщо всі сторони трикутника напруг помножити на струм, отримаємо трикутник потужності (рис. 5.10), сторонами якого будуть:

активна потужність $P = U_r I = I^2 R$ *[Вт],*

реактивна потужність $Q = Q_L - Q_C = I^2 x$ *[Вар]*, яка має дві складові:

реактивну індуктивну потужність $Q_L = U_L I = I^2 X_L$ та

реактивну ємнісну потужність $Q_\text{C} = U_\text{C} I = I^2 X_\text{C}$

повна потужність $S = UI = I^2 Z$ [BA].

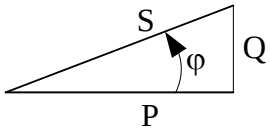


Рис. 5.10

Співвідношення у трикутнику потужності:

$$P = UI\cos\varphi = S\cos\varphi;\ Q = Q_L - Q_C = UI\sin\varphi = S\sin\varphi;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2};$$

Кут зсуву по фазі φ можна визначити із кожного трикутника як:

$$\varphi = \text{arctg}\frac{U_p}{U_a} = \text{arctg}\frac{U_L - U_C}{U_r} = \text{arctg}\frac{X}{R} = \text{arctg}\frac{X_L - X_C}{R} = \text{arctg}\frac{Q}{P} = arctg\frac{Q_L - Q_C}{P}$$

Для визначення характеру кола в послідовному з'єднанні *R, L* та *C* елементів потрібно встановити знак кута зсуву фаз φ.

Якщо у колі присутні тільки активні опори, то кут зсуву фаз $\varphi = 0^0$ і характер кола буде мати активний характер.

Якщо у колі присутні тільки індуктивні опори, то кут зсуву фаз $\varphi = 90^0$ і характер кола буде мати індуктивний характер.

Якщо у колі присутні тільки ємнісні опори, то кут зсуву фаз $\varphi = -90^0$ і характер кола буде мати ємнісний характер.

Якщо у послідовному з'єднані присутні активні та реактивні елементи, для визначення знаку кута зсуву фаз потрібно визначити знак реактивного опору *x* за формулою $X = X_L - X_C$. Оскільки функція arctg є парною, то знак кута зсуву фаз φ буде повторювати знак реактивного опору *X*.

Якщо зсув фаз має додатне значення ($0 < \varphi < 90^0$), то характер кола буде активно-індуктивним, тобто послідовне з'єднання *R, L* та *C* елементів можна замінити еквівалентною схемою заміщення (рис. 5.11)

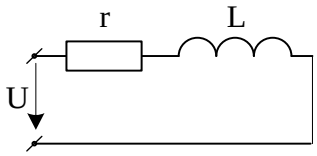


Рис. 5.11

Якщо зсув фаз має від'ємне значення ($-90^0 < \varphi < 0^0$), то характер кола буде активно-ємнісним, тобто послідовне з'єднання *R, L* та *C* елементів можна замінити еквівалентною схемою заміщення (рис. 5.12)

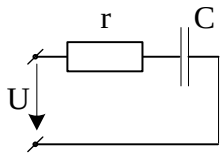


Рис. 5.12

Розрахунок електрообладнання виконують у відповідності до діючих напруг та струмів, тобто на повну потужність. Але використання обладнання характеризується активною потужністю $P = UI\cos\varphi$. Множник $\cos\varphi$ називається **коефіцієнтом потужності**.

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{P}{S}$$

Він має велике практичне значення, оскільки показує яка частина повної потужності є активною. Чим вище $\cos\varphi$, тим більш економічно використовується електротехнічне обладнання.

Паралельне з'єднання *R, L* та *C* елементів (рис. 5.13).

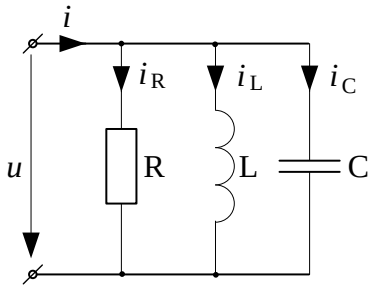


Рис. 5.13

Розрахунок паралельного з'єднання прийнято проводити через провідності елементів.

g [См] – активна провідність

$b = b_L - b_C$ [См] – реактивна провідність, де

$b_L = \frac{1}{\omega L}$ – індуктивна провідність

$b_C = \omega C$ – ємнісна провідність

y [См] – повна провідність

Повна провідність *y* є величиною оберненою до повного опору *z*.

$$y = \frac{1}{z}$$

Струм нерозгалуженої частини паралельного з'єднання можна визначити за законом Ома:

$$I = Uy$$

Струми у гілках (рис. 5.13) можуть бути розраховані за формулами:

$$I_R = U \cdot g; \quad I_L = U \cdot b_L; \quad I_C = U \cdot b_C$$

Векторна діаграма для паралельного з'єднання (рис. 5.14) за умови, що $b_L > b_C$ (рис.13)

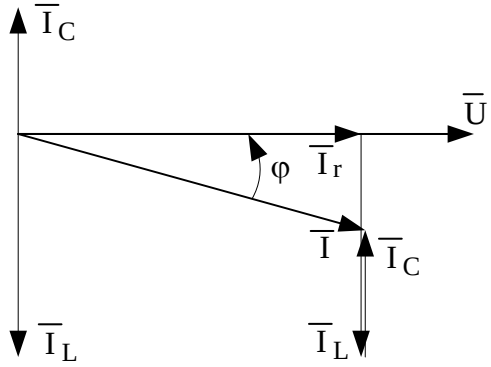


Рис. 5.14

Із векторної діаграми паралельного з'єднання (рис. 5.14) можна виділити прямокутний трикутник (рис. 5.15), сторонами якого будуть: струм через активний елемент – активний струм I_a, різниця струмів через реактивні елементи – реактивний струм $I_p = I_L - I_C$ та повний струм I.

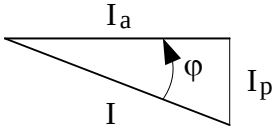


Рис. 5.15

Співвідношення у трикутнику струмів:

$$I_a = I\cos\varphi;\ I_p = I\sin\varphi;\ \ I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2};$$

Якщо всі сторони трикутника струмів (рис. 5.15) розділити на напругу, отримаємо трикутник провідності (рис. 5.16), сторонами якого будуть активна провідність g, реактивна провідність $b = b_L - b_C$, та повна провідність y.

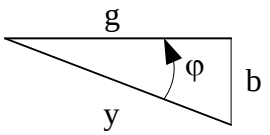


Рис. 5.16

Співвідношення у трикутнику провідності:

$$g = y\cos\varphi;\ b = b_L - b_C = y\sin\varphi;\ \ y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}$$

Кут зсуву по фазі φ можна визначити із кожного трикутника як:

$$\varphi = \text{arctg}\frac{I_p}{I_a} = \text{arctg}\frac{I_L - I_C}{I_r} = \text{arctg}\frac{b}{g} = \text{arctg}\frac{b_L - b_C}{g}$$

5.2 Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з вимірювальними приладами та апаратами, які застосовують у роботі. Записати їх паспортні данні в таблицю 5.1.

Для дистанційного навчання табл. 5.1 не потребує заповнення

Таблиця 5.1

№	Прилади	Позначення в схемі	Вимірювальний механізм або тип	Клас точності	Межа вимірювання або номінальні параметри	Кількість поділок у шкалі	Ціна поділки приладу

2. До джерела змінного однофазного синусоїдного струму приєднати резистор, що характеризується активним опором *r*, відповідно до рис. 5.17. Провести вимірювання величин відповідно до таблиці 5.2.

Для дистанційної форми навчання, значення величин записати із табл. 5.11 у відповідності з варіантом.

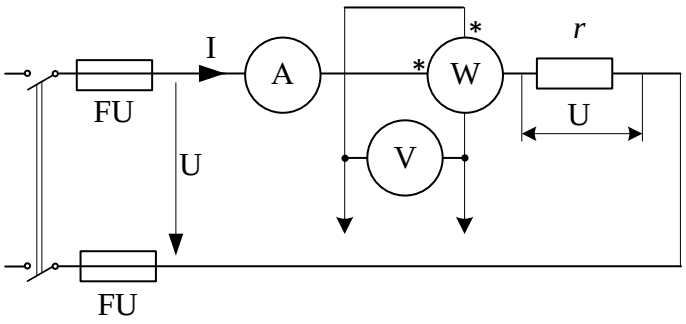


Рис. 5.17

Таблиця 5.2

Дані вимірювань			Результати обчислень		
I	**U**	**P**	**r**	**cos φ**	**φ**
А	*В*	*Вт*	*Ом*	*в.о.*	*градуси*
Характер кола:					

3. До джерела змінного однофазного синусоїдного струму приєднати котушку індуктивності, яка характеризується активним опором $r_к$ та індуктивним опором X_L, відповідно до рис. 5.18. Провести вимірювання величин відповідно до табл. 5.3.

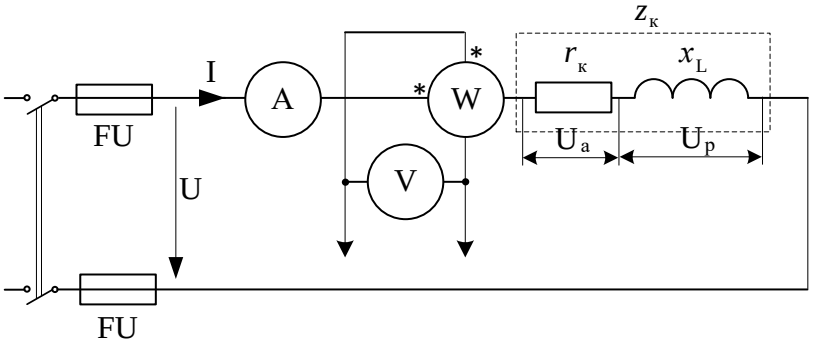


Рис. 5.18

Для дистанційної форми навчання, значення величин записати із табл. 5.12 у відповідності з варіантом.

Таблиця 5.3

Дані вимірювань							
I		**U**			**P**		
A		*B*			*Вт*		
Результати обчислень							
$\cos\varphi_к$	φ	$z_к$	$r_к$	x_L	**L**	U_a	U_p
в.о.	*градуси*	*Ом*			*Гн*	*В*	
Характер кола:							

4. До джерела змінного однофазного синусоїдного струму приєднати конденсатор, який характеризується активним опором $r_{кон}$ та ємнісним опором X_C, відповідно до рис.3.3. Провести вимірювання величин відповідно до табл. 5.4.

Для дистанційної форми навчання значення величин записати із табл. 5.13 у відповідності з варіантом.

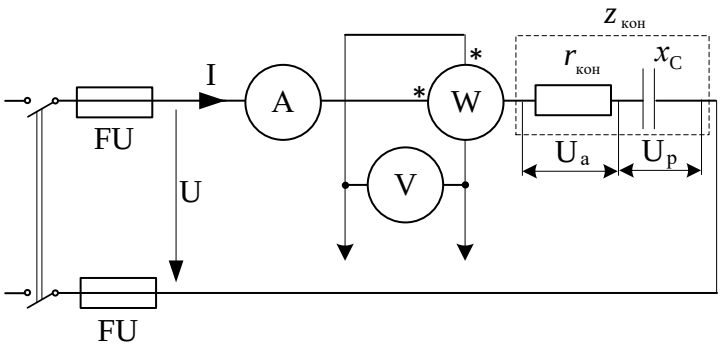


Рис. 5.19

Таблиця 5.4

Дані вимірювань							
I		**U**			**P**		
A		*B*			*Bm*		
Результати обчислень							
$\cos\varphi_{кон}$	$\varphi_{кон}$	$z_{кон}$	$r_{кон}$	x_C	**C**	U_a	U_p
в.о	*градуси*	*Ом*			*мкФ*	*B*	
Характер кола:							

5. Послідовне з’єднання двох резисторів, рис. 5.20, утворити приєднанням додаткового резистору, що характеризується активним опором $r_{дод}$, до схеми рис. 5.17. Провести вимірювання величин відповідно до таблиці 5.5.

Для дистанційної форми навчання, значення величин записати з табл. 5.14 у відповідності з варіантом.

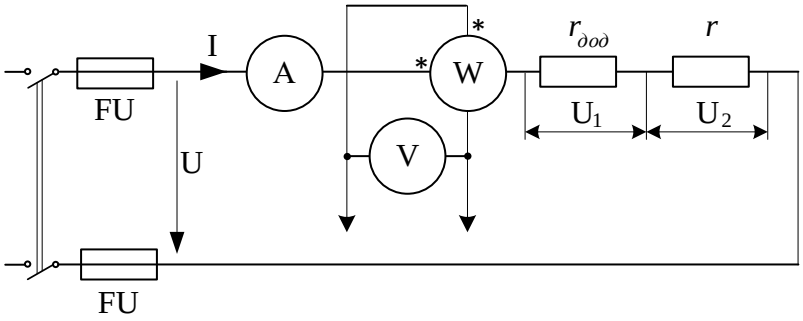


Рис. 5.20

Таблиця 5.5

Результати вимірювань						
I	U	U_1	U_2	P	P_1	P_2
A	*B*			*Bm*		

Результати обчислень			
$r_{екв}$	$r_{дод}$	r	$\cos\varphi$
Ом			*в.о.*

6. Послідовне з'єднання резистора та котушки індуктивності, рис. 5.21, утворити приєднанням додаткового резистору, що характеризується активним опором $r_{дод}$ до схеми рис. 5.18. Провести вимірювання величин відповідно до таблиці 5.6.

Для дистанційної форми навчання значення величин записати із табл. 5.15 у відповідності з варіантом.

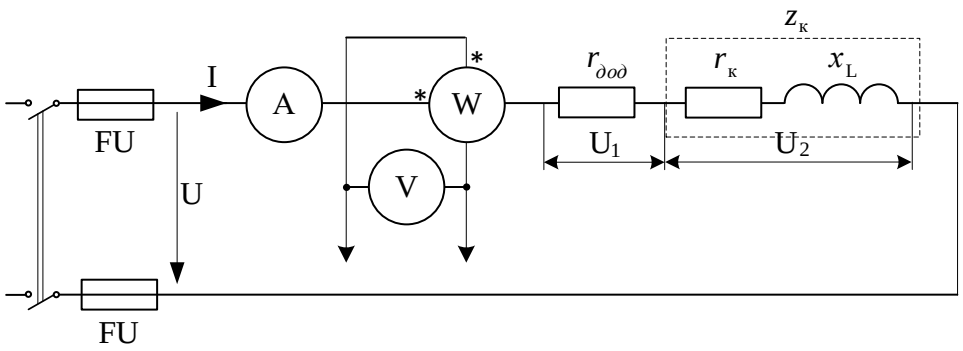


Рис. 5.21

Таблиця 5.6

Дані вимірювань						
I	**U**	**U_1**	**U_2**	**P**	**P_1**	**P_2**
A	*B*			*Bm*		

Результати обчислень					
cos φ	**φ**	**z**	**r**	**U_a**	**U_p**
д/од	*градуси*	*Ом*		*B*	
Характер кола:					

7. Послідовне з’єднання резистора та конденсатора, рис. 5.22, утворити приєднанням додаткового резистору, що характеризується активним опором $r_{\text{дод}}$ до схеми рис. 5.19. Провести вимірювання величин відповідно до табл. 5.7.

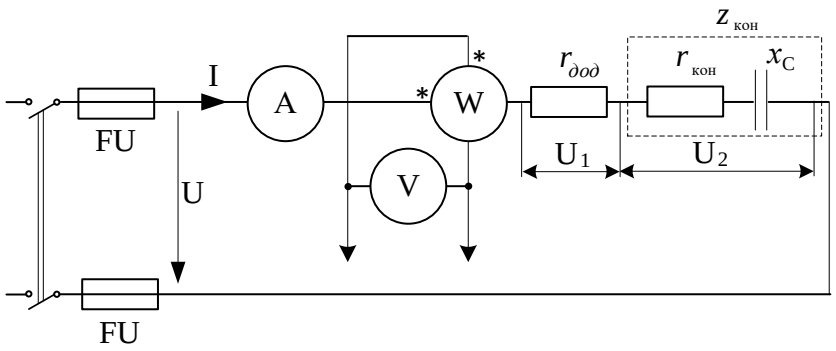


Рис. 5.22

Для дистанційної форм навчання значення величин записати із табл. 5.16 у відповідності з варіантом.

Таблиця 5.7

Результати вимірювань						
$\boldsymbol{I}$	$\boldsymbol{U}$	$\boldsymbol{U_1}$	$\boldsymbol{U_2}$	$\boldsymbol{P}$	$\boldsymbol{P_1}$	$\boldsymbol{P_2}$
А	В			Вт		

Результати обчислень							
Конденсатор		Все коло					
$\boldsymbol{x_C}$	$\boldsymbol{C}$	$\boldsymbol{\cos\varphi}$	$\boldsymbol{\varphi}$	$\boldsymbol{z}$	$\boldsymbol{r}$	$\boldsymbol{U_a}$	$\boldsymbol{U_p}$
Ом	мкФ	в.о.	градуси	Ом		В	

8. До джерела змінного однофазного синусоїдного струму приєднати паралельно два резистори, що характеризуються активними провідностями g_1 і g_2, відповідно до рис. 5.23. Провести вимірювання величин відповідно до таблиці 5.8.

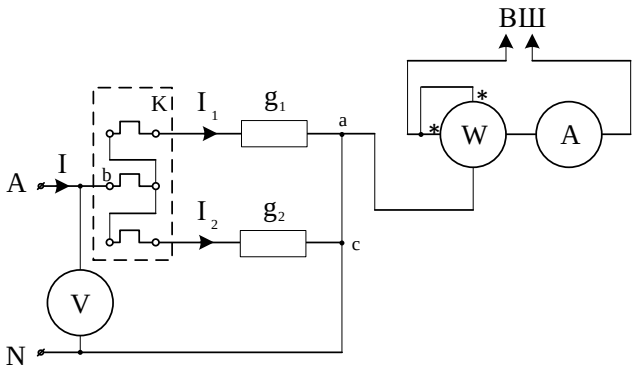


Рис. 5.23

Таблиця 5.8

Результати вимірювань						
U	I	I_1	I_2	P	P_1	P_2
В	*А*			*Вт*		

Результати обчислень								
g	g_1	g_2	$\cos\varphi$	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	φ	φ_1	φ_2
См			*в.о.*			*градуси*		

Для дистанційної форми навчання, значення величин записати із табл. 5.17 у відповідності із варіантом.

9. Паралельне з’єднання резистору та котушки індуктивності, рис. 5.24, утворити заміною другого резистору на схемі рис. 5.23 котушкою індуктивності, що характеризується активною провідністю $g_к$ та індуктивною провідністю $b_к$. Провести вимірювання величин відповідно до таблиці 5.9.

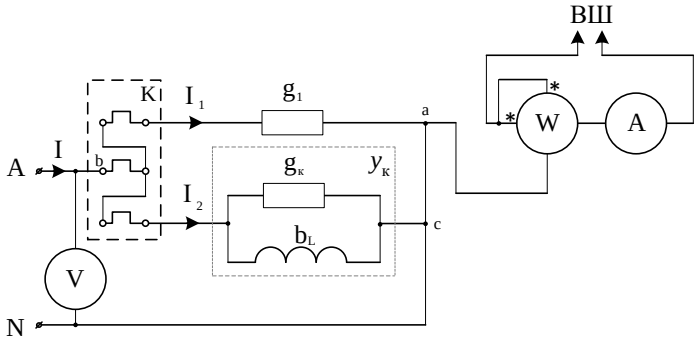


Рис. 5.24

Таблиця 5.9

Результати вимірювань						
U	I	I_1	I_2	P	P_1	P_2
В	А			Вт		
Результати обчислень						
Котушка індуктивності						
$\cos\varphi_к$	$\varphi_к$	$y_к$		$g_к$	$b_к$	L
в.о.	градуси	См				Гн
Все коло						
$\cos\varphi$	φ	y		g	I_a	I_p
в.о.	градуси	См			А	

Для дистанційної форми навчання, значення величин записати із табл. 5.18 у відповідності із варіантом.

10. Паралельне з’єднання резистору та конденсатору, рис. 5.25, утворити заміною котушки індуктивності на схемі рис. 5.24 конденсатором, що характеризується активною провідністю $g_{кон}$ та індуктивною провідністю b_C. Провести вимірювання величин відповідно до таблиці 5.10.

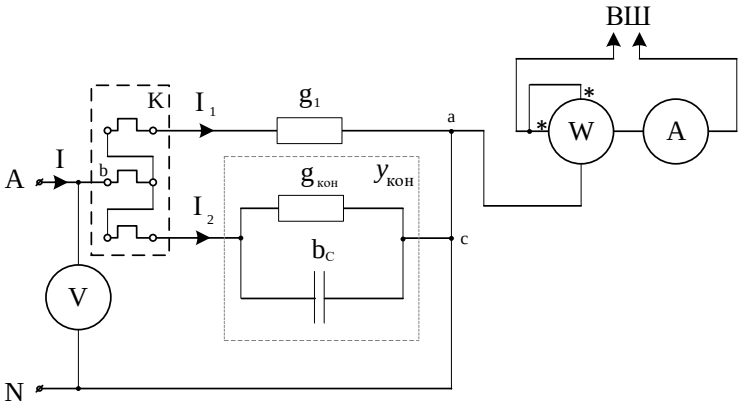


Рис. 5.25

Для дистанційної форми навчання, значення величин записати із табл. 5.19 у відповідності із варіантом.

Таблиця 5.10

Результати вимірювань						
U	I	I_1	I_2	P	P_1	P_2
В	А			Вт		
Результати обчислень						
Конденсатор						
$\cos\varphi_{кон}$	$\varphi_{кон}$	$y_к$	$g_к$	b_C	C	
в.о	градуси	См			мкФ	
Все коло						
$\cos\varphi$	φ	y	g	I_a	I_p	
в.о	градуси	См		А		

5.3 Опрацювання результатів вимірювання

1. Виконати необхідні розрахунки в табл. 5.1 – 5.10 «Результати вимірювань». Знак кута зсуву фаз визначити із формули $\varphi = \text{arctg}\frac{X_L - X_C}{r}$

2. Побудувати векторні топографічні діаграми для схем рис. 5.17 – 5.19. На діаграмах позначити вектори активної та реактивної складової напруги.

3. Побудувати векторні топографічні діаграми для послідовного з'єднання елементів, схеми рис. 5.20 – 5.22. Значення та знак кута зсуву фаз для котушки індуктивності та конденсатора взяти із розрахунків табл. 5.3 та табл. 5.4. На діаграмах позначити вектори активної та реактивної складової напруги.

4. Перевірити побудовані вектори активної та реактивної складової напруги із розрахунковими значеннями табл. 5.3 – 5.7.

5. Вектор повної напруги $\vec{U}$ для схем рис. 5.18 та рис. 5.19, будувати як векторну суму двох складових $\overrightarrow{U_1}$ та $\overrightarrow{U_2}$, після чого перевірити виміряне значення повної напруги в табл. 5.6 та табл. 5.7.

6. Побудувати векторні топографічні діаграми за даними табл. 5.8 – 5.10.

7. На діаграмах показати активну та реактивну складові струму нерозгалуженої частини кола для схем рис. 5.24 та рис. 5.25. Перевірити відповідність побудови розрахунковим даним табл. 5.9 та табл. 5.10.

8. Вектор струму нерозгалуженої частини кола $\vec{I}$ для схем рис. 5.24 та рис. 5.25, будувати як векторну суму двох складових $\overrightarrow{I_1}$ та $\overrightarrow{I_2}$, після чого перевірити виміряне значення повної напруги в табл. 5.9 та табл. 5.10.

5.4 Запитання і завдання для самоперевірки

1 Які величини використовують для характеристики синусоїдних струмів і напруг?

2 Від чого залежить кут зсуву фаз між струмом і напругою на пасивній ділянці електричного кола?

3 Як залежить від частоти опір реактивних елементів?

4 Які співвідношення мають місце між активними, реактивними і повними опорами, а також між активними, реактивними і повними провідностями?

5 Для яких цілей використовуються і яким чином будуються суміщені векторні діаграми струмів та напруг електричного кола?

6 Яким фізичним процесам відповідають активна, реактивна і повна потужності електричного кола? Як складається баланс потужностей?

7 Використовуючи результати дослідів показати, як виконується перший закон Кірхгофа для дійсних значень напруг.

8 Записати формули миттєвого значення напруг та струмів для схем рис. 5.20 – рис. 5.25.

9 Пояснити, як можливо визначити знак кута φ при розрахунках.

5.5 Дані дослідів

для дистанційної форми навчання

Таблиця 5.11

№ вар	*I* *A*	*U* *B*	*P* *Вт*	№ вар	*I* *A*	*U* *B*	*P* *Вт*
1	0,365	220	80,399	**18**	0,381	220	83,737
2	0,361		79,344	**19**	0,383		84,321
3	0,357		78,571	**20**	0,363		79,868
4	0,354		77,814	**21**	0,358		78,827
5	0,35		77,07	**22**	0,355		78,065
6	0,368		80,936	**23**	0,351		77,316
7	0,372		81,757	**24**	0,37		81,481
8	0,375		82,594	**25**	0,374		82,313
9	0,379		83,448	**26**	0,378		83,162
10	0,364		80,132	**27**	0,385		84,615
11	0,359		79,085	**28**	0,386		84,912
12	0,356		78,317	**29**	0,382		84,028
13	0,353		77,564	**30**	0,362		79,605
14	0,349		76,825	**31**	0,348		76,582
15	0,369		81,208	**32**	0,385		84,615
16	0,373		82,034	**33**	0,347		76,314
17	0,377		82,877	**34**	0,346		84,912

Таблиця 5.12

№ вар	*I* *A*	*U* *B*	*P* *Вт*	№ вар	*I* *A*	*U* *B*	*P* *Вт*
1	0,507	220	27,052	**18**	0,691	220	24,747
2	0,515		26,976	**19**	0,685		23,797
3	0,524		26,893	**20**	0,672		22,64
4	0,533		26,805	**21**	0,66		21,525
5	0,542		26,709	**22**	0,647		21,794
6	0,551		26,608	**23**	0,634		22,05
7	0,561		26,499	**24**	0,622		22,294
8	0,571		26,383	**25**	0,611		22,526

9	0,581	220	26,26	**26**	0,6	220	22,748
10	0,591		26,128	**27**	0,589		22,958
11	0,602		25,989	**28**	0,579		23,158
12	0,614		25,841	**29**	0,569		23,349
13	0,625		26,684	**30**	0,559		23,53
14	0,638		25,517	**31**	0,549		23,702
15	0,65		25,34	**32**	0,54		23,865
16	0,663		25,154	**33**	0,531		24,021
17	0,677		24,956	**34**	0,523		24,168

Таблиця 5.13

№ вар	***I*** *A*	***U*** *B*	***P*** *Вт*	**№ вар**	***I*** *A*	***U*** *B*	***P*** *Вт*
1	0,553	220	4,252	**18**	0,47	220	3,264
2	0,518		3,964	**19**	0,435		3,005
3	0,484		3,678	**20**	0,401		2,749
4	0,449		3,396	**21**	0,366		2,496
5	0,414		3,116	**22**	0,332		2,246
6	0,38		2,84	**23**	0,532		3,579
7	0,345		2,567	**24**	0,497		3,325
8	0,311		2,296	**25**	0,463		3,074
9	0,546		4,008	**26**	0,423		2,995
10	0,511		3,732	**27**	0,394		2,736
11	0,477		3,458	**28**	0,359		2,48
12	0,442		3,188	**29**	0,325		2,228
13	0,408		2,921	**30**	0,525		2,579
14	0,373		2,658	**31**	0,49		3,322
15	0,338		2,397	**32**	0,456		3,068
16	0,539		3,791	**33**	0,421		2,817
17	0,504		3,526	**34**	0,387		2,569

Таблиця 5.14

№ вар	Показ амперметра	Показ вольтметра			Показ ватметра		
	I	U	U_1	U_2	P	P_1	P_2
	A	*B*			*Bm*		
1	0,2	220	99,819	120,181	43,92	19,927	23,993
2	0,198		99,099	120,901	43,604	19,641	23,962
3	0,197		98,566	121,434	43,369	19,431	23,939
4	0,196		98,039	121,961	43,137	19,223	23,914
5	0,195		97,518	122,482	42,908	19,019	23,888
6	0,2		100,182	119,818	44,08	20,073	24,007
7	0,201		100,733	119,267	44,322	20,294	24,028
8	0,203		101,289	118,711	44,567	20,519	24,048
9	0,204		101,852	118,148	44,815	20,748	24,067
10	0,199		99,638	120,362	43,841	19,855	23,985
11	0,198		98,921	121,079	43,525	19,571	23,955
12	0,197		98,39	121,61	43,292	19,361	23,93
13	0,196		97,865	122,135	43,06	19,155	23,905
14	0,195		97,345	122,655	42,832	18,952	23,88
15	0,201		100,365	119,635	44,161	20,146	24,014
16	0,202		100,917	119,083	44,404	20,369	24,035
17	0,203		101,476	118,524	44,649	20,595	25,055
18	0,204		102,041	117,959	44,898	20,825	24,073
19	0,205		101,421	117,579	45,065	20,98	24,085
20	0,199		99,458	120,542	43,761	19,784	23,978
21	0,197		98,743	121,257	43,447	19,5	23,947
22	0,196		98,214	121,786	43,214	19,292	23,922
23	0,195		97,691	122,309	42,984	19,087	23,897
24	0,201		100,548	119,452	44,241	20,22	24,021
25	0,202		101,103	118,897	44,485	20,444	24,042
26	0,203		101,664	118,336	44,732	20,671	24,061
27	0,205		102,612	117,388	45,149	21,058	24,091
28	0,206		102,804	117,196	45,234	21,137	24,096
29	0,204		102,23	117,77	44,981	20,902	24,079
30	0,199		99,278	120,722	43,682	19,712	23,97
31	0,194		97,173	122,827	42,756	18,885	23,871
32	0,205		102,612	117,388	45,149	21,058	24,091
33	0,194		97,002	122,998	42,681	18,819	23,862
34	0,206		102,804	117,196	45,234	21,137	24,096

Таблиця 5.15

№ вар	Показ амперметра	Показ вольтметра			Показ ватметра		
	I	U	U_1	U_2	P	P_1	P_2
	A	*B*			*Bm*		
1	0,298	220	149,203	129,487	53,895	44,523	9,372
2	0,301		150,545	128,552	54,538	45,328	9,211
3	0,304		151,898	127,596	55,192	46,146	9,046
4	0,307		153,262	126,618	55,857	46,978	8,879
5	0,309		154,635	125,618	56,532	47,824	8,708
6	0,312		156,018	124,595	57,218	48,684	8,534
7	0,315		157,411	123,549	57,914	49,557	8,357
8	0,318		158,814	122,479	58,621	50,443	8,177
9	0,32		160,224	121,384	59,338	51,344	7,994
10	0,323		161,644	120,264	60,065	52,257	7,808
11	0,326		163,07	119,118	60,803	23,184	7,619
12	0,329		164,505	117,945	61,551	54,124	7,427
13	0,332		165,946	116,745	62,309	55,076	7,233
14	0,335		167,393	115,518	63,076	56,041	7,035
15	0,338		168,846	114,261	63,853	57,018	6,835
16	0,341		170,303	112,976	64,64	58,006	6,633
17	0,344		171,765	111,661	65,435	59,006	6,429
18	0,346		173,23	110,315	66,239	60,017	6,222
19	0,346		173,057	111,219	65,979	59,897	6,082
20	0,345		172,343	112,867	65,363	59,404	5,959
21	0,343		171,636	114,501	64,748	58,918	5,831
22	0,34		170,171	115,776	63,956	57,92	6,036
23	0,337		168,722	117,022	63,173	56,934	6,239
24	0,335		167,272	118,239	62,4	55,96	6,44
25	0,332		165,828	119,427	61,636	54,998	6,638
26	0,329		164,39	120,588	60,883	54,048	6,834
27	0,326		162,96	121,722	60,14	53,112	7,028
28	0,323		161,536	122,83	59,407	52,188	7,219
29	0,32		160,121	123,911	58,684	51,277	7,407
30	0,317		158,714	124,97	57,973	50,38	7,592
31	0,315		157,316	126,003	57,272	49,497	7,775
32	0,312		155,928	127,012	56,581	48,627	7,955
33	0,309		154,549	127,999	55,902	47,77	8,131
34	0,306		153,18	128,963	55,233	46,928	8,305

Таблиця 5.16

№ вар	Показ амперметра	Показ вольтметра			Показ ватметра		
	I	U	U_1	U_2	P	P_1	P_2
	A	*B*			*Bm*		
1	0,338	220	169,244	134,762	58,883	57,287	1,596
2	0,33		164,876	140,036	55,974	54,368	1,606
3	0,32		159,983	145,584	52,8	51,189	1,611
4	0,309		154,495	151,404	49,345	47,737	1,608
5	0,297		148,335	157,48	45,603	44,006	1,597
6	0,283		141,42	163,787	41,573	39,999	1,574
7	0,267		133,664	70,283	37,27	35,732	1,538
8	0,25		124,977	176,906	32,723	31,239	1,485
9	0,337		168,537	135,891	58,338	56,809	1,529
10	0,328		164,067	141,224	55,374	53,836	1,538
11	0,318		159,058	146,833	52,14	50,599	1,541
12	0,307		153,438	152,71	48,623	47,087	1,536
13	0,294		147,13	158,84	44,817	43,294	1,523
14	0,28		140,047	165,192	40,725	39,227	1,498
15	0,264		132,104	171,722	36,363	34,903	1,46
16	0,336		167,794	137,02	57,78	56,31	1,471
17	0,326		163,22	142,413	54,759	53,282	1,478
18	0,16		158,092	148,081	51,465	49,986	1,479
19	0,305		152,338	154,014	47,886	46,414	1,473
20	0,292		145,877	160,195	44,018	42,56	1,458
21	0,277		138,624	166,59	39,864	38,433	1,431
22	0,261		130,49	173,15	35,447	34,056	1,391
23	0,334		167,031	138,163	57,211	55,799	1,412
24	0,325		162,35	143,616	54,132	52,715	1,417
25	0,314		157,101	149,342	50,778	49,361	1,416
26	0,302		151,072	155,2	47,136	45,645	1,49
27	0,289		144,461	161,425	43,211	71,738	1,473
28	0,274		137,041	167,857	39,004	37,56	1,444
29	0,257		128,723	174,442	34,54	33,139	1,4
30	0,332		166,101	139,203	56,612	55,179	1,433
31	0,323		161,313	144,709	53,481	52,044	1,437
32	0,312		155,942	150,488	50,071	48,636	1,436
33	0,3		149,912	156,526	46,373	44,947	1,426
34	0,286		143,141	162,8	42,386	40,979	1,407

Таблиця 5.17

№ вар	U	I	I_1	I_2	P	P_1	P_2
	В	*А*			*Вт*		
1	220	0,789	0,365	0,423	173,476	80,399	93,077
2		0,785	0,361	0,424	172,601	79,344	93,256
3		0,782	0,357	0,425	172,008	78,571	93,436
4		0,779	0,354	0,426	171,431	77,814	93,617
5		0,777	0,35	0,426	170,869	77,07	93,798
6		0,795	0,368	0,427	174,917	80,936	93,981
7		0,8	0,372	0,428	175,92	81,757	94,163
8		0,804	0,375	0,429	176,941	82,594	94,347
9		0,809	0,379	0,43	177,98	83,448	94,531
10		0,795	0,364	0,431	174,849	80,132	94,716
11		0,791	0,359	0,431	173,987	79,085	94,902
12		0,788	0,356	0,432	173,406	78,317	95,088
13		0,786	0,353	0,433	172,84	77,564	95,276
14		0,783	0,349	0,434	172,289	76,825	95,464
15		0,804	0,369	0,435	176,86	81,208	95,652
16		0,809	0,373	0,436	177,875	82,034	95,842
17		0,813	0,377	0,437	178,908	82,877	96,032
18		0,818	0,381	0,437	179,96	83,737	96,223
19		0,822	0,383	0,438	180,735	84,321	96,414
20		0,802	0,363	0,439	176,475	79,868	96,607
21		0,798	0,358	0,44	175,627	78,827	96,8
22		0,794	0,355	0,439	174,671	78,065	96,607
23		0,79	0,351	0,438	173,731	77,316	96,414
24		0,808	0,37	0,437	177,704	81,481	96,223
25		0,811	0,374	0,437	178,345	82,313	96,032
26		0,814	0,378	0,436	179,003	83,162	95,842
27		0,819	0,85	0,435	180,268	84,615	95,652
28		0,82	0,386	0,434	180,376	84,912	95,464
29		0,815	0,382	0,433	179,303	84,028	95,276
30		0,794	0,362	0,432	174,694	79,605	95,088
31		0,779	0,348	0,431	171,484	76,582	94,902
32		0,815	0,385	0,431	179,332	84,615	94,716
33		0,777	0,347	0,43	170,872	76,341	94,531
34		0,815	0,386	0,429	179,259	84,912	94,347

Таблиця 5.18

№ вар	U	I	I_1	I_2	P	P_1	P_2
	В	*А*			*Вт*		
1	220	1,114	0,365	0,967	132,009	80,399	51,611
2		1,095	0,361	0,952	129,168	79,344	49,824
3		1,077	0,357	0,936	126,639	78,571	48,067
4		1,059	0,354	0,921	124,155	77,814	46,342
5		1,041	0,35	0,905	121,717	77,07	44,647
6		1,035	0,368	0,89	123,92	80,936	42,983
7		1,021	0,372	0,875	123,107	81,757	41,35
8		1,008	0,375	0,86	122,342	82,594	39,748
9		0,994	0,379	0,844	121,625	83,448	38,177
10		0,97	0,364	0,829	116,768	80,132	36,636
11		0,952	0,359	0,814	114,211	79,085	35,126
12		0,935	0,356	0,799	111,964	78,317	33,647
13		0,918	0,353	0,784	109,763	77,564	32,199
14		0,901	0,349	0,769	107,607	76,825	30,782
15		0,897	0,369	0,754	110,603	81,208	29,395
16		0,884	0,373	0,739	110,073	82,034	28,039
17		0,871	0,377	0,725	109,591	82,877	26,714
18		0,858	0,381	0,71	109,157	83,737	25,42
19		0,864	0,383	0,716	109,217	84,321	24,896
20		0,864	0,363	0,73	104,464	79,868	24,596
21		0,872	0,358	0,744	103,092	78,827	24,265
22		0,885	0,355	0,758	103,616	78,065	25,551
23		0,898	0,351	0,773	104,185	77,316	26,868
24		0,923	0,37	0,788	109,698	81,481	28,216
25		0,941	0,374	0,803	111,908	82,313	29,595
26		0,958	0,378	0,818	114,166	83,162	31,005
27		0,977	0,85	0,832	117,061	84,615	32,445
28		0,993	0,386	0,847	118,829	84,912	33,917
29		1,006	0,382	0,862	119,447	84,028	35,419
30		1,011	0,362	0,878	116,557	79,605	36,952
31		1,02	0,348	0,893	115,098	76,582	38,515
32		1,055	0,385	0,908	124,725	84,615	40,11
33		1,051	0,347	0,923	118,076	76,341	41,735
34		1,087	0,386	0,938	128,304	84,912	43,392

Таблиця 5.19

№ вар	U	I	I_1	I_2	P	P_1	P_2
	В	*А*			*Вт*		
1	220	0,674	0,365	0,553	84,656	80,399	4,257
2		0,642	0,361	0,519	83,313	79,344	3,969
3		0,611	0,357	0,484	82,254	78,571	3,683
4		0,581	0,354	0,45	81,213	77,814	3,4
5		0,552	0,35	0,415	80,19	77,07	3,12
6		0,538	0,368	0,38	83,78	80,936	2,843
7		0,516	0,372	0,346	84,326	81,757	2,57
8		0,496	0,375	0,311	84,893	82,594	2,299
9		0,675	0,379	0,546	87,46	83,448	4,012
10		0,638	0,364	0,512	83,868	80,132	3,736
11		0,607	0,359	0,477	82,547	79,085	3,462
12		0,577	0,356	0,443	81,509	78,317	3,192
13		0,548	0,353	0,408	80,489	77,564	2,925
14		0,519	0,349	0,373	79,486	76,825	2,66
15		0,509	0,369	0,339	83,607	81,208	2,399
16		0,665	0,373	0,539	85,829	82,034	3,795
17		0,639	0,377	0,505	86,406	82,877	3,53
18		0,614	0,381	0,47	87,004	83,737	3,267
19		0,589	0,383	0,436	87,328	84,321	3,008
20		0,549	0,363	0,401	82,62	79,868	2,752
21		0,52	0,358	0,366	81,326	78,827	0,498
22		0,493	0,355	0,332	80,312	78,065	2,248
23		0,647	0,351	0,532	80,899	77,316	3,583
24		0,629	0,37	0,498	84,81	81,481	3,328
25		0,604	0,374	0,463	85,39	82,313	3,077
26		0,581	0,378	0,429	86,159	83,162	2,998
27		0,559	0,85	0,394	87,354	84,615	2,739
28		0,536	0,386	0,36	87,395	84,912	2,483
29		0,509	0,382	0,325	86,257	84,028	2,23
30		0,647	0,362	0,526	83,188	79,605	3,582
31		0,611	0,348	0,491	79,907	76,582	3,325
32		0,606	0,385	0,456	87,686	84,615	3,071
33		0,554	0,347	0,422	79,16	76,341	2,82
34		0,555	0,386	0,387	87,484	84,912	2,572

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІШАНОГО СПОЛУЧЕННЯ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідити коло однофазного змінного синусоїдного струму при змішаному з'єднанні активних та реактивних елементів. Навчитися визначати активні, реактивні та повні опори і провідності, кути зсуву фаз та будувати суміщені векторні діаграми струмів та напруг електричних кіл синусоїдного струму.

6.1 Основні теоретичні положення

Миттєве значення синусоїдного струму записують так

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

Від струму $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, що тече в електричному колі з послідовним сполученням R, L та C на окремих елементах та вхідних затискачах, створюються напруги

$$u_R = R \cdot i = R \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i);$$
$$u_L = L\frac{di}{dt} = \omega L \cdot I_m \cos(\omega t + \psi_i) = X_L \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2});$$
$$u_C = \frac{1}{C}\int i dt = -\frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cos(\omega t + \psi_i) = X_C \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2});$$
$$u = u_R + u_L + u_C = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = Z \cdot I_m \sin(\omega t + \psi_u).$$

Напруга на активному опорі u_R має таку ж початкову фазу, що і струм. Напруга на індуктивності u_L випереджає струм за фазою на кут $\frac{\pi}{2}$, а напруга на ємності u_C відстає за фазою від струму на кут $\frac{\pi}{2}$.

Кут зсуву фаз визначають як різницю початкових фаз напруги та струму, тобто $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

Кут зсуву фаз між напругою та струмом на вхідних затискачах електричного кола залежить від параметрів всіх елементів кола і його визначають за формулою

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_L - X_C}{R}.$$

Якщо φ>0, напруга випереджає струм, що свідчить про активно-індуктивний характер електричного кола. В разі φ<0 струм випереджає напругу і таке електричне коло має активно-ємнісний характер.

Величину $X_L = \omega L$ називають *індуктивним реактивним опором* (**індуктивним реактансом**), а $X_C = \frac{1}{\omega C}$ - *ємнісним реактивним опором* (**ємнісним реактансом**). Перша із цих величин умовно вважається додатною, а друга - від'ємною. Алгебраїчну суму індуктивного та ємнісного реактансів $X = X_L + (-X_C)$ називають *реактивним опором* (реактансом) електричного кола.

Повний опір (**імпеданс**) електричного кола *Z* складається з його активного (**резистансу**) та реактивного (**реактансу**) опорів і визначається за формулою

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

Введення поняття про повний опір, яким зручно користуватись у разі послідовного сполучення елементів всього електричного кола, чи окремих його ділянок, дозволяє записати закон Ома для діючих значень

$$U = Z \cdot I.$$

Якщо електричне коло складається з елементів *R*, *L* і *C*, сполучених паралельно, то для його розрахунку користуються поняттям провідності, що є величиною, оберненою відповідному опору. В такому разі розрізнюють: активну провідність (**кондуктанс**); індуктивну реактивну провідність (**індуктивний сусцептанс**); ємнісну реактивну провідність (**ємнісний**

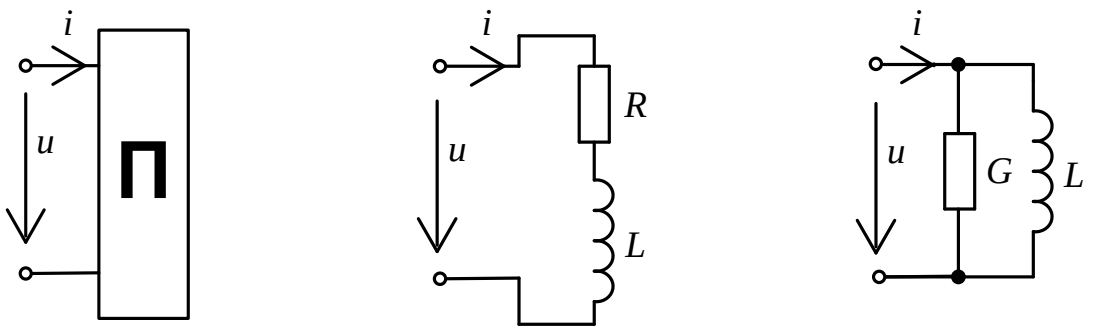
сусцептанс); реактивну провідність електричного кола (**сусцептанс кола**), що є алгебраїчно сумою індуктивного та ємнісного сусцептансів; повну провідність (**адмітанс**) електричного кола, що є геометричною сумою активної та реактивної провідностей.

Кут зсуву фази між напругою та струмом на вхідних затискачах електричного кола також залежить від параметрів всіх елементів кола і його визначають за формулою

$$\varphi = arctg\,\frac{B_L - B_C}{G}.$$

Зв'язок між активною, реактивною та повною провідностями записують наступним чином $G = Y\cos(\varphi)$ та $B = Y\sin(\varphi)$.

Будь-який пасивний двополюсник (рис. 6.1, *а*) можна замінити двома еквівалентними схемами заміщення відповідно із послідовним сполученням опорів (рис. 6.1, *б*) та паралельним сполученням провідностей (рис. 6.1, *в*).



а) б) в)

Рис. 6.1

Параметри еквівалентних схем пасивного двополюсника можна визначити дослідним шляхом. Для цього потрібно за допомогою приладів виміряти

напругу, струм та активну потужність двополюсника, що дозволить розрахувати:

а) для схеми з послідовним з'єднанням елементів

$$Z = \frac{U}{I},\ R = \frac{P}{I^2},\ X = \sqrt{Z^2 - R^2},\ \cos(\varphi) = \frac{P}{UI};$$

б) для схеми з паралельним з'єднанням елементів

$$Y = \frac{I}{U},\ G = \frac{P}{U^2},\ B = \sqrt{Y^2 - G^2},\ \cos(\varphi) = \frac{P}{UI};$$

Обидві схеми еквівалентні між собою за умови, що між опорами та провідностями мають місце такі співвідношення

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2};\ B = \frac{X}{R^2 + X^2};\ R = \frac{G}{G^2 + B^2};\ X = \frac{B}{G^2 + B^2}.$$

Аналіз електричного кола синусоїдного струму (дослід або розрахунок), як правило, супроводжується побудовою суміщеної векторної діаграми струмів та напруг кола.

Для струмів будується променева діаграма: вектори всіх струмів відкладаються з будь-якої довільної вибраної точки (наприклад, із початку координат). Це дає можливість перевіряти виконання першого закону Кірхгофа для будь-якого вузла електричного кола.

Для напруг звичайно будується топологічна діаграма: початок наступного вектора напруги будується з кінця попереднього вектора у тій же послідовності, в якій відповідні елементи електричного кола розташовані в схемі; це дає змогу перевіряти виконання другого закону Кірхгофа для будь-якого контуру електричного кола.

Згідно з правилами векторної алгебри кінець вектора напруги завжди напрямлений у точку з більшим потенціалом, тому доцільно побудову діаграми напруг проводити таким чином, щоб завжди рухатись проти позитивного

напрямку відповідного струму в схемі електричного кола. Вектор напруги, проведений з початку координат до будь-якої точки діаграми, визначає потенціал цієї точки в електричному колі.

При побудові якісної векторної діаграми електричного кола з послідовно-паралельним з’єднанням елементів (тобто без попереднього розрахунку струмів та напруг електричного кола) починати необхідно з будь-якого струму або напруги на *паралельній* ділянці електричного кола.

Топографічна діаграма напруг дозволяє досить просто визначити напругу між будь-якими точками електричного кола: діюче значення й фаза напруги визначаються прямою, що з'єднує відповідні точки на цій діаграмі.

6.2 Порядок проведення роботи

1. Скласти спочатку електричне коло, за схемою рис. 6.2, а потім – за схемою рис. 6.3.

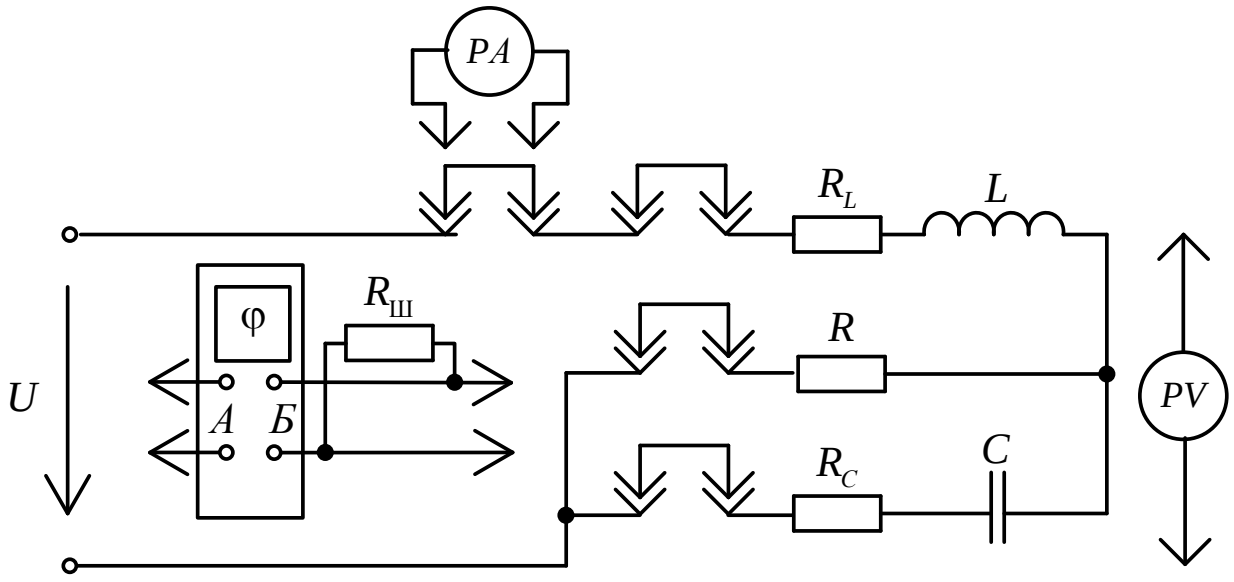


Рис. 6.2

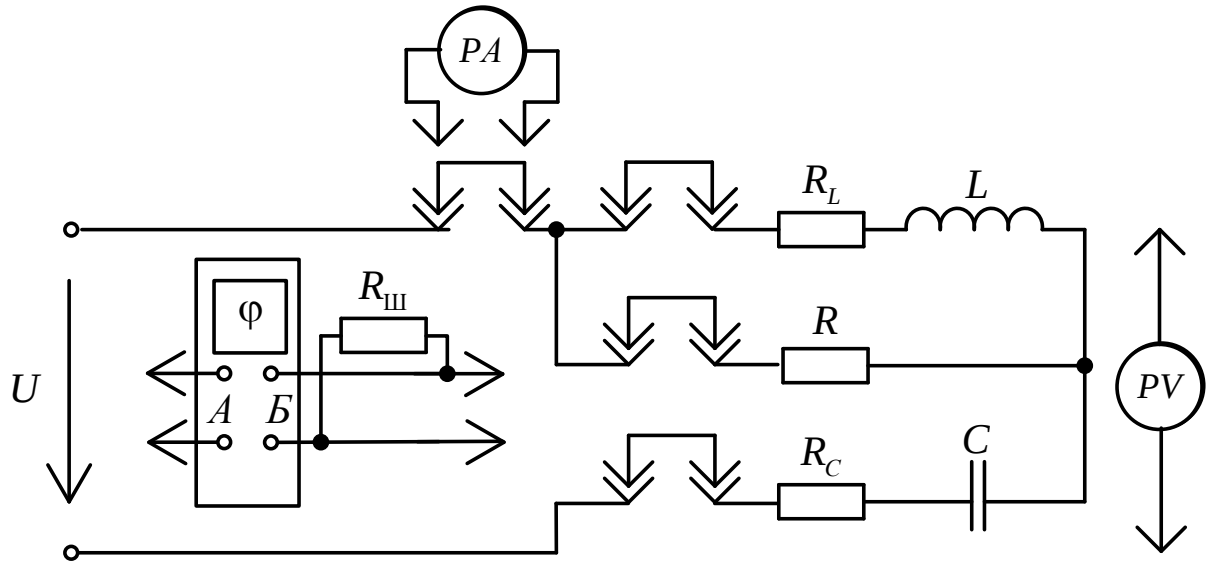


Рис. 6.3

2. Виконати виміри струмів, напруг і кутів зсуву фаз для кожного споживача окремо, а також на вхідних затискачах електричного кола. Результати вимірів занести в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

№	U, *В*	U_R, *В*	U_L, *В*	U_C, *В*	I, *А*	I_R, *А*	I_L, *А*	I_C, *А*	φ,°	φ_R,°	φ_L,°	φ_C,°	P, *Вт*	P_R, *Вт*	P_L, *Вт*	P_C, *Вт*
6.2																
6.3																

3. Скласти баланс активних потужностей для обох досліджуваних кіл.

4. За даними вимірів п.2 визначити активні, реактивні та повні опори, а також комплексні опори окремих споживачів і всього кола. Результати розрахунків занести в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Схема	Споживач	Параметри				
		$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	φ,°	$\underline{Z}, Ом$
Рис. 6.3	Резистор					
Рис. 6.4						
Рис. 6.3	Індуктивна котушка					
Рис. 6.4						
Рис. 6.3	Конденсатор					
Рис. 6.4						
Рис. 6.3	Все коло					
Рис. 6.4						

5. Для електричних кіл (рис. 6.2 та 6.3) побудувати суміщені векторні діаграми напруг та струмів.

6. За результатами дослідів п. 2, визначити середні величини опорів резистора, індуктивної котушки та конденсатора табл. 6.2 і записати в табл. 6.3 комплексні опори цих споживачів.

Таблиця 6.3

Споживач	**Параметри**		
	$R, Ом$	$X, Ом$	$\underline{Z}, Ом$
Резистор			
Індуктивна котушка			
Конденсатор			

7. Вважаючи відомими параметри споживачів (див. табл. 6.3), розрахувати струми віток електричних кіл (рис. 6.2, 6.3) та їхні активні потужності; порівняти результати розрахунків з результатами експериментальних вимірів.

8. Зробити і записати у протоколі звіту висновки по роботі.

6.3 Опрацювання результатів вимірювання

1. Визначити ємність батареї конденсаторів в схемі рис. 6.2 та індуктивність котушки в схемі рис. 6.3, при яких вхідний кут зсуву фази буде дорівнювати $+45^{\circ}$ (електричний градус).

2. Скласти обґрунтований план побудови суміщеної векторної діаграми струмів та напруг електричного кола, використовуючи для цього лише результати вимірів за допомогою амперметрів та вольтметрів в електричних колах рис. 6.3 та 6.4, вважаючи, що резистор має суто активним опором.

6.4 Запитання і завдання для самоперевірки

1 Як впливає частота змінного струму на опір активних та реактивних елементів?

2 Яким чином будуються суміщені векторні діаграми струмів та напруг електричного кола для змішаного сполучення споживачів?

3 Які величини використовують для характеристики синусоїдних струмів і напруг?

4 Як складається баланс потужностей в електричному колі зі змішаним сполученням споживачів?

5 Показати, як виконуються перший та другий закон Кірхгофа для дійсних значень напруг в електричному колі зі змішаним сполученням споживачів.

6 Записати формули миттєвого значення напруг та струмів для схем рис. 6.2, рис. 6.3.

6.5 Дані дослідів для дистанційної форми навчання

Таблиця 6.4

№	№ схеми	U, В	U_R, В	U_L, В	U_C, В	I, А	I_R, А	I_L, А	I_C, А	φ, град.	φ_R, град.	φ_L, град.	φ_C, град.	P, Вт	P_R, Вт	P_L, Вт	P_C, Вт
1	**6.2**	15.0	10.0	13.0	10.0	72	52	72	45	20	0	61	-85	1.018	0.523	0.456	0.039
	6.3	15.0	8.2	8.2	16.7	76	43	45	76	-56	0	61	-85	0.640	0.350	0.179	0.111
2	**6.2**	20,0	9,6	15,3	9,6	80	51	80	57	3	0	31	-83	1,605	0,487	1,052	0,066
	6.3	20,0	10,7	10,7	18,5	109	57	57	109	-51	0	31	-83	1,375	0,608	0,521	0,246
3	**6.2**	28,0	11,7	21,7	11,7	103	83	103	58	12	0	35	-88	2,826	0,970	1,833	0,024
	6.3	28,0	12,2	12,2	27,8	139	87	58	139	-63	0	35	-88	1,788	1,069	0,584	0,135
4	**6.2**	17,0	10,9	15,3	10,9	70	42	70	52	14	0	53	-85	1,147	0,458	0,640	0,049
	6.3	17,0	11,4	11,4	18,0	86	44	52	86	-47	0	53	-85	0,994	0,502	0,357	0,135
5	**6.2**	16,0	9,3	15,1	9,3	79	37	79	67	10	0	45	-85	1,249	0,350	0,845	0,054
	6.3	16,0	12,7	12,7	15,2	109	51	67	109	-37	0	45	-85	1,387	0,644	0,599	0,144
6	**6.2**	13,0	8,5	13,3	8,5	58	35	58	42	26	0	64	-84	0,673	0,298	0,337	0,037
	6.3	13,0	9,7	9,7	14,1	70	41	42	70	-42	0	64	-84	0,678	0,394	0,180	0,103

7	**6.2**	20,0	11,4	18,3	11,4	96	67	96	63	24	0	58	-85	1,765	0,767	0,934	0,063
	6.3	20,0	12,1	12,1	21,2	118	71	63	118	-51	0	58	-85	1,477	0,855	0,405	0,217
8	**6.2**	25,0	19,6	14,9	19,6	106	73	106	75	-9	0	43	-88	2,630	1,420	1,158	0,051
	6.3	25,0	10,5	10,5	27,9	107	39	75	107	-66	0	43	-88	1,097	0,412	0,581	0,104
9	**6.2**	24,0	13,9	20,8	13,9	87	58	87	61	16	0	51	-86	2,005	0,809	1,138	0,059
	6.3	24,0	14,5	14,5	25,2	109	61	61	109	-52	0	51	-86	1,627	0,881	0,554	0,192
10	**6.2**	18,0	10,5	15,8	10,5	79	44	79	62	9	0	45	-85	1,404	0,463	0,884	0,057
	6.3	18,0	12,4	12,4	17,9	105	52	62	105	-45	0	45	-85	1,348	0,641	0,544	0,164
11	**6.2**	26,0	13,5	22,7	13,5	126	104	126	61	32	0	63	-84	2,787	1,402	1,298	0,087
	6.3	26,0	11,0	11,0	27,6	125	85	61	125	-60	0	63	-84	1,608	0,939	0,308	0,362
12	**6.2**	23,0	10,8	19,8	10,8	94	47	94	77	5	0	33	-84	2,162	0,507	1,568	0,087
	6.3	23,0	16,2	16,2	19,8	141	70	77	141	-40	0	33	-84	2,480	1,140	1,047	0,293
13	**6.2**	20,0	8,6	17,5	8,6	67	51	67	41	24	0	49	-86	1,235	0,436	0,774	0,025
	6.3	20,0	10,7	10,7	19,9	95	63	41	95	-55	0	49	-86	1,088	0,669	0,287	0,132
14	**6.2**	16,0	7,3	13,7	7,3	65	56	65	29	32	0	59	-85	0,883	0,405	0,459	0,018
	6.3	16,0	6,1	6,1	16,7	67	47	29	67	-64	0	59	-85	0,474	0,286	0,091	0,097

15	**6.2**	17,0	8,8	12,1	8,8	55	40	55	34	5	0	35	-84	0,934	0,354	0,549	0,031
	6.3	17,0	7,5	7,5	16,8	65	34	34	65	-59	0	35	-84	0,575	0,253	0,208	0,114
16	**6.2**	26,0	18,8	30,7	18,8	162	75	162	134	29	0	67	-83	3,660	1,413	1,940	0,307
	6.3	26,0	25,5	25,5	27,7	198	102	134	198	-26	0	67	-83	4,607	2,602	1,338	0,668
17	**6.2**	20,0	11,0	22,1	11,0	96	61	96	69	40	0	70	-85	1,469	0,676	0,727	0,066
	6.3	20,0	15,9	15,9	20,7	129	88	69	129	-39	0	70	-85	2,003	1,397	0,374	0,232
18	**6.2**	18,0	14,9	15,7	14,9	93	68	93	62	14	0	66	-89	1,616	1,007	0,593	0,016
	6.3	18,0	10,5	10,5	22,2	93	48	62	93	-61	0	66	-89	0,807	0,505	0,266	0,036
19	**6.2**	24,0	10,2	21,3	10,2	79	64	79	39	33	0	58	-83	1,590	0,651	0,890	0,049
	6.3	24,0	10,6	10,6	24,2	93	66	39	93	-58	0	58	-83	1,198	0,702	0,221	0,275
20	**6.2**	19,0	10,2	15,3	10,2	64	44	64	41	14	0	46	-83	1,173	0,449	0,674	0,050
	6.3	19,0	9,8	9,8	19,1	76	42	41	76	-53	0	46	-83	0,867	0,414	0,275	0,178
21	**6.2**	13,0	6,3	11,3	6,3	45	33	45	27	23	0	52	-84	0,540	0,208	0,313	0,018
	6.3	13,0	6,8	6,8	13,1	57	36	27	57	-54	0	52	-84	0,440	0,246	0,115	0,078
22	**6.2**	20,0	9,9	21,1	9,9	96	52	96	76	30	0	58	-85	1,659	0,517	1,076	0,066
	6.3	20,0	16,8	16,8	18,7	144	88	76	144	-34	0	58	-85	2,394	1,481	0,678	0,235

23	**6.2**	15,0	9,3	12,5	9,3	78	62	78	41	25	0	63	-84	1,061	0,582	0,440	0,040
	6.3	15,0	6,5	6,5	16,5	72	43	41	72	-61	0	63	-84	0,525	0,282	0,120	0,123
24	**6.2**	18,0	9,8	15,5	9,8	60	45	60	38	20	0	53	-88	1,008	0,440	0,555	0,013
	6.3	18,0	9,8	9,8	19,2	74	45	38	74	-58	0	53	-88	0,714	0,440	0,224	0,050
25	**6.2**	24,0	15,4	21,8	15,4	104	64	104	77	15	0	54	-86	2,408	0,993	1,332	0,083
	6.3	24,0	16,2	16,2	25,8	129	68	77	129	-48	0	54	-86	2,063	1,095	0,736	0,232
26	**6.2**	22,0	10,3	19,3	10,3	74	41	74	57	11	0	39	-84	1,603	0,428	1,113	0,062
	6.3	22,0	14,9	14,9	19,9	110	60	57	110	-43	0	39	-84	1,789	0,893	0,667	0,230
27	**6.2**	16,0	8,7	12,6	8,7	74	55	74	49	11	0	44	-88	1,167	0,477	0,675	0,015
	6.3	16,0	8,2	8,2	16,7	93	52	49	93	-59	0	44	-88	0,767	0,425	0,288	0,054
28	**6.2**	21,0	13,0	16,3	13,0	109	93	109	48	25	0	63	-84	2,071	1,201	0,805	0,065
	6.3	21,0	7,2	7,2	22,9	85	51	48	85	-66	0	63	-84	0,731	0,371	0,157	0,203
29	**6.2**	20.0	11.8	12.2	11.8	94	79	94	47	4	0	37	-87	1.872	0.929	0.915	0.029
	6.3	20.0	6.1	6.1	20.9	84	41	47	84	-70	0	37	-87	0.574	0.251	0.231	0.091
30	**6.2**	18.0	8.0	16.8	8.0	76	57	76	45	33	0	59	-84	1.155	0.460	0.658	0.037
	6.3	18.0	9.8	9.8	18.1	101	70	45	101	-52	0	59	-84	1.103	0.687	0.225	0.190

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА ПРИ З'ЄДНАННІ ДЖЕРЕЛА І ПРИЙМАЧА ЗІРКОЮ

Мета роботи: дослідити трифазне коло при з'єднанні споживачів зіркою; визначити значення нульового проводу і встановити співвідношення між лінійними і фазними напругами; навчитися вимірювати в трифазному колі напруги, струми, потужність і будувати за даними досліду векторні діаграми.

7.1 Основні теоретичні положення

Трифазним колом – називається сукупність трьох однофазних електричних кіл в кожному із яких діють ЕРС однакової частоти, але різні по фазі. При цьому окремі електричні кола, що складають трифазне коло називаються **фазами**.

Трифазне коло є **симетричним** якщо всі його елементи (джерело і споживач) симетричні. Умови симетрії джерела і споживача різні.

Трифазне джерело є **симетричним** якщо:

1. амплітудні або діючі значення ЕРС всіх фаз рівні між собою:

$$E_{m1} = E_{m2} = E_{m3}$$

$$E_1 = E_2 = E_3$$

2. кут зсуву фаз між сусідніми ЕРС рівні між собою:

$$\psi_{12} = \psi_{23} = \psi_{31} = \frac{2\pi}{m} = 120^0$$

де m – кількість фаз.

В комплексній формі $\underline{E_1} = \underline{E_2} = \cdots = \underline{E_n}$ де $\underline{E} = Ee^{j\psi_e}$

Умови симетрії для *i, u* аналогічні.

Багатофазний споживач є **симетричним**, якщо опори всіх його фаз рівні по величині та однакові за характером.

$$z_1 = z_2 = z_3,\ \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$$

В комплексній формі $\underline{Z_1} = \underline{Z_2} = \underline{Z_3}$ де $\underline{Z} = ze^{j\varphi}$

У трифазних колах розрізняють фазні та лінійні струми та напруги: у фазах джерела та споживача течуть **фазні** струми та діють **фазні** напруги які позначають $\boldsymbol{I_ф}$**,** $\boldsymbol{U_ф}$. У провідниках лінії електропередач течуть **лінійні** струми і діють **лінійні** напруги, які позначають $\boldsymbol{I_л}$**,** $\boldsymbol{U_л}$**.** Зазвичай лінійні струми та напруги у індексі мають великі літери, а фазні струми та напруги у індексі мають малі літери.

Трифазні кола з’єднують за схемою зірки або трикутника. Додатні напрями струмів, напруг та ЕРС у цих колах показано на рис. 7.1.

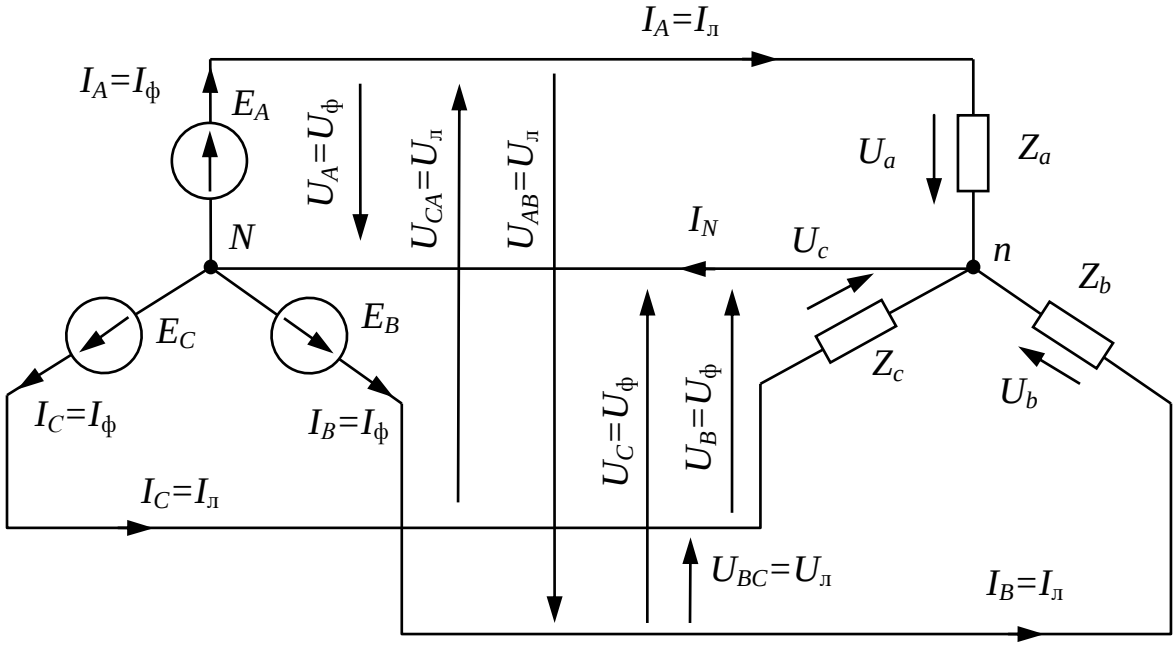


Рис 7.1

Провідник, який об’єднує кінці джерела та споживача називається **нейтральним провідником** – у ньому тече **струм нейтралі** $\boldsymbol{I_N}$**.**

Співвідношення фазних та лінійних струмів та напруг для з’єднання споживачів зіркою

симетричне навантаження: $I_л = I_ф;\ U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}}$

несиметричне навантаження:

$$I_л = I_ф;\ \overline{U}_{ab} = \overline{U}_a - \overline{U}_b;\ \overline{U}_{bc} = \overline{U}_b - \overline{U}_c;\ \overline{U}_{ca} = \overline{U}_c - \overline{U}_a$$

Значення струму нейтралі розраховують за І законом Кірхгофа у символічній або векторній формі:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C \quad \text{або} \quad \bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$$

Побудову векторних діаграм починають із векторів фазних та лінійних напруг (рис. 7.2). Для зручності побудови комплексну площину для трифазних кіл повертають на 90^0 проти ходу годинникової стрілки. Тоді комплексне значення фазних та лінійних напруг для симетричної системи буде:

$$\underline{U}_a = U_\phi e^{j0} = U_\phi;\ \underline{U}_b = U_\phi e^{-j120};\ \underline{U}_c = U_\phi e^{j120}$$

$$\underline{U}_{AB} = U_л e^{j30};\ \underline{U}_{BC} = U_л e^{-j90};\ \underline{U}_{CA} = U_л e^{j150}.$$

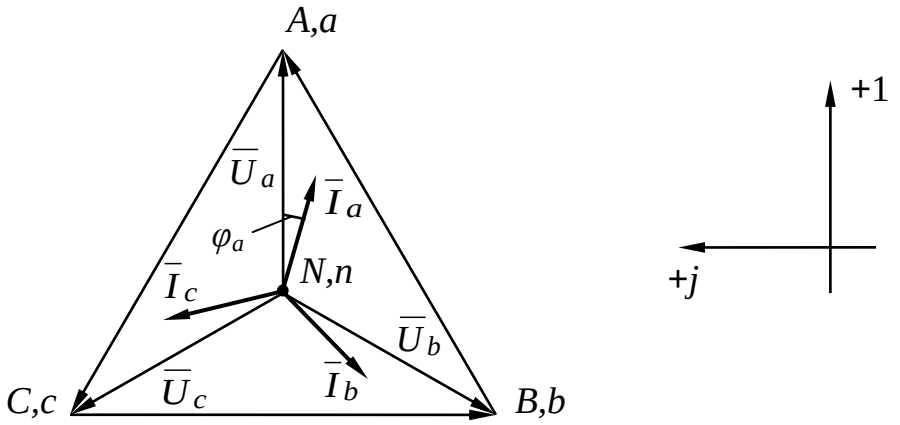


Рис 7.2

При обриві нейтрального провідника відбувається зміщення точки «*n*» (рис. 7.3). У цьому випадку векторну діаграму починають будувати із лінійних напруг. Далі, використовуючи значення фазних напруг, методом засічок шукають точку «n'».

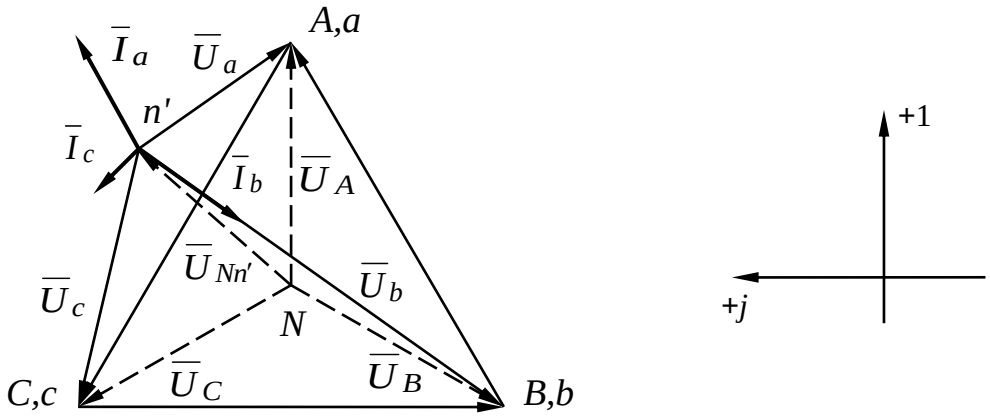


Рис 9.4

Для виміру потужності у трифазних чотирипровідних електричних колах використовують метод трьох ватметрів рис. 7.4.

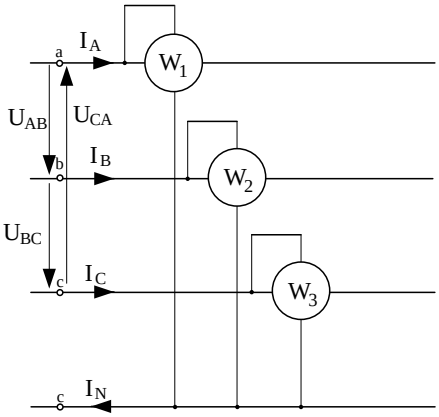


Рис. 7.4

$$P_1 = U_a I_a \cos\varphi_a; \quad P_2 = U_b I_b \cos\varphi_b; \quad P_3 = U_c I_c \cos\varphi_c$$

При цьому активна потужність трифазного кола

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2 + P_3$$

Для виміру потужності у трифазних трипровідних електричних колах використовують метод двох ватметрів. Існує декілька способів ввімкнення двох ватметрів у трифазне трипровідне коло (рис. 7.2-7.4).

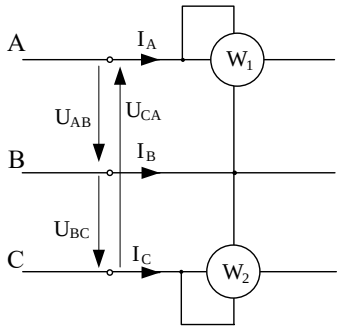


Рис. 7.2

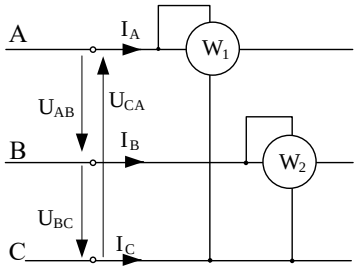


Рис. 7.3

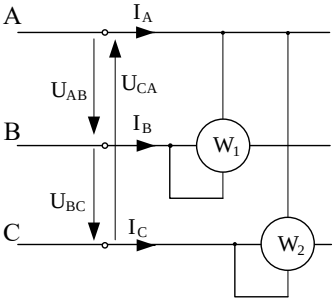


Рис. 7.4

$P_1 = U_{AB} I_A cos\varphi_{ab}$ $P_1 = U_{CA} I_A cos\varphi_{ca}$ $P_1 = U_{AB} I_B cos\varphi_{ab}$

$P_2 = U_{BC} I_C cos\varphi_{bc}$ $P_2 = U_{BC} I_B cos\varphi_{bc}$ $P_2 = U_{CA} I_C cos\varphi_{ca}$

При цьому активна потужність трифазного кола

$$P_{3\phi} = P_1 + P_2$$

7.2 Порядок проведення роботи

1. Ознайомитися з вимірювальними приладами та апаратами, які застосовують у роботі. Записати їх паспортні данні в таблицю 7.1.

Для дистанційного навчання табл. 7.1 не потребує заповнення.

Таблиця 7.1

№	Прилади	Позначення в схемі	Вимірювальний механізм або тип	Клас точності	Межа вимірювання або номінальні	К-сть поділок у шкалі	Ціна поділки приладу

2. Скласти електричне коло, відповідно до рис. 7.5.

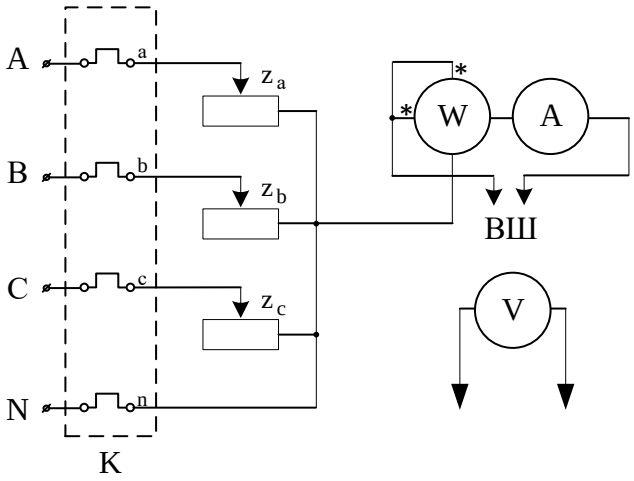


Рис. 7.5

3. Провести вимірювання величин згідно даним табл. 7.2. Застосування комутатора струму дає змогу вимірювати трифазну потужність методом трьох ватметрів з допомогою одного ватметра.

Для дистанційної форми навчання дані до таблиці 7.2 записати із табл.7.5-7.8.

Таблиця 7.2

Дані вимірювань		Режими навантаження			
		Активне симетричне	Активне несиметричне	Обрив одного лінійного провідника	Активне та ємнісне
U_a	В				
U_b					
U_c					
U_{AB}					
U_{BC}					
U_{CA}					
I_A	А				
I_B					
I_C					
I_N					
P_a	Вт				
P_b					
P_c					

4. За даними таблиці 7.2 для всіх режимів навантаження зробити необхідні обчислення в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3

Результати обчислень		Режими навантаження			
		Активне симетричне	Активне несиметричне	Обрив одного лінійного провідника	Активне та ємнісне
$P_{3\phi}$	Вт				
$\frac{U_{AB}}{U_a}$					

$\frac{U_{BC}}{U_b}$					
$\frac{U_{CA}}{U_c}$					

5. За даними таблиці 7.2 для одного з режимів навантаження написати комплекси фазних і лінійних напруг, струмів (табл.7.4).

Таблиця 7.4

$\dot{U}_a =$
$\dot{U}_b =$
$\dot{U}_c =$
$\dot{U}_{AB} =$
$\dot{U}_{BC} =$
$\dot{U}_{CA} =$
$\dot{I}_a =$
$\dot{I}_b =$
$\dot{I}_c =$

7.3 Опрацювання результатів вимірювання

1. Аналітично розрахувати величини табл. 7.3.

2. Побудувати векторні діаграми згідно даних табл. 7.2. Перевірити відповідність значень струму нейтралі векторних діаграмах виміряним даним табл. 7.2.

3. За даними табл. 7.2. для режиму активного та ємнісного навантаження записати значення фазних та лінійних напруг та струмів у комплексній формі (алгебраїчна та показникова форма) у табл. 6.4.

7.4 Запитання і завдання для самоперевірки

1. Дати визначення фазних та лінійних напруг. На схемі рис. 7.2 показати приєднання вольтметру для визначення фазних та лінійних напруг.

2. Дати визначення нейтрального провідника. Пояснити, чому на нейтральний провідник не встановлюють запобіжник.

3. Записати співвідношення між фазною та лінійною напругами для симетричного та несиметричного навантаження трифазного кола при з’єднанні споживачів зіркою.

4. Пояснити отриманні значення при знаходженні відношення лінійної та фазної напруги при обриві одного лінійного провідника табл. 7.2.

5. Яким методом вимірюють потужність у трифазних чотирьохпровідних колах?

7.5 Дані дослідів

для дистанційної форми навчання

Таблиця 7.5

Навантаження активне симетричне

Показ вольтметра								
U_a		U_b		U_c	U_{AB}		U_{BC}	U_{CA}
B								
127		127		127	220		220	220
№ вар	**Показ амперметра**				**Показ ватметра**			
	I_A	I_B	I_C	I_N	P_a	P_b	P_c	
	A				*Вт*			
1	0,2374	0,2374	0,2374	0	30,15	30,15	30,15	
2	0,2419	0,2419	0,2419		30,72	30,72	30,72	
3	0,2466	0,2466	0,2466		31,32	31,32	31,32	
4	0,2515	0,2515	0,2515		31,94	31,94	31,94	
5	0,2566	0,2566	0,2566		32,58	32,58	32,58	
6	0,2619	0,2619	0,2619		33,26	33,26	33,26	
7	0,2674	0,2674	0,2674		33,96	33,96	33,96	
8	0,2731	0,2731	0,2731		34,69	34,69	34,69	
9	0,2791	0,2791	0,2791		35,45	35,45	35,45	
10	0,2854	0,2854	0,2854		36,24	36,24	36,24	
11	0,2919	0,2919	0,2919		37,08	37,08	37,08	
12	0,2988	0,2988	0,2988		37,95	37,95	37,95	
13	0,306	0,306	0,306		38,87	38,87	38,87	
14	0,3136	0,3136	0,3136		39,82	39,82	39,82	
15	0,3175	0,3175	0,3175		40,32	40,32	40,32	
16	0,3098	0,3098	0,3098		39,34	39,34	39,34	
17	0,3024	0,3024	0,3024		38,4	38,4	38,4	
18	0,2953	0,2953	0,2953		37,51	37,51	37,51	
19	0,2886	0,2886	0,2886		36,66	36,66	36,66	
20	0,2822	0,2822	0,2822		35,84	35,84	35,84	
21	0,2761	0,2761	0,2761		35,06	35,06	35,06	
22	0,2702	0,2702	0,2702		34,32	34,32	34,32	
23	0,2646	0,2646	0,2646		33,6	33,6	33,6	
24	0,2592	0,2592	0,2592		32,92	32,92	32,92	
25	0,254	0,254	0,254		32,26	32,26	32,26	
26	0,249	0,249	0,249		31,63	31,63	31,63	
27	0,2442	0,2442	0,2442		31,02	31,02	31,02	
28	0,2396	0,2396	0,2396		30,43	30,43	30,43	
29	0,2352	0,2352	0,2352		29,87	29,87	29,87	
30	0,2309	0,2309	0,2309		29,33	29,33	29,33	
31	0,233	0,233	0,233		29,59	29,59	29,59	
32	0,2288	0,2288	0,2288		29,06	29,06	29,06	
33	0,2248	0,2248	0,2248		28,55	28,55	28,55	
34	0,2268	0,2268	0,2268		28,8	28,8	28,8	

Таблиця 7.6

Навантаження активне несиметричне

Показ вольтметра					
U_a	U_b	U_c	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
B					
127	127	127	220	220	220

№ вар	**Показ амперметра**				**Показ ватметра**		
	I_A	I_B	I_C	I_N	P_a	P_b	P_c
	A				*Вт*		
1	0,1618	0,2374	0,1227	0,101	20,55	30,15	15,58
2	0,1639	0,2419	0,1239	0,104	20,81	30,72	15,74
3	0,166	0,2466	0,1251	0,1071	21,08	31,32	15,89
4	0,1682	0,2515	0,1264	0,1103	21,36	31,94	16,05
5	0,1705	0,2566	0,1276	0,1147	21,65	32,58	16,21
6	0,1728	0,2619	0,1289	0,1173	21,94	33,26	16,37
7	0,1752	0,2674	0,1303	0,1211	22,25	33,96	16,54
8	0,1776	0,2731	0,1316	0,125	22,56	34,69	16,71
9	0,1801	0,2791	0,133	0,1292	22,87	35,45	16,89
10	0,1827	0,2854	0,1344	0,1336	23,2	36,24	17,07
11	0,1854	0,2919	0,1358	0,1382	23,55	37,08	17,25
12	0,1881	0,2988	0,1373	0,143	23,89	37,95	17,44
13	0,191	0,306	0,1388	0,1482	24,26	38,87	17,63
14	0,1939	0,3136	0,1403	0,1536	24,62	39,82	17,82
15	0,1954	0,3175	0,1411	0,1565	24,81	40,32	17,92
16	0,1924	0,3098	0,1396	0,1509	24,43	39,34	17,72
17	0,1896	0,3024	0,138	0,1456	24,08	38,4	17,53
18	0,1868	0,2953	0,1366	0,1406	23,72	37,51	17,34
19	0,1841	0,2886	0,1351	0,1358	23,38	36,66	17,16
20	0,1814	0,2822	0,1337	0,1313	23,04	35,84	16,98
21	0,1789	0,2761	0,1323	0,1271	22,72	35,06	16,8
22	0,1764	0,2702	0,1309	0,123	22,4	34,32	16,63
23	0,174	0,2646	0,1296	0,1192	22,1	33,6	16,46
24	0,1716	0,2592	0,1283	0,1155	21,79	32,92	16,29
25	0,1693	0,254	0,127	0,112	21,5	32,26	16,13
26	0,1671	0,249	0,1257	0,1087	21,22	31,63	15,97
27	0,1649	0,2442	0,1245	0,1055	20,94	31,02	15,81
28	0,1628	0,2396	0,1233	0,1024	20,68	30,43	15,66
29	0,1608	0,2352	0,1221	0,0995	20,42	29,87	15,51
30	0,1588	0,2309	0,121	0,0968	20,17	29,33	15,36
31	0,197	0,233	0,142	0,079	25,02	29,59	18,03
32	0,158	0,2288	0,122	0,095	20,07	29,06	15,49
33	0,198	0,2248	0,143	0,073	25,15	28,55	18,16
34	0,157	0,2268	0,12	0,094	19,94	28,8	15,24

Таблиця 7.7

Обрив одного лінійного провідника

№ вар	Показ вольтметра					
	U_a	U_b	U_c	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
	B					
1	0	127	127	127	220	127
2	127	0	127	127	127	220
3	127	127	0	220	127	127
4	0	127	127	127	220	127
5	127	0	127	127	127	220
6	127	127	0	220	127	127
7	0	127	127	127	220	127
8	127	0	127	127	127	220
9	127	127	0	220	127	127
10	0	127	127	127	220	127
11	127	0	127	127	127	220
12	127	127	0	220	127	127
13	0	127	127	127	220	127
14	127	0	127	127	127	220
15	127	127	0	220	127	127
16	0	127	127	127	220	127
17	127	0	127	127	127	220
18	127	127	0	220	127	127
19	0	127	127	127	220	127
20	127	0	127	127	127	220
21	127	127	0	220	127	127
22	0	127	127	127	220	127
23	127	0	127	127	127	220
24	127	127	0	220	127	127
25	0	127	127	127	220	127
26	127	0	127	127	127	220
27	127	127	0	220	127	127
28	0	127	127	127	220	127
29	127	0	127	127	127	220
30	127	127	0	220	127	127
31	0	127	127	127	220	127
32	127	0	127	127	127	220
33	127	127	0	220	127	127
34	0	127	127	127	220	127

Таблиця 7.7 продовження

№ вар	Показ амперметра				Показ ватметра		
	I_A	I_B	I_C	I_N	P_a	P_b	P_c
	A				*Вт*		
1	0	0,2374	0,1227	0,2056	0	30,15	15,58
2	0,1639	0	0,1239	0,148	20,81	0	15,74
3	0,166	0,2466	0	0,2178	21,08	31,32	0
4	0	0,2515	0,1264	0,2178	0	31,94	16,05
5	0,1705	0	0,1276	0,1536	21,65	0	16,21
6	0,1728	0,2619	0	0,2306	21,94	33,26	0
7	0	0,2674	0,1303	0,2316	0	33,96	16,54
8	0,1776	0	0,1316	0,1597	22,56	0	16,71
9	0,1801	0,2791	0	0,2451	22,87	35,45	0
10	0	0,2854	0,1344	0,2473	0	36,24	17,07
11	0,1854	0	0,1358	0,1663	23,55	0	17,25
12	0,1881	0,2988	0	0,2617	23,89	37,95	0
13	0	0,306	0,1388	0,2654	0	38,87	17,63
14	0,1939	0	0,1403	0,1734	24,62	0	17,82
15	0,1954	0,3175	0	0,2774	24,81	40,32	0
16	0	0,3098	0,1396	0,2687	0	39,34	17,72
17	0,1896	0	0,138	0,1698	24,08	0	17,53
18	0,1868	0,2953	0	0,2587	23,72	37,51	0
19	0	0,2886	0,1351	0,2501	0	36,66	17,16
20	0,1814	0	0,1337	0,1629	23,04	0	16,98
21	0,1789	0,2761	0	0,2426	22,72	35,06	0
22	0	0,2702	0,1309	0,234	0	34,32	16,63
23	0,174	0	0,1296	0,1566	22,1	0	16,46
24	0,1716	0,2592	0	0,2284	21,79	32,92	0
25	0	0,254	0,127	0,22	0	32,26	16,13
26	0,1671	0	0,1257	0,1507	21,22	0	15,97
27	0,1649	0,2442	0	0,2158	20,94	31,02	0
28	0	0,2396	0,1233	0,2075	0	30,43	15,66
29	0,1608	0	0,1221	0,1453	20,42	0	15,51
30	0,1588	0,2309	0	0,2046	20,17	29,33	0
31	0	0,233	0,142	0,203	0	29,59	18,03
32	0,158	0	0,122	0,143	20,07	0	15,49
33	0,198	0,2248	0	0,213	25,15	28,55	0
34	0	0,2268	0,12	0,197	0	28,8	15,24

Таблиця 7.8

Навантаження активне та ємнісне

Показ вольтметра					
U_a	U_b	U_c	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}
B					
127	127	127	220	220	220

№ вар	**Показ амперметруа**				**Показ ватметра**		
	I_A	I_B	I_C	I_N	P_a	P_b	P_c
	A				*Bm*		
1	0,2373	0,2374	0,2374	0,3328	0,512	30,15	30,15
2	0,2419	0,2419	0,2419	0,3392	30,72	0,522	30,72
3	0,2466	0,2466	0,2466	0,3457	31,32	31,32	0,532
4	0,2514	0,2515	0,2515	0,3526	0,543	31,94	31,94
5	0,2566	0,2565	0,2566	0,3597	32,58	0,554	32,58
6	0,2619	0,2619	0,2618	0,3671	33,26	33,26	0,565
7	0,2673	0,2674	0,2674	0,3749	0,577	33,96	33,96
8	0,2731	0,2731	0,2731	0,3829	34,69	0,589	34,69
9	0,2791	0,2791	0,2791	0,3913	35,45	35,45	0,602
10	0,2854	0,2854	0,2854	0,4001	0,616	36,24	36,24
11	0,2919	0,2919	0,2919	0,4093	37,08	0,63	37,08
12	0,2988	0,2988	0,2988	0,419	37,95	37,95	0,645
13	0,306	0,306	0,306	0,4291	0,661	38,87	38,87
14	0,3136	0,3135	0,3136	0,4397	39,82	0,677	39,82
15	0,3175	0,3175	0,3175	0,4451	40,32	40,32	0,685
16	0,3097	0,3098	0,3098	0,4343	0,669	39,34	39,34
17	0,3024	0,3023	0,3024	0,424	38,4	0,653	38,4
18	0,2953	0,2953	0,2953	0,4141	37,51	37,51	0,537
19	0,2886	0,2886	0,2886	0,4047	0,623	36,66	36,66
20	0,2822	0,2822	0,2822	0,3957	35,84	0,609	35,84
21	0,2761	0,2761	0,276	0,3871	35,06	35,06	0,596
22	0,2702	0,2702	0,2702	0,3789	0,583	34,32	34,32
23	0,2646	0,2645	0,2646	0,371	33,6	0,571	33,6
24	0,2592	0,2592	0,2591	0,3634	32,92	32,92	0,559
25	0,254	0,254	0,254	0,3561	0,548	32,26	32,26
26	0,249	0,249	0,249	0,3491	31,63	0,537	31,63
27	0,2442	0,2442	0,2442	0,3424	31,02	31,02	0,527
28	0,2396	0,2396	0,2396	0,336	0,517	30,43	30,43
29	0,2352	0,2352	0,2352	0,3297	29,87	0,508	29,87
30	0,2309	0,2309	0,2309	0,3237	29,33	29,33	0,498
31	0,233	0,233	0,233	0,327	0,503	29,59	29,59
32	0,2288	0,2288	0,2288	0,321	29,06	0,494	29,06
33	0,2248	0,2248	0,2248	0,315	28,55	28,55	0,485
34	0,2268	0,2268	0,2268	0,318	0,489	28,8	28,8