

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет
«Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії з дисципліни
"Теоретичні основи електротехніки"
для студентів спеціальностей: 141
всіх форм навчання
Частина 1

2021

Методичні вказівки до лабораторних робіт у віртуальній лабораторії з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" для студентів спеціальностей: 141 всіх форм навчання. Частина 1. /Укл.: С.М. Тиховод, В.В. Козлов, О.В. Набокова., І.О. Афанасьєва, – Запоріжжя: НУЗП, 2021. – 46 с.

Укладачі:

С.М. Тиховод, доцент, д.т.н.,
В.В. Козлов, доцент, к.т.н.,
Г.М. Романіченко, ст. викл.,
О.В. Набокова, доцент
І.О. Афанасьєва, ст.викл.

Рецензент:

Відповідальний за випуск:

С.М. Тиховод, доцент, д.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри ТЗЕ
Протокол № від 10.02.21

Затверджено
на засіданні навчально-
методичної ради інженерно-
фізичного інституту
Протокол №3 від 10.02.21

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ	4
Лабораторна робота №1 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В РІЗНИХ РЕЖИМАХ	5
Лабораторна робота №2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З ДЕКІЛЬКОМА ДЖЕРЕЛАМИ ЕРС	14
Лабораторна робота №3 ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНОГО ЛІНІЙНОГО ДВОПОЛЮСНИКА	21
Лабораторна робота №4 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	29
Лабораторна робота №5 ДОСЛІДЖЕННЯ НЕРОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	34
Лабораторна робота №6 ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗГАЛУЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ	39
ЛІТЕРАТУРА	45
Додаток А Зразок титульного аркуша	46

ПЕРЕДМОВА

Під час виконання лабораторних робіт студенти повинні оволодіти основами практичного використання постійного та змінного струму, вимірювання електричних величин, навчитися аналізувати електричні схеми при зміні їх параметрів.

Виконання лабораторних робіт у віртуальній комп'ютерній лабораторії допомагає закріплювати та поглиблювати вивчення фізичних законів, закріплювати засвоєння теоретичної частини навчального курсу "Теоретичні основи електротехніки", здобувати навички практичної роботи з електричними колами.

У методичних вказівках подаються правила використання віртуальної комп'ютерної лабораторії на основі системи Electronics Workbench. Даються не тільки короткі рекомендації, але й визначено порядок виконання лабораторних робіт та оформлення звіту, подані необхідні теоретичні пояснення та формули для розрахунків.

РОЗДІЛ 1

ПРАВИЛА ВИКОРИСТОВУВАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ ELECTRONICS WORKBENCH

Система схемотехнічного моделювання *Electronics Workbench* призначена для моделювання й аналізу електричних схем.

Electronics Workbench може проводити аналіз схем на постійному й змінному струмах.

В Electronics Workbench можна досліджувати перехідні процеси при впливі на схеми вхідних сигналів різної форми. Широкий набір приладів дозволяє робити вимірювання різних величин, задавати вхідні параметри, будувати графіки. Усі прилади зображуються у вигляді, максимально наближеному до реального, тому працювати з ними просто й зручно.

Результати моделювання можна вивести на принтер або імпортувати в текстовий або графічний редактор для їхньої подальшої обробки.

Electronics Workbench дозволяє розмістити схему таким чином, щоб були чітко видно всі з'єднання елементів і одночасно вся схема цілком.

Програма використовує стандартний інтерфейс Windows, що значно полегшує її використання.

У програмі використовується великий набір приладів для проведення вимірювань: амперметр, вольтметр, осцилограф, мультиметр, Боде-Плоттер (графобудівник частотних характеристик схем), функціональний генератор, генератор слів, логічний аналізатор і логічний перетворювач.

Electronics Workbench дозволяє будувати схеми різного ступеня складності за допомогою наступних операцій:

- вибір елементів і приладів з бібліотек;
- переміщення елементів і схем у будь-яке місце робочого поля;
- поворот елементів і груп елементів на кути, кратні 90°;
- копіювання, вставка або видалення елементів, груп елементів, фрагментів схем і цілих схем;
- зміна кольору провідників;
- виділення кольором контурів схем для більш зручного сприйняття;
- одночасне підключення декількох вимірювальних приладів і спостереження їх показів на екрані монітора;
- присвоювання елементу умовної позначки;
- зміна параметрів елементів у широкому діапазоні тощо.

Усі операції проводяться за допомогою миші й клавіатури. Керування тільки із клавіатури неможливо.

Шляхом настроювання приладів можна:

- змінювати шкали приладів залежно від діапазону вимірів;
- задавати режим роботи приладу;
- задавати вид вхідних параметрів на схему (постійні й гармонійні струми й напруги, трикутні й прямокутні імпульси).

Графічні можливості програми дозволяють:

- одночасно спостерігати кілька кривих на графіку;
- відображати криві на графіках різними кольорами;
- вимірювати координати точок на графіку;
- імпортувати дані в графічний редактор, що дозволяє зробити необхідні перетворення рисунка й виведення його на принтер.

Electronics Workbench дозволяє використовувати результати, отримані в програмах PSpice, PCB, а також передавати результати на Electronics Workbench у ці програми. Можна вставити схему або її фрагмент у текстовий редактор і надрукувати в ньому пояснення або зауваження по роботі схеми.

1.1. Панель компонентів

Для операцій з компонентами на загальному полі Electronics Workbench виділено дві області: панель компонентів і поле компонентів.

Панель компонентів (рис. 1.1) складається з піктограм полів компонентів, поле компонентів – з умовних зображень компонентів.

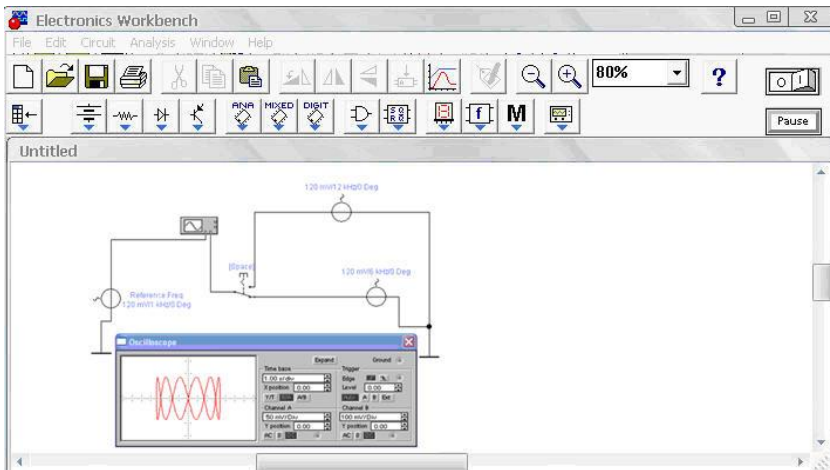


Рисунок 1.1- Панель компонентів

У бібліотеки елементів програми Electronics Workbench входять аналогові, цифрові й цифро-аналогові компоненти.

Усі компоненти можна умовно розбити на наступні групи:

- базові компоненти;
- джерела;
- лінійні компоненти;
- ключі;
- нелінійні компоненти;
- індикатори;
- логічні компоненти;
- вузли комбінаційного типу;
- вузли послідовного типу;
- гібридні компоненти.

1.2. Базові компоненти

З'єднуючий вузол

застосовується для з'єднання провідників і створення контрольних точок. До кожного вузла може приєднуватись не більш чотирьох провідників.

Заземлення.



Не всі схеми потребують заземлення для моделювання, однак будь-яка схема, що містить:

операційний підсилювач; трансформатор; кероване джерело; осцилограф, повинна бути обов'язково заземлена, інакше прилади не будуть робити вимірювань або їх покази виявляться неправильними.

Джерела. Усі джерела в **Electronics Workbench** ідеальні.

Некеровані джерела.

Джерело постійної напруги.



ЕРС джерела постійної напруги або батареї вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Батарея в Electronics Workbench має внутрішній опір, рівний нулю, тому, якщо необхідно використовувати дві паралельно підключені батареї, слід включити послідовно між ними невеликий опір (наприклад, в 1 Ом).

Джерело постійного струму.



Струм джерела постійного струму (direct current) вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).

Джерело змінної напруги.



Діюче значення напруги джерела вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Є можливість установки частоти й початкової фази.

Діюче значення напруги V_{RMS} , що виробляється джерелом змінної синусоїдальної напруги, пов'язане з його амплітудним значенням V_{PEAK} наступним співвідношенням –

$$V_{RMS} = \frac{V_{PEAK}}{\sqrt{2}}$$

Джерело змінного струму.



Діюче значення струму джерела вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).

Генератор тактових імпульсів



виробляє послідовність прямокутних імпульсів. Відлік амплітуди імпульсів генератора проводиться від виводу, протилежного виводу «+».

Керовані джерела

Джерело напруги, кероване напругою.



Відношення вихідної напруги до вхідної визначається коефіцієнтом

пропорційності E , який задається у мВ/В, і $E = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$ кВ/В:

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела; V_{IN} – вхідна напруга джерела.

Джерело струму, кероване напругою.



Відношення вихідного струму до керуючої напруги

– коефіцієнт G , вимірюється в одиницях провідності (1/Ом або сименс):

$$G = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}}$$

де I_{OUT} – вихідний струм джерела; V_{IN} – напруга, прикладена до керуючих затискачів джерела.

Джерело струму, кероване струмом.



Вхідний і вихідний струми зв'язані коефіцієнтом пропорційності F , який визначає відношення вихідного струму до струму і задається в мА/А,

$$F = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}}$$

де I_{OUT} – вихідний струм джерела; I_{IN} – вхідний струм джерела.

Джерело напруги, кероване струмом.



Передаючий опір H має розмірність опору й задається в мОм, Ом і

кОм:
$$H = \frac{V_{OUT}}{I_{IN}},$$

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела; I_{IN} – вхідний струм джерела.

Лінійні елементи.

Резистор.



Опір резистора вимірюється в Омах і задається похідними величинами (від Ом до Мом).

Змінний резистор.



Положення повзунка змінного резистора встановлюється за допомогою спеціального елемента – стрілки-регулятора. У діалоговому вікні можна встановити опір, початкове положення (у відсотках) і крок збільшення (також у відсотках). Є можливість змінювати положення повзунка за допомогою клавіш-ключів.

Використовувані клавіші-ключі:

- букви від А до Z;
- цифри від 0 до 9;

- клавіша Enter на клавіатурі;
- клавіша «пробіл».

Конденсатор.



Ємність конденсатора виміряється у Фарадах і задається похідними величинами (від пФ до Ф).

Змінний конденсатор.



Величину ємності встановлюють, використовуючи її початкове значення й значення коефіцієнта пропорційності.

Значення ємності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів.

Котушка індуктивності.



Індуктивність котушки (дроселя) виміряється в генрі й задається похідними величинами (від мкГн до Гн).

Котушка зі змінною індуктивністю.



Величину індуктивності цієї котушки встановлюють, використовуючи початкове значення її індуктивності й коефіцієнта пропорційності. Значення індуктивності може встановлюватися за допомогою клавіш-ключів.

Трансформатор



може бути виконаний з відводом середньої точки.

1.3. Прилади для проведення вимірювань

Найпростішими приладами в Electronics Workbench є вольтметр і амперметр, розташовані в полі індикаторів (Indicators), яке на панелі компонентів зображується значком



. Вони не вимагають налаштування, автоматично змінюючи діапазон вимірювань. В одній схемі можна застосовувати кілька таких приладів одночасно, спостерігаючи струми в різних вузлах і напруги на різних елементах.

Вольтметр

використовується для вимірювання змінної й постійної напруги. Виділена **товстою** лінією сторона прямокутника, що зображує вольтметр, **відповідає негативній клемі**.

Подвійним клацанням миші на зображенні вольтметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів вольтметра: виду вимірюваного напруги, величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться із клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваної напруги (опція Mode) вибирається зі списку.

При вимірюванні змінної синусоїдальної напруги (AC) вольтметр буде показувати діюче значення напруги U_d , обумовлене по формулі

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

де U_m – амплітудне значення напруги.

Внутрішній опір вольтметра 1 Мом, встановлений за замовчуванням, у більшості випадків становить дуже малий вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання вольтметра з дуже високим внутрішнім опором у схемах з низьким вихідним імпедансом може привести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

У якості вольтметра можна використовувати мультиметр.

**Амперметр**

використовується для вимірювання змінного й постійного струму. Виділена **товстою** лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, **відповідає негативній клемі**.

Подвійним клацанням миші на зображенні амперметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів амперметра: виду вимірюваного струму, величини внутрішнього опору.

Величина внутрішнього опору вводиться із клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваного струму (опція Mode) вибирається зі списку. При вимірюванні змінного синусоїдального струму (AC) амперметр буде показувати його діюче значення I_d :

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

де I_m – амплітудне значення струму.

Внутрішній опір 1 МОм, установлений за замовчуванням, у більшості випадків виявляє дуже малий вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання амперметра з дуже маленьким внутрішнім опором у схемах з високим вихідним імпедансом може привести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

У якості амперметра можна використовувати мультиметр.

Крім описаних амперметра й вольтметра в Electronics Workbench є сім приладів, із численними режимами роботи, кожен з яких можна використувати в схемі тільки один раз. Ці прилади розташовані на панелі приладів.

Ліворуч на панелі розташовані прилади для формування й спостереження аналогових величин: мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Боде-Плоттер:



Рисунок 1.2 - Мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Боде-Плоттер

Праворуч розташовані прилади для формування й спостереження логічних величин: генератор слів, логічний аналізатор, логічний перетворювач:

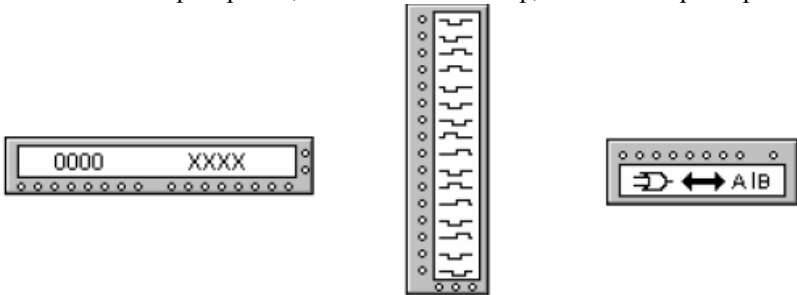


Рисунок 1.3

Мультиметр використовується для вимірювання: напруги (постійної й змінної), струму (постійного й змінного), опору, рівня напруги в децибелах.



Рисунок 1.4- Мультиметр

Для налаштування мультиметра потрібно подвійним клацанням миші на його зменшеному зображенні відкрити його збільшене зображення. На збільшеному зображенні натисканням лівої кнопки миші вибирається: вимірювана величина по одиницях вимірювання – A , V , Ω або db ; вид вимірюваного сигналу – змінний або постійний; режим установки параметрів мультиметра.

Установка виду вимірюваної величини проводиться натисканням відповідної кнопки на збільшеному зображенні мультиметра. Натискання кнопки із символом «~» встановлює мультиметр для вимірювання діючого значення змінного струму й напруги, постійна складова сигналу при вимірі не враховується. Для вимірювання постійних напруги й струму потрібно на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку із символом «—».

Для того, щоб використовувати мультиметр для вимірювань напруги, струму, опору або рівня напруги в децибелах, потрібно натиснути кнопку на збільшеному зображенні мультиметра: A , V , Ω або db відповідно.

У якості амперметра й вольтметра мультиметр використовується так само, як і стандартні прилади.

Мультиметр – єдиний в Electronics Workbench стандартний прилад, призначений для вимірювання опору. Для використання мультиметра в якості омметра його слід приєднати паралельно ділянці кола, опір якого потрібно виміряти, на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку Ω і кнопку із символом «—» перемикання в режим виміру постійного струму. Включити схему. На табло мультиметра при цьому з'явиться виміряне значення опору.

Щоб уникнути помилкових показів, схема повинна мати з'єднання із землею й не мати контакту із джерелами живлення, які повинні бути виключені зі схеми, причому ідеальне джерело струму повинне бути замінене розривом кола, а ідеальне джерело напруги – короткозамкненою ділянкою.

Для вимірювання рівня напруги в децибелах на збільшеному зображенні мультиметра слід натиснути кнопку db .

Мультиметр підключається одним з виводів до точки, рівень напруги в якій потрібно виміряти, а іншим виводом – до точки, щодо якої проводиться вимір. При вимірюванні рівня змінної напруги вимірюється рівень діючого значення.

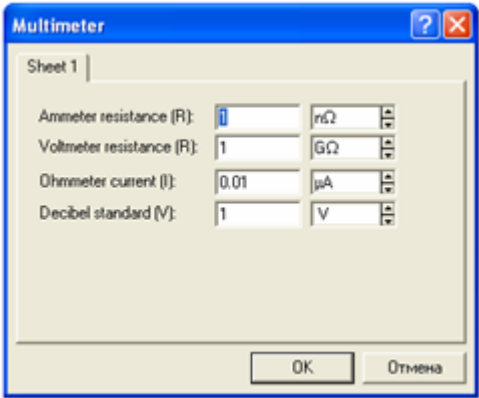


Рисунок 1.5- Налаштування мультиметра

Після включення схеми на табло мультиметра з'явиться виміряне значення рівня напруги. Рівень напруги в децибелах підраховується в такий спосіб:

$$dB = 20 \lg \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{оп}}},$$

де $U_{\text{вх}}$ – напруга, прикладена до виводів мультиметра; $U_{\text{оп}}$ – опорна напруга, стосовно якої вимірюється рівень напруги.

За замовчуванням опорна напруга встановлена рівною 1 В.

Клавішу *SETTINGS* слід використовувати для налаштування вхідного опору вольтметра, послідовного опору амперметра, вимірювального струму омметра, опорної напруги для відліку в децибелах.

Осцилограф,  в програмі Workbench, являє собою аналог двохпроменевого запам'ятовувального осцилографа й має дві модифікації: просту й розширену. Розширена модифікація по своїх можливостях наближається до кращих цифрових запам'ятовувальних осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження з простою моделлю, а для докладного дослідження процесів – використовувати розширену модель.

Осцилограф можна підключити до вже включеної схеми або під час роботи схеми переставити виводи до інших точок – зображення на екрані осцилографа зміниться автоматично.

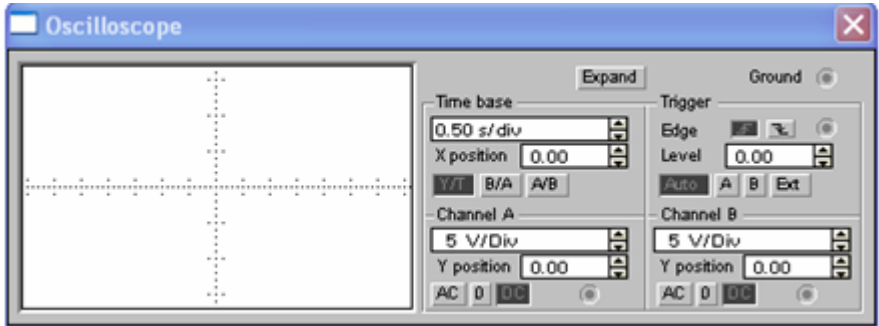


Рисунок 1.5- Осцилограф

Подвійним клацанням миші по зменшеному зображенню відкривається зображення передньої панелі простої моделі осцилографа із кнопками керування, інформаційними полями й екраном.

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно настроїти, для чого слід задати:

- 1) розташування осей, по яких відкладається сигнал;
- 2) потрібний масштаб розгортання по осях;
- 3) зсув початку координат по осях;
- 4) режим роботи із входу: закритий або відкритий;
- 5) режим синхронізації: внутрішній або зовнішній.

Настроювання осцилографа проводиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування.

Панель керування має загальний для обох модифікацій осцилографа вигляд і розділена на чотири поля керування:

- 1) горизонтальною розгорткою (*Time base*);
- 2) синхронізацією (*Trigger*);
- 3) каналом *A*;
- 4) каналом *B*.

Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) служить для завдання масштабу горизонтальної осі осцилографа при спостереженні напруги на входах каналів *A* і *B* залежно від часу. Часовий масштаб задається в: (s/div, ms/div, ms/div, ns/div відповідно). Величина однієї подлки може бути встановлена від 0,1 нс до 1 с. Масштаб може дискретно зменшуватися на один крок при клацанні мишею на кнопці праворуч від поля й збільшуватися при клацанні на кнопці . .

За допомогою кнопок, розташованих у полі рядка *X POS*, можна дискретно зсувати початок осцилограми по горизонтальній осі. У цій же полі розташовано три кнопки: *Y/T*, *A/B*, *B/A*, що дозволяють задавати вигляд залежності відображуваних сигналів. При натисканні на кнопку *Y/T* по вертикаль-

ній осі відкладається напруга, по горизонтальній осі – час, при натисканні на кнопки *A/Y* по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу *A*, по горизонтальній осі – каналу *B* при натисканні на кнопку *B/A* навпаки. При цьому масштаб осей визначається установками відповідних каналів. У режимах *A/Y* і *B/A* можна спостерігати частотні й фазові зрушення (фігури Ліссажу), петлі гістерезису, вольт-амперні характеристики і т.д.

Дві нижні частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів *A* і *B* відповідно.

Верхнє вікно в поле дозволяє управляти масштабом осі відображуваної напруги по вертикальній або горизонтальній осі. Ціна поділок може дискретно встановлюватися від 10 mV/div до 5 kV/div. Масштаб для кожної осі встановлюється окремо. Щоб одержати зручне для роботи зображення на екрані осцилографа перед початком експерименту, слід установити масштаб, відповідний до очікуваної напруги.

Нижче розташоване поле, яке дозволяє дискретно посувати вісь *X* вгору або вниз. Для того, щоб розвести зображення від каналів *A* і *B*, слід скористатися зсувом по осі *Y* (*Y POS*) для одного або двох каналів.

Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи входу осцилографа по входам. Режим роботи осцилографа із закритим входом встановлюється натисканням на кнопку *AC*. У цьому режимі на вхід не пропускається постійна складова сигналу. При натисканні на кнопку *DC* осцилограф переходить у режим з відкритим входом. У цьому режимі на вхід осцилографа пропускається як постійна, так і змінна складова сигналу. При натисканні на кнопку *0* вхід осцилографа з'єднується із загальним виводом осцилографа, що дозволяє визначити положення нульової оцінки по осі *Y*.

Верхнє праве поле керування *TRIGGER* визначає момент початку відображення осцилограми на екрані осцилографа. Кнопки в рядку *EDGE* задають момент запуску осцилограми по фронту або по зрізу імпульсу на вході синхронізації. Поле *LEVEL* дозволяє задавати рівень, при перевищенні якого відбувається запуск осцилограми. Значення рівня можна зсунути на три поділки вниз або нагору.

Осцилограф має чотири режими синхронізації.

1. Автоматичний режим (*AUTO*) – запуск осцилограми проводиться автоматично при підключенні осцилографа до схеми або при її включенні. Коли «промінь» доходить до кінця екрана, осцилограма знову прописується з початку екрана (новий екран).
2. Режим запуску по входу *A* або *B*, у яких сигналом, що запускає, є сигнал, що надходить на відповідний вхід.
3. Режим «Зовнішній запуск» (*EXT – external*). У цьому випадку сигналом запуску є сигнал, що подавався на вхід синхронізації.

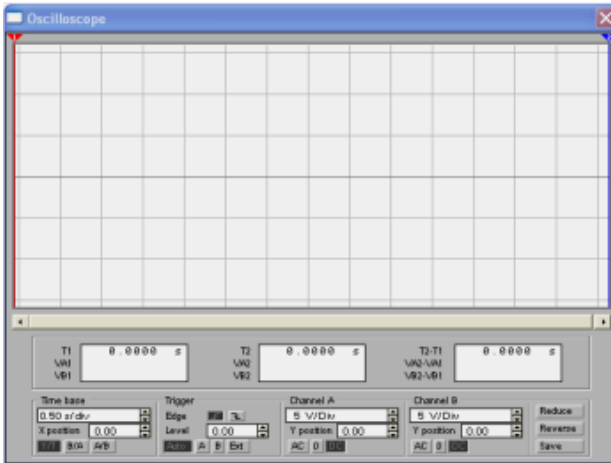


Рисунок 1.6- Вікно розширеної моделі осцилографа.

Натискання клавіші *Expand* на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа.

Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними таблицями, на які виводяться результати вимірювань. Крім того, безпосередньо під екраном перебуває лінійка прокручування, що дозволяє спостерігати будь-який часовий відрізок процесу від моменту включення до моменту вимикання схеми. По суті, розширена модель осцилографа -- це зовсім інший прилад, що дозволяє набагато зручніше й більш точно проводити чисельний аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовано два курсори, позначені 1 і 2, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруг у будь-якій точці осцилограми. Для цього слід просто перетягнути мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетинання першого курсору з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсору -- на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниць між відповідними координатами першого й другого курсорів. Результати вимірювань, отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл. Для цього слід натиснути кнопку *Save* (Зберегти) і в діалоговому вікні ввести ім'я файлу. Щоб повернутися до колишнього зображення осцилографа, слід натиснути клавішу *REDUCE*, розташовану в правому нижньому куті.



Функціональний генератор є ідеальним джерелом напруги, що виробляє сигнали синусоїдальної, прямокутної або

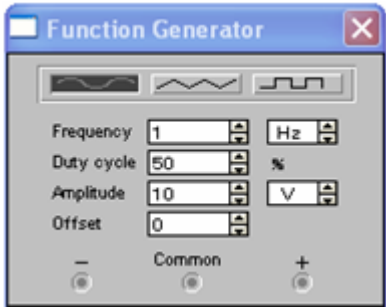


Рисунок 1.7- Функціональний генератор трикутної форми.

Середній вивід генератора при підключенні до схеми забезпечує загальну точку для вимірювання амплітуди змінної напруги. Для вимірювання напруги щодо нуля загальний вивід заземлюють.

Крайні правий і лівий виводи служать для подачі змінної напруги на схему. Напруга на правому виводі змінюється в позитивному напрямку щодо загального виводу, напруга на лівому виводі – у негативному. При подвійному клацанні мишею по зменшеному зображенню функціонального генератора відкривається його збільшене зображення.

1 Установка форми сигналу.

Вибрати необхідну форму вихідного сигналу й нажати на кнопку з відповідним зображенням. Форму трикутного й прямокутного сигналів можна змінити, зменшуючи або збільшуючи значення в полі *DUTY CYCLE*. Цей параметр визначається для сигналів трикутної й прямокутної форми. Для трикутної форми напруги він задає тривалість (у відсотках від періоду сигналу) між інтервалом наростання напруги й інтервалом спаду. Установивши, наприклад, значення 20, можна одержати тривалість інтервалу наростання 20 % від періоду, а тривалість інтервалу спаду – 80 %. Для прямокутної форми напруги цей параметр задає співвідношення між тривалостями позитивної й негативної частини періоду.

2 Установка частоти сигналу.

Частота генератора може регулюватися від 1 Hz до 999 Mhz. Значення частоти встановлюється в рядку *FREQUENCY* за допомогою клавіатури й кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця вимірювання (Hz, khz, Mhz – Гц, кГц, МГц відповідно).

3 Установка амплітуди вихідної напруги.

Амплітуда вихідної напруги може регулюватися від 0 мВ до 999 кВ. Значення амплітуди встановлюється в рядку *AMPLITUDE* за допомогою клавіатури й кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця виміру (μ V, mV, V, kV – мкВ, мВ, В, кВ відповідно).

4 Установка постійної складової вихідної напруги.

Постійна складова змінного сигналу встановлюється в рядку *OFFSET* за допомогою клавіатури або кнопок зі стрілками. Вона може мати як позитивне, так і негативне значення. Це дозволяє одержати, наприклад, послідовність однополярних імпульсів.

1.4. Моделювання схем

Electronics Workbench дозволяє будувати аналогові, цифрові й цифро-аналогові схеми різного ступеня складності.

Досліджувана схема збирається на робочому полі при одночасному використанні миші й клавіатури. Застосування в роботі тільки клавіатури неможливо. При побудові й редагуванні схем виконуються наступні операції:

- а) вибір компонента з бібліотеки компонентів;
- б) виділення об'єкта;
- в) переміщення об'єкта;
- г) копіювання об'єктів;
- д) видалення об'єктів;
- е) з'єднання компонентів схеми провідниками;
- ж) установка значень компонентів;
- з) підключення приладів.

Рисунок 1.8- Основна панель

Якщо схема не поміщається на екрані монітора, будь-яку її ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокручування, розташованих праворуч і під робочим полем. Після побудови схеми й підключення приладів аналіз її роботи починається після натискання вимикача в правому верхньому куті вікна програми.

Зробити паузу при роботі схеми можна натисканням кнопки Pause під вимикачем. Відновити процес можна повторним натисканням кнопки Pause. Повторне натискання вимикача в правому верхньому куті припиняє роботу схеми.

Вибір потрібного компонента проводиться з поля компонентів; потрібне поле компонентів вибирається натисканням лівої кнопки миші на одній з піктограм панелі компонентів. При цьому в поле компонентів з'являються зображення відповідних компонентів. Після вибору поля компонентів потрібний компонент за допомогою миші переміщується на робоче поле.

Виділення об'єкта здійснюється за допомогою миші (під об'єктом мається на увазі як один компонент, так і група компонентів). При виборі компонента потрібно встановити покажчик миші на потрібний компонент (при цьому зо-

браження покажчика зміниться на  й клацнути лівою кнопкою миші. Для вибору групи компонентів потрібно встановити покажчик миші в один з кутів прямокутної області, що містить групу, і, натиснувши ліву кнопку миші, розтягти рамку до необхідних розмірів, після чого відпустити кнопку. Обраний об'єкт змінює свій колір на червоний. Зняти виділення можна клацанням миші в будь-якій точці робочого поля.

Об'єкт можна повертати на кут, кратний 90° . Для цього об'єкт потрібно попередньо виділити, а потім вибрати команду *Rotate* з меню *Circuit*, нажати

Ctrl + R або на робочій панелі нажати кнопку . При цьому об'єкт повернеться на 90° за годинниковою стрілкою. При повороті групи компонентів на 90° повертається кожний компонент, а не вся група цілком.

Копіювання об'єктів здійснюється за допомогою команди з меню *Edit*, нати-

сканням *Ctrl + C* або на робочій панелі нажати кнопку . Перед копіюванням об'єкт потрібно виділити. Після виконання команди виділений об'єкт копіюється в буфер. Для вставки вмісту буфера на робоче поле потрібно вибрати команду *Paste* з меню *Edit*, нажати *Ctrl + V* або на робочій панелі нажа-

ти кнопку . Після виконання команди вміст буфера з'явиться на робочому полі й буде виділено кольором.

Видалення об'єкта здійснюється командами *Cut* (на робочій панелі кноп-

ка ) і *Delete*. Відмінність полягає в тому, що при виконанні команди *Cut* об'єкт вставляється в буфер і може бути потім вставлений назад на робоче поле, а при виконанні команди *Delete* об'єкт видаляється зовсім. Перед видаленням об'єкт також повинен бути виділений.

Для з'єднання компонентів провідниками потрібно підвести курсор миші до виводу компонента. При цьому на виводі компонента з'явиться більша чорна точка (див. рис. 1.9). Нажавши ліву кнопку миші, перемістіть її курсор до виводу компонента, з яким потрібно з'єднатися, і відпустіть кнопку миші. Виводи компонентів з'єднуються провідником.

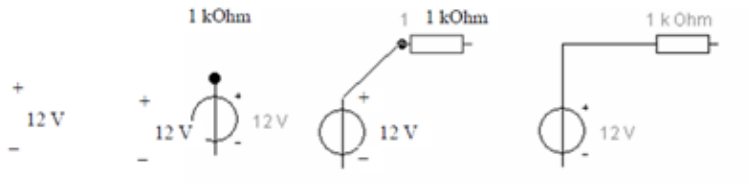


Рисунок 1.9- З'єднання компонентів

Усі провідники в Electronics Workbench за замовчуванням чорного кольору, але колір провідника можна змінити. Для цього потрібно подвійним клацанням на зображенні провідника відкрити вікно, наведене на рисунку, і у вікні мишею вибрати необхідний колір.

Якщо в схемі компоненти розміщені неакуратно, то може знадобитися спрямити провідники, що з'єднують компоненти. Це можна зробити, перемістивши компоненти так, щоб провідники відображалися прямими лініями. Після того, як схема побудована, можна вставити в неї додаткові компоненти. Для цього потрібно мишею перемістити компонент у необхідну точку схеми і, помістивши його над провідником, відпустити кнопку миші. Компонент автоматично вставиться в коло, як показано нижче на Рис.1.10.

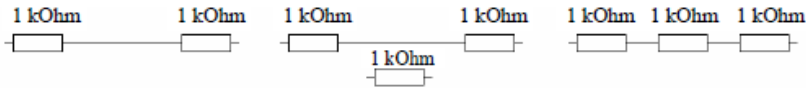


Рисунок 1.10 - З'єднання компонентів

Для успішного виконання лабораторних робіт необхідно до початку занять:

- прочитати опис чергової лабораторної роботи, повторити необхідні розділи теоретичного курсу по конспекту лекцій, даним методичним вказівкам і рекомендованій літературі, підготувати усні відповіді на контрольні запитання.
- підготувати бланк звіту, що повинен містити титульний аркуш (зразок наведено у додатку А), мету роботи, схеми та таблиці з розділу "Робоче завдання", виконано розрахунок завдання з розділу "Підготовча робота". Креслення повинні виконуватись із застосуванням креслярського приладдя у відповідності з вимогами Держстандарту України.

Під час лабораторної роботи необхідно:

- одержати дозвіл викладача на виконання лабораторної роботи.
- ознайомитися з робочим місцем, вимірювальними приладами, джерелами енергії, вимикачами та ін.

- скласти електричне коло. Провести необхідні виміри, результати вимірювань показати викладачеві.

Лабораторна робота вважається виконаю після того, як викладач зробив помітку у журнал.

- оформити роботу, захистити та здати викладачеві.

РОЗДІЛ 2

ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

2.1. Лабораторна робота №1. Дослідження роботи джерела електричної енергії в різних режимах

Мета роботи: ознайомитися з основними елементами електричного кола, експериментально одержати зовнішню характеристику джерела ЕРС, навчитися аналізувати роботу джерела енергії за допомогою зовнішньої характеристики та засвоїти енергетичні співвідношення в колі постійного струму в різних режимах.

2.1.1 Поняття про схему заміщення електричного пристрою

Електричне коло складається з активних та пасивних елементів, які з'єднані між собою проводами. Відрізняючись один від одного за призначенням, формою, розмірами та іншими ознаками, з електричної точки зору вони мають властивості, що описуються обмеженою кількістю параметрів.

Для розрахунку електричні кола уявляються у вигляді еквівалентних електричних схем заміщення.

У цих схемах кожний реальний елемент або пристрій представляється одним або декількома ідеальними елементами - математичними моделями. Ідеальних елементів усього декілька. Кожний ідеальний елемент заміщає собою яке-небудь одне явище або властивість реального об'єкта.

Елементів у схемах заміщення кіл постійного струму всього три:

- ідеальне джерело ЕРС (рис. 2.1,а) відображає здатність реального об'єкта створювати різницю потенціалів на своїх вихідних затисках і підтримувати струм у замкнутому електричному колі за допомогою сил неелектричного походження. Напруга на затисках ідеального джерела не залежить від сили струму, що протікає, і відповідає ЕРС цього джерела. ЕРС E , вимірюється у вольтах (В).



Рисунок 2.1 – Ідеальні елементи схем заміщення

- ідеальне джерело струму (рис. 2.1,б) відображає здатність реального об'єкта створювати різницю потенціалів на своїх вихідних затисках і підтримувати струм у замкнутому електричному колі за допомогою сил неелектри-

чного походження. Струм через ідеальне джерело не залежить від напруги на затискачах і відповідає силі струму цього джерела. Струм J , вимірюється в амперах (А).

- ідеальний резистивний елемент (рис. 2.1,а) відображає здатність реального об'єкта перетворювати електричну енергію в інші види енергії безповоротно, наприклад, у тепло. Опір R , вимірюється в омах (Ом).

2.1.2 Схеми заміщення реальних джерел електроенергії

Для реальних джерел електроенергії постійного струму необхідно враховувати два процеси:

- здатність створювати різницю потенціалів на своїх вихідних затискачах і викликати струм у замкненому електричному колі;
- внутрішнє тепловиділення при проходженні струму через джерело.

Тому, у схемах заміщення реального джерела енергії присутні два ідеальних елементи.

Розрізняють дві схеми заміщення реального джерела енергії:

- с послідовним з'єднанням ідеального джерела ЕРС і резистивного елемента (рис. 2.2,а).
- с паралельним з'єднанням ідеального джерела струму й резистивного елемента (рис. 2.2,б).

Резистивний елемент прийнятий називати внутрішнім опором.

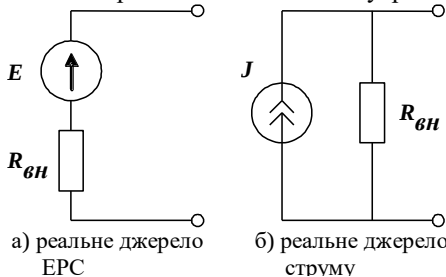


Рисунок 2.2 – Схеми заміщення реального джерела енергії

Застосування однієї із двох схем заміщення залежить від співвідношення між опором споживача R_{cn} й внутрішнім опором джерела $R_{вн}$. Якщо $R_{cn} \gg R_{вн}$, то напруга на вихідних затискачах джерела електроенергії мало змінюється при зміні струму навантаження. У цьому випадку використовується схема заміщення у вигляді реального джерела ЕРС (рис. 2.2,а). Якщо $R_{cn} \ll R_{вн}$, то струм навантаження мало змінюється при зміні напруги

на вихідних затискачах джерела електроенергії. У цьому випадку використовується схема заміщення у вигляді реального джерела струму (рис. 2.2,б).

Як правило, у схемах заміщення електротехнічних пристроїв застосовується схема заміщення джерела ЕРС, у радіотехнічних пристроях - схема заміщення джерела струму.

Між параметрами схем заміщення джерел електроенергії існує наступне співвідношення

$$E = JR_{вн}. \quad (2.1)$$

2.1.3 Зовнішня характеристика джерела електроенергії

Зовнішня характеристика джерела електроенергії являє собою залежність напруги на вихідних затискачах від струму, що проходить через джерело. Зовнішня характеристика, є вольтамперною характеристикою (ВАХ) джерела.

Джерело із прямолінійної ВАХ є лінійним (рис. 2.3).

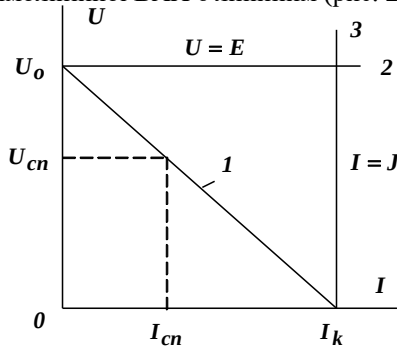


Рисунок 2.3 - Зовнішні характеристики джерел енергії

ВАХ реального джерела являє собою похилу пряму, що проходить через дві крайні точки: при $I = 0$ - це напруга холостого ходу U_0 , при $U = 0$ - це струм короткого замикання I_k (пряма 1 на рис. 2.3). Її рівняння має вигляд

$$U = U_0 - IR_{вн}, \quad (2.2)$$

де $R_{вн} = \frac{U_0}{I_k}$.

На цій основі, з використанням другого закону Кірхгофа, можна побудувати електричну схему заміщення з послідовним з'єднанням ідеального

джерела й внутрішнього опору (рис.2.4а). Стан схеми заміщення можна описати рівнянням

$$U = E - IR_{\text{вн}}. \quad (2.3)$$

Для того щоб перейти до схеми заміщення з паралельним з'єднанням ідеального джерела й внутрішнього опору (рис.2.4б) перепишемо рівняння (2.2) у вигляді

$$I = I_k - \frac{U}{R_{\text{вн}}} = I_k - UG_{\text{вн}}, \quad (2.4)$$

де $G_{\text{вн}} = \frac{I_k}{U_0}$ - внутрішня електрична провідність джерела, Ом^{-1} .

Стан схеми заміщення можна описати рівнянням

$$I = J - \frac{U}{R_{\text{вн}}} = J - UG_{\text{вн}}. \quad (2.5)$$

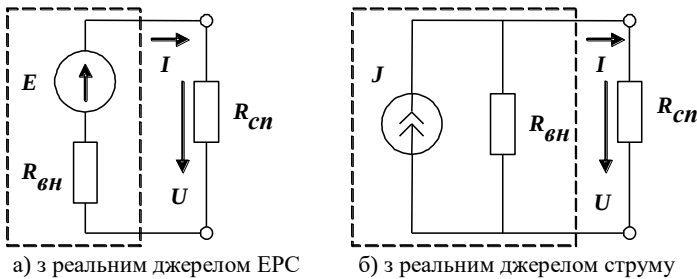


Рисунок 2.4 – Схеми заміщення джерела енергії та споживача

ВАХ ідеального джерела ЕРС являє собою горизонтальну пряму $U = E$ (пряма 2 на рис. 2.3), а ВАХ ідеального джерела - вертикальну пряму $I = J$ (пряма 3 на рис. 2.3). Внутрішній опір ідеального джерела ЕРС дорівнює нулю $R_{\text{вн}} = 0$, Внутрішній опір ідеального джерела напруги дорівнює нескінченності $R_{\text{вн}} = \infty$.

2.1.4 Основні розрахункові співвідношення в нерозгалуженому колі постійного струму

Основні розрахункові співвідношення в системі джерело-споживач, що утворюють нерозгалужене електричне коло (рис. 2.4а):

- струм на основі закону Ома з урахуванням послідовного з'єднання елементів кола

$$I = \frac{E}{R_{\text{вн}} + R_{\text{сн}}} ; \quad (2.6)$$

- напруга на вихідних затискачах джерела й на навантаженні на підставі другого закону Кірхгофа

$$U = E - R_{\text{вн}} I = R_{\text{сн}} I ; \quad (2.7)$$

- спад напруги усередині джерела

$$\Delta U = R_{\text{вн}} I ; \quad (1.8)$$

- потужність джерела, що характеризує швидкість перетворення неелектричної енергії в електричну

$$P_{\text{дж}} = EI = \frac{E^2}{R_{\text{вн}} + R_{\text{сн}}} ; \quad (2.9)$$

- потужність, що віддається в навантаження й характеризує швидкість перетворення електричної енергії в інші види енергії (теплову, механічну, світлову й т.д.)

$$P_{\text{сн}} = UI = R_{\text{сн}} I^2 = \frac{R_{\text{сн}} E^2}{(R_{\text{вн}} + R_{\text{сн}})^2} ; \quad (1.10)$$

- втрати потужності усередині джерела, які йдуть на його нагрів

$$\Delta P = P_{\text{дж}} - P_{\text{сн}} = R_{\text{вн}} I^2 ; \quad (2.11)$$

- коефіцієнт корисної дії джерела (ККД)

$$\eta = \frac{P_{\text{сн}}}{P_{\text{дж}}} = \frac{R_{\text{сн}}}{R_{\text{вн}} + R_{\text{сн}}} . \quad (2.12)$$

2.1.5 Режими роботи джерела електроенергії

При величині навантаження, що змінюється, роботу джерела (рис. 2.4а) оцінюють за допомогою його характеристик. Характеристики джерела електроенергії одержують, змінюючи величину опору навантаження $0 \leq R_{\text{сн}} < \infty$. Звичайно прийнято брати як аргумент струм і розглядати характеристики $U(I)$, $P_{\text{сн}}(I)$, $P_{\text{дж}}(I)$, $\eta(I)$.

Електричне коло залежно від опору навантаження може перебувати в різних режимах, серед яких виділяються декілька характерних: режим холостого ходу, режим короткого замикання, номінальний режим, режим погодженого навантаження.

Режим холостого ходу – режим, при якому навантаження відключене ($R_{cn} = \infty$). Струм навантаження відсутній $I = 0$. Напруга на вихідних затискачах джерела $U = U_o = E$ (напруга холостого ходу). Цю обставину використовують для виміру ЕРС джерела. $P_{cn} = 0$, $P_{дж} = 0$, $\eta \rightarrow 1$.

Режим короткого замикання – режим, при якому затискачі джерела замкнуті накоротко ($R_{cn} = 0$). Струм через джерело досягає максимального значення $I = I_k = E/R_{вн}$ (струм короткого замикання), а напруги на його затискачах $U = 0$. Вся енергія, що виробляється джерелом, перетворюється в тепло всередині нього $P_{дж} = R_{вн} I_k^2 = E^2/R_{вн}$. Це може призвести до перегріву й пошкодження джерела. $P_{cn} = 0$, $\eta = 0$.

Режим погодженого навантаження – режим, при якому від даного джерела може бути отримана максимальна можлива потужність $P_{дж}$.

Для знаходження максимуму функції $P_{cn}(R_{вн})$ (2.10) беремо похідну й дорівнюємо її нулю $\frac{dP_{cn}}{dR_{вн}} = 0$. Вирішуючи отримане рівняння, маємо умову погодженого навантаження $R_{cn} = R_{вн}$. У цьому режимі $I = 0.5 I_k$, $U = 0.5 E$, $P_{дж} = E^2/2R_{вн}$, $P_{cn} = E^2/4R_{вн}$, $\eta = 0.5$.

Номінальний режим - режим найбільш ефективної роботи, при якому мають місце ті значення струму й напруги, які встановлює розроблювач. При номінальному струмі, напрузі й потужності забезпечується економічне виробництво й споживання електроенергії, гарантується термін служби, що зазначений заводом виготовлювачем. Точка номінального режиму не має фіксованої позиції, а залежить від конкретних вимог, які пред'являються до джерела. Якщо виходять із потреби одержання досить високих значень ККД, то точка номінального режиму розташована ближче до режиму холостого ходу. Якщо від даного джерела треба передати в навантаження максимальну потужність, то номінальний режим збігається з режимом погодженого навантаження. При необхідності одержання граничних значень струму точка номінального режиму знаходиться поблизу точки короткого замикання.

На рис. 2.5 представлені графіки характеристик джерела електроенергії.

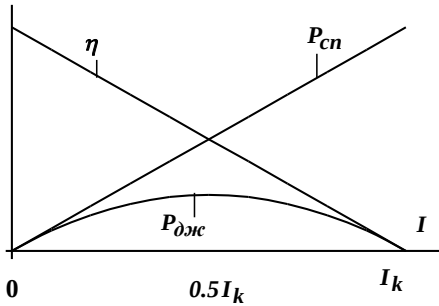


Рисунок 2.5 - Графіки характеристик джерела електроенергії

2.1.6 Порядок проведення підготовчої роботи

2.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

2.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схеми електричного кола (рис. 2.6), та таблиця 2.1. Зразок титульного листа наведено у додатку А.

2.1.7 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді використовуються:

- джерело постійного струму **E1**;
- змінний резистор **R8** та постійний резистор **R6**;
- вольтметр магнітоелектричної системи **V1**;
- амперметр магнітоелектричної системи **A1**.

2.1.8 Порядок проведення роботи

2.1.8.1 Дослід неробочого ходу

Умовно прийняти, що внутрішній опір джерела ЕРС дорівнює опорі резистора **R6**. Скласти електричне коло за схемою рис. 2.6. Задати значення опору $R_6 = 1 \text{ МОм}$ (неробочий хід).

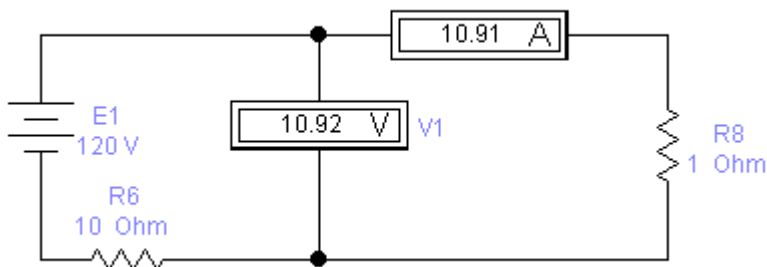


Рисунок 2.6 – Схеми електричних кіл

Увімкнути джерел постійного ЕРС **E1** та виміряти напругу неробочого ходу - U_o . Результати вимірювання занести в табл. 2.1. Вимикнути тумблер **S**.

Таблиця 2.1 - Результати експериментів

Режими		Режим неробочого ходу	Робочі режими				Режим короткого замикання
Виміряно	№ дослідіу	1	2	3	4	5	6
	U , В						
	I , мА						
Обчислено	$P_{дж}$, Вт						
	$P_{сн}$, Вт						
	η , в.о.						

2.1.8.2 Зняття зовнішньої характеристики джерела ЕРС та дослід короткого замикання

Скласти електричне коло за схемою (рис. 2.6). Змінити його опір **R8**, провести 3...4 досліді. При значенню резистора **R8** = 0 маємо дослід короткого замикання. Кожного разу вимірювати струм та напругу, результати заносити у табл. 2.1.

2.1.9 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

2.1.9.1 За результатами дослідів неробочого ходу та короткого замикання обчислити внутрішній опір джерела (1.2).

2.1.9.2 Побудувати графіки зовнішніх характеристик для реального та ідеального джерела ЕРС.

2.1.9.3 Записати зовнішню характеристику досліджуваного реального джерела ЕРС.

2.1.9.4 Обчислити потужність джерела, потужність споживача і ККД за даними вимірювань. Результати розрахунків занести в таблицю 1.1.

2.1.9.5 Обчислити опір навантаження та струм для узгодженого режиму.

2.1.9.6 Побудувати на однім полі графіки залежностей $P_{\text{сн}}(I)$, $P_{\text{дж}}(I)$, $\eta(I)$.

2.1.9.7 Зробити висновки по роботі.

2.1.10 Контрольні запитання

- а) Дайте визначення параметрів R та E .
- б) Дайте визначення електричного кола.
- в) Які елементи називаються ідеальними?
- г) Що таке схема заміщення?
- д) Зобразіть схеми заміщення реального джерела електроенергії у вигляді джерела струму та ЕРС. У яких випадках вони застосовуються?
- е) Поясніть, як виконується закон збереження енергії в електричному колі постійного струму.
- ж) Як обчислити потужність джерела та споживача?
- з) Дайте характеристику режимам роботи джерела ЕРС.
- і) Доведіть, що при узгодженому режимі потужність споживача максимальна.
- ї) Дати визначення зовнішньої характеристики джерела електроенергії.
- к) Вивести рівняння зовнішньої характеристики джерела ЕРС

2.2. Лабораторна робота №2. Дослідження розгалуженого електричного кола з декількома джерелами ЕРС

Мета роботи: оволодіти методикою застосування законів Кірхгофа до перевірки результатів вимірювань, засвоїти методику аналізу стану електричного кола за допомогою потенційної діаграми.

2.2.1 Короткі теоретичні відомості

2.2.1.1 Основні визначення

Вітка – частина електричного кола (схеми заміщення), удовж якої струм у будь який момент має одне й теж значення. Вітка складається з одного або декількох елементів.

Вузол – місце з'єднання декількох віток.

Замкнутий контур – замкнутий шлях вздовж електричного кола (схеми заміщення), на якому жодний елемент не повторюється.

За додатний напрям струму прийнято напрям руху позитивних зарядів. На початку розрахунку треба довільно задати умовно додатні напрями струму (напруги). Дійсний напрям струму визначається знаком, який одержано після розрахунку. При негативному значенні струму його напрям протилежний раніше заданому.

Додатний напрям ЕРС джерела береться від мінусового до плюсового затискачів (тобто співпадає з напрямом дії сил неелектричного походження). Стрілка ЕРС вказує на затискач з більшим потенціалом. Додатний напрям струму в джерелі електроенергії збігається з напрямом ЕРС. Додатний напрям напруги на джерелі ЕРС протилежний напрямом ЕРС, а на резисторах збігається з напрямом струму.

2.2.1.2 Закони Кірхгофа для кіл постійного струму

Перший закон Кірхгофа. Алгебраїчна сума струмів віток, які сходяться у вузли, дорівнює нулю:

$$\sum_{j=1}^n I_j = 0, \quad (2.13)$$

де I_j - струм j -тої вітки.

При цьому струми, які направлені до вузла, беруться додатними, а струми, які направлені від вузла – від'ємними.

Так для вузла на Рис. 2.7а маємо $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$.

Другий закон Кірхгофа. У будь-якому замкнутому контурі розгалуженого електричного кола постійного струму алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі спадів напруг в усіх резистивних елементах контуру:

$$\sum_{j=1}^n E_j = \sum_{j=1}^n R_j I_j, \quad (2.14)$$

де E_j , R_j - відповідно ЕРС і опір j -тої вітки.

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа напрям обходу контуру береться довільно. Спад напруги та ЕРС приймаються додатними, якщо напрямки струмів та ЕРС збігаються з напрямком обходу контуру. В іншому випадку вони приймаються від'ємними.

Наприклад, для замкнутого контуру на Рисунок 2.7б маємо $E_1 - E_3 = R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4$ (напрямок обходу за годинною стрілкою).

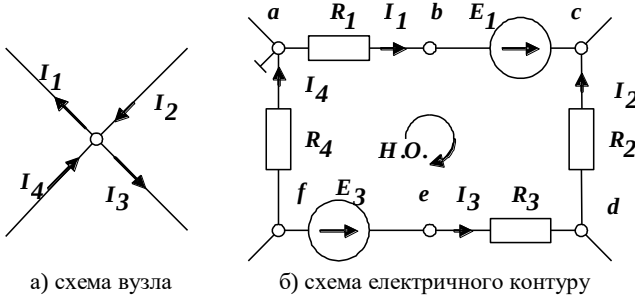


Рисунок 2.7- Частини електричних кіл для запису законів Кірхгофа

Вирішування системи рівнянь за законами Кірхгофа є універсальний метод для обчислення струмів у вітках розгалуженого електричного кола з декількома джерелами енергії. Загальна кількість рівнянь відповідає кількості невідомих струмів, тобто кількості віток до яких не входять джерела струму. За першим законом складається кількість незалежних рівнянь на одиницю менше ніж кількість вузлів у колі. Решту рівнянь складають за другим законом Кірхгофа для контурів, використовуючи всі вітки кола без джерел струму.

2.2.1.3 Потенційна діаграма

Потенціалу однієї довільної точки електричного кола можна надавати будь-якого значення, зокрема нульового. В електротехніці за нульовий потенціал прийнято потенціал Землі. Тому подання деякій точці нульового потенціалу рівнозначно її заземленню (поєднанню з Землею).

Потенційна діаграма – це графік розподілу потенціалів уздовж будь-якого шляху по ділянках електричного кола (або його схеми заміщення). Потенційна діаграма будується в прямокутній системі координат. Для кола постійного струму у довільному масштабі по осі абсцис відкладаються значення опорів ділянок (кожний наступний із кінця попереднього), а по осі ординат – потенціали точок, що позначають межі ділянок. Точка, що прийнята за початок відліку, розміщується у початку координат. Точки, що відповідають потенціалам поєднують між собою ламаною лінією. Потенційна діаграма, яка побудована для замкнутого кола, є графічною ілюстрацією другого закону Кірхгофа. Її можна побудувати як за даними вимірювань, так і за результатами розрахунків, якщо відомі значення струмів, ЕРС та опорів.

Побудуємо, наприклад, потенційну діаграму для замкнутого контуру схема якого зображена на рис. 2.76. Приймаємо що потенціал точки *a* дорівнює нулю. При побудові вважаємо, що обрані напрямки струмів співпадають з дійсними. Потенціали точок обчислюємо за наступними формулами:

$$\begin{aligned}
 \varphi_a &= 0; \\
 \varphi_b &= \varphi_a - R_1 I_1; \\
 \varphi_c &= \varphi_b + E_1; \\
 \varphi_d &= \varphi_c + R_2 I_2; \\
 \varphi_e &= \varphi_d + R_3 I_3; \\
 \varphi_f &= \varphi_e - E_3; \\
 \varphi_a &= \varphi_f - R_4 I_4 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

Обчислення останнього потенціалу є перевірочним.

Потенційна діаграма для цього випадку наведена на рис. 2.8.

По потенційній діаграмі можна визначити напругу між будь-якими двома точками як проекцію між цими точками на ось ординат. Тангенс куту нахилу відрізка ламаної лінії, що відповідає ділянці з опором, пропорційний струму на цій ділянці. Це легко довести, якщо розглянути, наприклад, прямокутний трикутник з катетами *R₁* та *U_{ab}*

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_U U_{cd}}{m_R R_2} = I_2 \frac{m_U}{m_R}, \quad (2.16)$$

де m_U , m_R - відповідно масштаби напруги та опору.

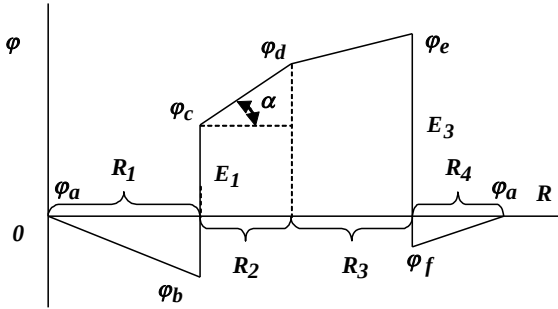


Рисунок 2.8 – Потенційна діаграма

2.2.1.4 Енергетичний баланс

При протіканні струмів по резистивним елементах в останніх виділяється тепло. На підставі закону збереження енергії кількість теплоти, що виділяється в одиницю часу в резистивних елементах, повинне рівнятися енергії, що віддається в коло джерелами енергії.

Якщо фактичний напрямок струму, що протікає через джерело ЕРС, збігається з напрямком джерела, то джерело віддає в одиницю часу в коло енергію (потужність), що дорівнює EI . Якщо ж фактичний напрямок струму зустрічний напрямку ЕРС, то джерело споживає енергію з кола (наприклад, при зарядці акумулятора).

Коли в колі є джерела струму, при складанні енергетичного балансу необхідно врахувати енергію, що віддається в коло джерелами струму. Нехай джерело струму спрямоване від вузла **b** до вузла **a**. Тоді джерело струму віддає в одиницю часу в коло енергію, що дорівнює $JU_{ab} = JU_J$.

Загальний вигляд рівняння енергетичного балансу

$$\sum_{k=1}^n I_k^2 R_k = \sum_{k=1}^n E_k I_k + \sum_{k=1}^n J_k U_{J_k}, \quad (2.17)$$

2.2.2 Порядок проведення підготовчої роботи

2.2.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

2.2.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (рис. 3.4) та таблиці 3.1 та 3.3 та розрахунок за п. 3.2.3.

2.2.2.3 Розрахувати у EWB електричне коло (рис. 2.9) за допомогою законів Кірхгофа, якщо задано:

$$E_1 = 10 \text{ В}, E_2 = 5 \text{ В},$$

$$R_1 = 350 + 10n \text{ Ом}, R_2 = 1500 + 100n \text{ Ом},$$

$$R_3 = 1500 + 200n \text{ Ом}, R_4 = 50 + 5n \text{ Ом},$$

де n – номер, що задається викладачем.

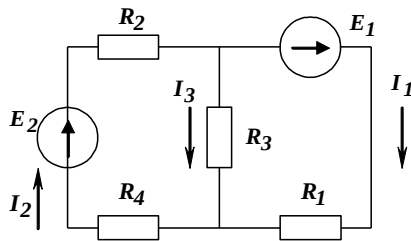


Рисунок 2.9 - Розрахункова схема

2.2.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи використовуються:

- джерела постійних ЕРС E_1 та E_2 ;
- постійні резистори R_1 , R_2 , R_5 , R_9 ;
- вольтметр магнітоелектричної системи V_1 ;
- амперметри магнітоелектричної системи A_1 , A_2 .

2.2.4 Порядок проведення роботи

2.2.4.1 Скласти у EWB електричне коло за схемою Рис. 3.4. Увімкнути тумблери джерел ЕРС E_1 та E_2 . Виміряти струми у вітках I_1 , I_2 , спади напруг на резисторах U_1 , U_4 , U_5 , U_9 , ЕРС джерел енергії E_1 , E_2 (джерела ЕРС вважати ідеальними). Результати вимірювань занести в табл. 3.1.

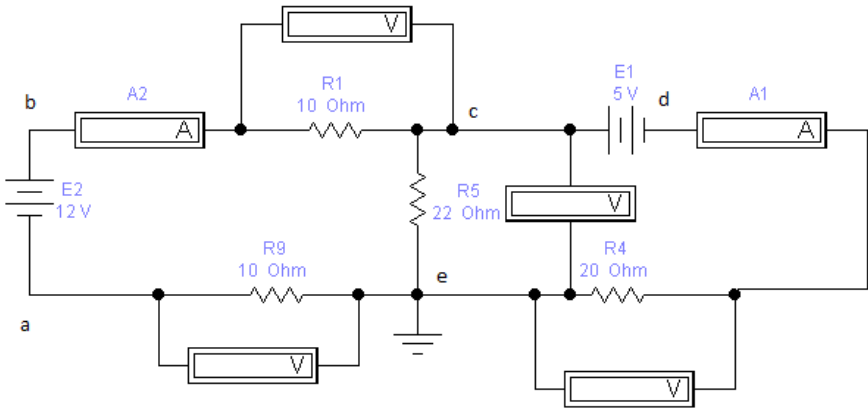


Рисунок 2.10 – Схема досліджуваного електричного кола у EWB

Таблиця 3.1 - Результати експерименту

$E_1, \text{В}$	$E_2, \text{В}$	$I_1, \text{мА}$	$I_2, \text{мА}$	$I_5, \text{мА}$	$U_1, \text{В}$	$U_4, \text{В}$	$U_5, \text{В}$	$U_9, \text{В}$

2.2.4.2 Виміряти потенціали вузлів кола, які позначені на схемі (Рис. 2.10). Умовно вважати заземленим вузол кола, згідно таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Вузли, які вважаються заземленими

№ у списку (остання цифра)	1	2	3	4	5	6
Назва вузла	a	b	c	d	e	a

Щоб виміряти потенціали негативний затискач вольтметра V_1 з'єднати з вузлом заземлення, а позитивний затискач по черзі з'єднати з іншими вузлами. Результати занести в таблицю 2.3.

Таблиця 3.3 - Потенціали вузлів електричного кола

Назва вузла	a	b	c	d	e
Потенціали вузлів, В					

2.2.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

2.2.5.1 Розрахувати струм I_5 за першим законом Кірхгофа

$$I_5 = I_1 - I_2.$$

2.2.5.2 Скласти рівняння за другим законам Кірхгофа для зовнішнього контуру електричного кола (Рис. 2.10) та перевірити результати дослідів. Спадом напруги на амперметрах нехтувати.

2.2.5.3 Обчислити опори резистивних елементів R_1 , R_4 , R_5 , R_9 за законом Ома

$$R_k = \frac{U_k}{I_k}$$

2.2.5.3 Побудувати потенційну діаграму для зовнішнього контуру електричного кола.

2.2.5.5 Перевірити результати дослідів шляхом складання балансу потужностей.

2.2.5.6 Зробити висновки по роботі.

2.2.6 Контрольні запитання

- Що таке вузол, вітка, контур електричного кола?
- Сформулюйте перший та другий закони Кірхгофа.
- Як визначаються знаки членів рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа?
- Що таке потенційна діаграма?
- Від чого залежить нахил прямих на потенційній діаграмі?
- Як визначити напругу між двома вузлами електричного контуру за допомогою потенційної діаграми?
- Що прийнято за умовно позитивні напрямки струму, ЕРС, напруги?
- Як по заданій потенційній діаграмі скласти схему електричного кола?

- і) Як по заданій потенційній діаграмі визначити струм, що протікає по ділянці кола?
- ї) Що таке потенціал, напруга?
- к) Яка різниця між вимірюванням потенціалу й напруги?
- л) Сформулюйте принцип балансу потужностей. Як його використовують для перевірки розрахунків?

2.3 Лабораторна робота №3. Дослідження активного лінійного двополюсника

Мета роботи: ознайомитися з параметрами та характеристиками двополюсника, навчитися експериментально їх отримувати.

2.3.1 Короткі теоретичні відомості

У будь-якій схемі електричного кола завжди можна подумки виділити одну вітку, а всю іншу частину схеми незалежно від її складності умовно зобразити деяким прямокутником. Стосовно виділеної вітки вся інша частина схеми являє собою двополюсник.

Двополюсник - це узагальнена назва будь-якої частини електричного кола, що має два затискача. Двополюсник на схемах умовно зображується прямокутником.

Якщо двополюсник містить у собі джерела енергії, які не компенсують один одного, то такий двополюсник називають активним й у прямокутнику, його що зображує ставлять букву *A* (Рис. 2.11, а).

Активний двополюсник характеризується трьома взаємозалежними параметрами: напругою неробочого ходу U_o , струмом короткого замикання I_k й вхідним опором R_{ex} .

$$U_o = I_k R_{ex} . \quad (2.18)$$

Активний двополюсник можна замінити або еквівалентним джерелом ЕРС, ЕРС якого дорівнює напрузі неробочого ходу на затискачах двополюсника, а внутрішній опір дорівнює вхідному опору двополюсника, або джерелом струму, струм якого дорівнює струму короткого замикання двополюсника, а внутрішній опір дорівнює вхідному опору двополюсника.

Вхідний опір двополюсника щодо затискачів розраховують при усуненні з розрахункової схеми всіх джерел енергії (вітки з ідеальними джерелами струму розриваються, а ідеальні джерела ЕРС у вітках замикаються).

Струм короткого замикання й напруга холостого ходу визначаються будь-яким розрахунковим методом.

Параметри двополюсника можуть бути визначені експериментально по досвідах неробочого ходу (до затискачів двополюсника підключається вольтметр) і короткого замикання (до затискачів двополюсника підключається амперметр). Вхідний опір у цьому випадку визначається з рівняння (2.18).

Якщо у двополюснику відсутні джерела енергії або вони компенсують один одного джерела енергії, то такий двополюсник називають пасивним, а в прямокутнику, його що зображує ставлять букву **П** (Рис. 2.11, б). Пасивний двополюсник характеризується тільки одним параметром – внутрішнім опором $R_{вн}$. Напруга неробочого ходу U_o й струм короткого замикання I_k такого двополюсника дорівнюють нулю.

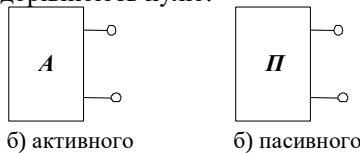


Рисунок 2.11 - Позначення двополюсників на електричних схемах

2.3.2 Порядок проведення підготовчої роботи

3.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

3.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (Рис. 2.12), таблиця 3.1 та розрахунок за п. 3.2.3.

3.2.3 Розрахувати напругу неробочого ходу U_o , струм короткого замикання I_k й вхідний опір $R_{вх}$ двополюсника, схема якого наведена на Рис. 2.12, якщо задано

$$E = 10 \text{ В}, R_1 = 10 + n \text{ Ом}, R_2 = 25 + 2n \text{ Ом},$$

$$R_3 = 20 - 2n \text{ Ом}, R_4 = 20 + 4n \text{ Ом}, R_5 = 20 - 3n \text{ Ом},$$

де n – номер у списку групи.

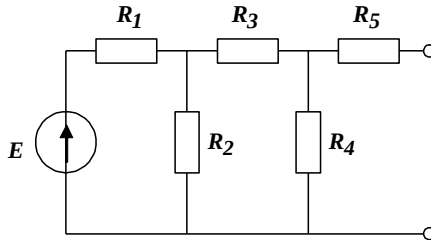


Рисунок 2.12 - Розрахункова схема

Зробити перевірку розрахунку за допомогою рівняння (2.18).

2.3.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді використовуються:

- джерела постійного ЕРС $E1$;
- постійні резистори $R1$, $R2$, $R3$, $R4$, $R5$, $R9$;
- змінний резистор $R8$;
- вольтметр магнітоелектричної системи $V1$;
- міліамперметри магнітоелектричної системи $A1$, $A2$.

2.3.4 Порядок проведення роботи

2.3.4.1 Скласти у EWB електричне коло за схемою рис. 2.13.

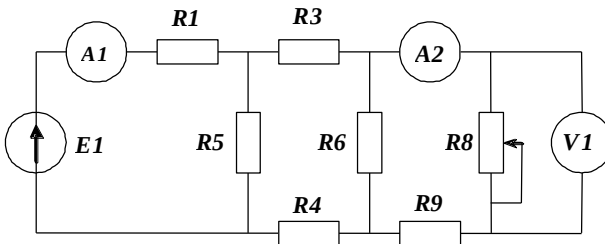


Рисунок 2.13 - Схема досліджуваного електричного кола

2.3.4.2 Дослід неробочого ходу. Вважати резистор навантаження $R8 = 1$ МОм. Увімкнути тумблер джерела ЕРС $E1$. Виміряти струми у віт-

ках I_1 , I_2 , напругу неробочого ходу двополюсника. Результати вимірювань занести в табл. 3.1. Вимкнути тумблер джерела ЕРС **E1**.

Таблиця 3.1 - Результати експерименту

Параметр	Дослід н.х.	1	2	3	4	Дослід к.з.
Напруга, В						
Струм I_1 , мА						
Струм I_2 , мА						
Опір навантаження, Ом						
Потужність джерела, Вт						
Потужність навантаження, Вт						
к.к.д., в.о.						

2.3.4.3. Підключити резистор навантаження **R8**. Увімкнути тумблер джерела ЕРС **E1**. Змінюючи опір навантаження шляхом обертання ручки змінного резистору **R8**, виміряти струми у вітках I_1 , I_2 , спад напруги на резисторі навантаження. Результати вимірювань занести в табл. 3.1. Вимкнути тумблер джерела ЕРС **E1**.

2.3.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

2.3.5.1 Визначити вхідний опір двополюсника

$$R_{вх} = \frac{U_o}{I_k} \cdot 10^{-3}, \text{ Ом.}$$

2.3.5.2 За законом Ома розрахувати опір навантаження для кожного режиму

$$R_n = \frac{U_8}{I_2} \cdot 10^{-3}, \text{ Ом.}$$

Результати занести в табл. 3.1.

2.3.5.3. Визначити потужності еквівалентного джерела ЕРС та навантаження, ККД еквівалентного джерела

$$P_{дж} = U_o I_2 \cdot 10^3, \text{ Вт;}$$

$$P_n = U_8 I_2 \cdot 10^3, \text{ Вт;}$$

$$\eta = \frac{P_H}{P_{дж}}, \text{ в.о.}$$

Результати занести в табл. 3.1.

2.3.5.4 Побудувати графік залежності $I_2 = f(I_1)$, зробити висновки про лінійність двополюсника.

2.3.5.5. Побудувати графіки залежностей $P_{дж} = f(R_H)$, $P_H = f(R_H)$, $\eta = f(R_H)$.

2.3.6 Контрольні запитання

2.3.6.1 Дати визначення лінійного двополюсника?

2.3.6.2 Як експериментально визначити вхідний опір двополюсника?

2.3.6.3 При якому опорі навантаження у ній виділяється максимальна потужність?

2.3.6.4 Пояснити, які двополюсники є активними, а які пасивними?

2.3.6.5 Як знайти параметри двополюсника?

2.4 Лабораторна робота №4. Особливості роботи електричних кіл синусоїдного струму

Мета роботи: ознайомитися з особливостями роботи електричних кіл синусоїдного струму придбати навички аналізу таких кіл за допомогою векторних діаграм; вивчити декілька способів визначення кута зсуву фаз.

2.4.1 Короткі теоретичні відомості

2.4.1.1 Особливості електромагнітних процесів в електричних колах синусоїдного струму

В електричних колах синусоїдного струму електричні величини ЕРС, напруга та струм є синусоїдними функціями часу

$$\begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \psi_e); \\ u &= U_m \sin(\omega t + \psi_u); \\ i &= I_m \sin(\omega t + \psi_i). \end{aligned} \quad (2.19)$$

де E_m, U_m, I_m - амплітудні значення;

ψ_e, ψ_m, ψ_i - початкові фази;

ω - кутова (кругова) частота.

Основні прояви електромагнітного поля в прийमाх електричної енергії - пасивних елементах кіл:

- електричний струм нагріває провідник;
- змінне магнітне коло збуджує ЕРС самоіндукції;
- змінне електричне поле в діелектрику індукує електричний струм зміщення.

Ці фізичні явища в заступних схемах відображаються ідеальними пасивними елементами: резистивним, індуктивним та ємнісним. Закон Ома, що встановлює залежність напруги від струму для кожного з цих елементів відповідно має вигляд

$$\begin{aligned} u_R &= Ri = RI_m \sin(\omega t + \psi_i); \\ u_L &= L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \sin(\omega t + \psi_i + \frac{\pi}{2}); \\ u_C &= \frac{1}{C} \int i dt = \frac{1}{C\omega} I_m \sin(\omega t + \psi_i - \frac{\pi}{2}). \end{aligned} \quad (2.20)$$

де L – індуктивність, Гн;

C – ємність, Ф.

Таким чином напруга на індуктивному елементі випереджає струм по фазі на чверть періоду, а на ємнісному відстає на чверть періоду. В резистивному елементі струм та напруга співпадають за фазою. За аналогією з активним опором R величини

$$\begin{aligned} X_L &= \omega L; \\ X_C &= \frac{1}{\omega C}. \end{aligned} \quad (2.21)$$

називаються реактивними опорами (відповідно індуктивним та реактивним).

При розрахунках та вимірюваннях прийнято використовувати діючі значення синусоїдних величин

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2.22)$$

При розрахунках в електричних колах синусоїдного струму треба брати до уваги не тільки амплітудні (діючі) значення електричних величин, але й їх початкові фази. Це зручно робити за допомогою так званих комплексів амплітуд (діючих значень)

$$\underline{E}_m = E_m e^{j\psi_e}; \underline{U}_m = U_m e^{j\psi_u}; \underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i}; \quad (2.23)$$

$$\text{або } \underline{E} = E e^{j\psi_e}; \underline{U} = U e^{j\psi_u}; \underline{I} = I e^{j\psi_i}.$$

Звідси випливає поняття комплексного опору (імпедансу)

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z e^{j\varphi} = R + j(X_L - X_C) \quad (2.24)$$

де φ - фазовий зсув між напругою та струмом на ділянці, де визначається повний опір.

2.4.1.2 Векторні діаграми

ЕРС, напруга та струм – це скалярні величини, але для наочності та зручності їх можна зображати радіус-векторами. Довжина вектора дорівнює амплітудному (діючому) значенню, а кут відносно горизонтальної осі – початковій фазі. Позитивні кути відраховують проти годинної стрілки. Сукупність векторів, що зображують струми та напруги одного електричного кола, називають векторною діаграмою.

Фазовий зсув між струмом і напругою на ділянці відкладається на діаграмі від вектора струму до вектора напруги.

Векторні діаграми можна будувати двома засобами:

- за даними обчислення струмів та напруг в комплексній формі діаграма будується на комплексній площині;

- за даними вимірювань треба спочатку якийсь струм чи напругу за основу побудови, прийняти його початкову фазу за нуль та відкласти відповідний вектор горизонтально. Наприклад, при послідовному з'єднанні за основу зручно прийняти вектор струму, який є однаковим для всіх елементів.

Векторні діаграми для окремих елементів електричного кола синусоїдного струму наведені на Рис. 2.14.

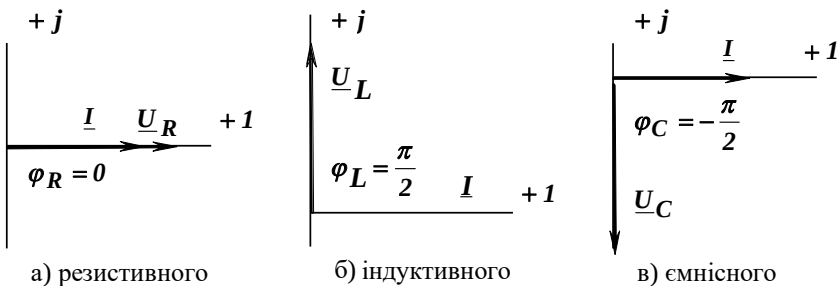


Рисунок 2.14 – Векторні діаграми елементів кола

Якщо вектори напруг на окремих елементах або ділянках кола зображують в такому ж порядку (наступний з кінця попереднього), як ці ділянки поєднуються одна з одною, діаграму називають топографічною. За її допомогою зручно визначати напругу між двома довільними точками електричного кола як відстань між цими точками на діаграмі.

2.4.1.3 Послідовне поєднання двох ідеальних елементів

При послідовному поєднанні двох резистивних елементів комплекс струму згідно закону Ома

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{R}_1 + \underline{R}_2} \quad (2.25)$$

Згідно другого закону Кірхгофа

$$\underline{U} = \underline{U}_{R1} + \underline{U}_{R2} = \underline{I}R_1 + \underline{I}R_2 \quad (2.26)$$

Векторна діаграма для випадку послідовно поєднаних резистивного елементів наведена на Рис. 2.15а.

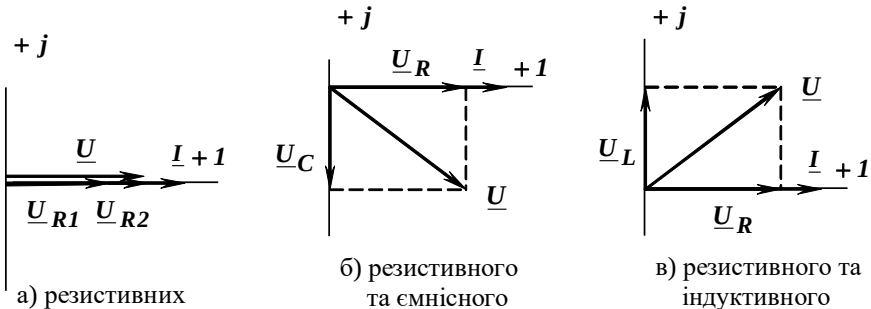


Рисунок 2.15 – Векторні діаграми для двох послідовно поєднаних елементів

При послідовному поєднанні резистивного та ємнісного елементів комплекс струму згідно закону Ома

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{R} - jX_C} \quad (2.27)$$

Згідно другого закону Кірхгофа

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_C = \underline{I}R - j\underline{I}X_C \quad (2.28)$$

Векторна діаграма для випадку послідовно поєднаних резистивного та ємнісного елементів наведена на Рис. 2.15б.

При послідовному поєднанні резистивного та індуктивного елементів комплекс струму згідно закону Ома

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{R} + jX_L} \quad (2.29)$$

Згідно другого закону Кірхгофа

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = \underline{I}R + j\underline{I}X_L \quad (2.30)$$

Векторна діаграма для випадку послідовно поєднаних резистивного та індуктивного елементів наведена на Рис. 2.15в.

На двох останніх векторних діаграмах утворилися прямокутні трикутники, які мають назву трикутника напруг. З трикутників напруг діюче значення повної напруги для двох послідовно поєднаних активного та реактивного елементів

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{U_R^2 + U_C^2}, \\ U &= \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.4.1.4 Енергетичні співвідношення в колі синусоїдного струму

В електричному колі постійного струму електрична енергія перетворюється в споживачах безповоротно перетворюється в інші види енергії. Швидкість цих перетворень характеризується активною потужністю P . Вони відбуваються також і в колі синусоїдного струму. В колах синусоїдного струму відбувається обмін енергією між електромагнітним полем джерела та споживачів, а також між магнітним і електричним полем споживачів. Швидкість цих перетворень характеризується реактивною потужністю Q . Окрім активної та реактивної потужностей використовують поняття повної потужності S . Ця потужність використовується для оцінки загальних можливостей електричного кола. Номінальні параметри пристроїв змінного струму задаються звичайно повною потужністю.

$$\begin{aligned} P &= \sum_{k=1}^n P_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 R_k \\ Q &= Q_L - Q_C = \sum_{k=1}^n Q_{L_k} - \sum_{k=1}^n Q_{C_k} = \sum_{k=1}^n I_k^2 (X_{L_k} - X_{C_k}) \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \end{aligned} \quad (2.32)$$

2.4.1.5 Заступна схема котушки індуктивності

Котушка індуктивності в електричних колах використовується для створення магнітного поля. Під час проходження по ній струму вона нагрівається. Отже її заступна схема складається з двох елементів: резистивного та індуктивного (Рис. 2.16). Тому виміряти напругу тільки на індуктивному або резистивному елементі неможливо. Якщо підмикнути вольтметр до затискачів котушки індуктивності, то він покаже значення повної напруги

$$U_k = \sqrt{U_{Rk}^2 + U_L^2} \quad (2.33)$$

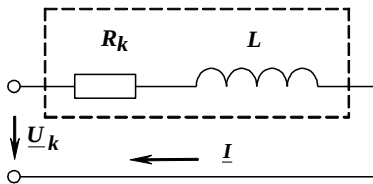


Рисунок 2.16 – Заступна схема індуктивної котушки

2.4.1.6 Методи визначення кутів зсуву фаз

Існують методи безпосереднього вимірювання куту зсуву фаз за допомогою спеціальних приладів. Коли таких приладів немає у наявності використовують скісні методи визначення куту зсуву фаз

Для двох послідовно поєднаних ідеального реактивного та активного елементів досить виміряти спади напруг на цих елементах

$$\varphi = \pm \arctg \frac{U_X}{U_R} = \pm \arccos \frac{U_R}{U} \quad (2.34)$$

де U_X - спад напруги на реактивному елементі.

Якщо виміряні струм, повна напруга та активна потужність для двох послідовно поєднаних ідеального реактивного та активного елементів, то кут зсуву

$$\varphi = \pm \arccos \frac{P}{UI} \quad (2.35)$$

У формулах (4.13, 4.14) знак "+" відповідає поєднанню індуктивного та резистивного елементів, знак "-" – ємнісного та резистивного.

У випадку двох послідовно поєднаних активного елементів та котушки індуктивності (Рис.2.17а) використовують графічний метод "зарубок". Для цього потрібно побудувати векторну діаграму (Рис. 2.17б).

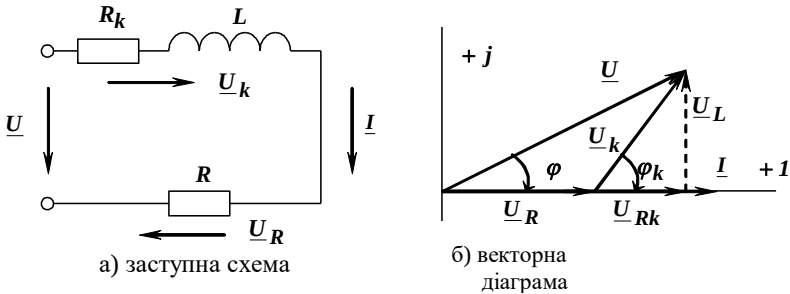


Рисунок 2.17 – Коло з активним елементом і котушкою індуктивності

З початку координат відкладаємо вектор струму $\underline{I}$, потім будемо у масштабі вектор спаду напруги на активному елементі $\underline{U}_R$ (він збігається за напрямком з вектором струму). Далі радіусом U у масштабі з центру координат креслимо дугу. Потім радіусом U_k з кінця вектора $\underline{U}_R$ робимо зарубку на дузі. Вийшов косокутний трикутник з кутом зсуву фаз φ . Цей кут зсуву можна визначити за теоремою косинусів

$$U_k^2 = U^2 + U_R^2 - 2U \cdot U_R \cos \varphi \quad (2.36)$$

2.4.2 Порядок проведення підготовчої роботи

2.4.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

2.4.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схеми електричних кіл (Рис. 2.18, 2.19), таблиці 4.1, 4.2 та розрахунок за п. 2.4.2.3.

2.4.2.3 Розрахувати кут зсуву фаз φ , повний Z_k , активний R_k , індуктивний опори X_L котушки індуктивності, активну, реактивну та повну потужності електричного кола схема якого наведена на Рис. 2.17, якщо задано:

$$U = 100 \text{ В}, U_R = U_k = 50 + 10n \text{ В}, I = 0.1n \text{ А},$$

де n – номер бригади, що задається викладачем.

2.4.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи використовуються:

- джерело синусоїдного струму (затискачі А та В);
- постійний резистор **R14**;
- котушка індуктивності **L1**;
- блок конденсаторів **C3-C7**;
- вольтметри електромагнітної системи **V3**, **V4**;
- амперметр електромагнітної системи **A5**;
- ватметр електродинамічної системи **W1**.

2.4.4 Порядок проведення роботи

2.4.4.1 Скласти електричне коло за схемою Рис. 2.18. Конденсатор вибрати згідно вказівки викладача.

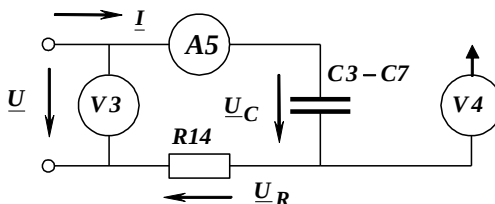


Рисунок 2.18 – Схема кола з послідовним поєднанням резистора та конденсатора

Увімкнути за допомогою автомату на стенді джерело синусоїдного струму. Виміряти напругу джерела енергії U , спади напруг на резисторі U_R та конденсаторі U_C (за допомогою вольтметра **V4**), струм I . Результати вимірювань занести в табл. 4.1. Вимкнути джерело енергії за допомогою автомата. Результати експериментів показати викладачеві.

Таблиця 4.1 – Результати експерименту за п.4.4.1

Виміряно				Обчислено							
U , В	U_R , В	U_C , В	I , А	U , В	Z , Ом	R , Ом	X_C , Ом	φ , град	S , ВА	P , Вт	Q , ВАр

2.4.4.2 Скласти електричне коло за схемою Рис. 4.6. Запросити викладача для перевірки вірності складання електричного кола.

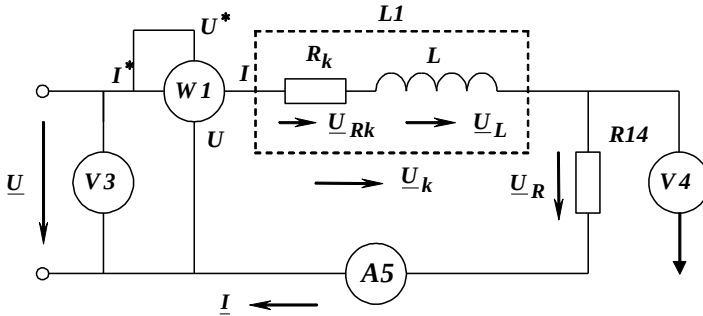


Рисунок 2.19 - Схема кола з послідовним поєднанням резистора та котушки індуктивності

Увімкнути за допомогою автомату на стенді джерело синусоїдного струму. Виміряти напругу джерела енергії U , спади напруг на резисторі U_R та котушці індуктивності U_k (за допомогою вольтметра $V4$), струм I , активну потужність P . Результати вимірювань занести в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати експерименту за п.4.4.2

Виміряно					Обчислено							
U , В	U_R , В	U_k , В	I , А	P , Вт	Z , Ом	φ , град	R_{14} , Ом	Z_k , Ом	R_k , Ом	X_L , Ом	φ_k , град	

2.4.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

2.4.5.1 За результатами першого експерименту (п.4.4.1, табл. 4.1) зробити перевірку правильності вимірювань: $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$ та розрахувати:

- повний опір: $Z = U / I$, Ом;
- активний опір: $R = U_R / I$, Ом;
- реактивний (ємнісний) опір: $X_C = U_C / I$, Ом;
- кут зсуву фаз: $\varphi = -\arccos \frac{R}{Z} = -\arctg \frac{X_C}{R}$, град;
- повну потужність: $S = UI$, ВА
- активну потужність: $P = S \cos \varphi$, Вт;

- реактивну (ємнісну) потужність: $Q = S \sin \varphi$, Вар.

Результати розрахунків занести в таблицю 4.1 і побудувати векторну діаграму.

2.4.5.2 За результатами другого експерименту (п.4.4.2, табл. 4.2) розрахувати:

- повний опір: $Z = U / I$, Ом;

- кут зсуву фаз: $\varphi = \arccos \frac{P}{UI}$, град;

- активний опір резистора: $R_{14} = U_R / I$, Ом;

- повний опір котушки індуктивності: $Z_k = U_k / I$, Ом;

- реактивний (індуктивний) опір: $X_L = Z \sin \varphi$

- активний опір котушки індуктивності: $R_k = \sqrt{Z_k^2 - X_L^2}$

- кут зсуву фаз у котушці індуктивності: $\varphi_k = \arccos \frac{R_k}{Z_k}$, град.

Результати розрахунків занести в таблицю 4.2 і побудувати векторну діаграму.

2.4.6 Контрольні запитання

2.4.6.1 Що таке кут зсуву фаз? Від чого він залежить?

2.4.6.2 Як поведуть себе резистивні, ємнісні та індуктивні елементи в колах постійного та синусоїдного струму?

2.4.6.3 Які скісні засоби визначення кута зсуву фаз ви знаєте?

2.4.6.4 Що таке векторна діаграма, з якою метою її будують?

2.4.6.5 Що таке трикутник напруг, у якому випадку він прямокутний?

2.4.6.6 Що таке метод "зарубок", коли він використовується?

2.5. Лабораторна робота №5. Дослідження нерозгалуженого електричного кола синусоїдного струму

Мета роботи: оволодіти методикою застосування другого закону Кірхгофа до аналізу нерозгалужених електричних кіл синусоїдного струму; придбати навички аналізу таких кіл за допомогою векторних діаграм; ознайомитися з особливостями роботи електричного кола при послідовному сполученні котушки індуктивності та конденсатора.

2.5.1 Короткі теоретичні відомості

2.5.1.1 Послідовне з'єднання елементів в електричному колі синусоїдного струму

При послідовному з'єднанні резистивного, індуктивного та ємнісного елементів (Рис. 2.20) струм у всіх елементах однаковий, а геометрична сума діючих значень напруг на окремих елементах дорівнює діючому значенню напруги на вході схеми.

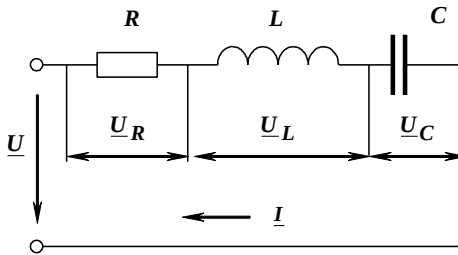


Рисунок 2.20 – Послідовне поєднання резистивного, індуктивного та ємнісного елементів

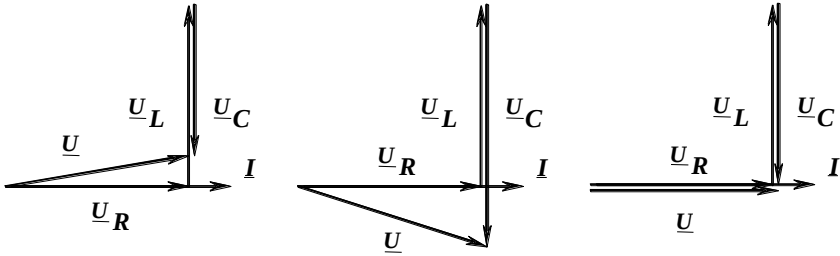
Закон Ома для діючих значень напруги та струму має вигляд

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{U}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{\underline{U}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (2.37)$$

Другий закон Кірхгофа у комплексній формі

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = (R + jX_L - jX_C) \underline{I} = \underline{Z} \underline{I} \quad (2.38)$$

Побудуємо векторні діаграми для різних режимів роботи електричного кола (Рис. 2.21).



а) активно-індуктивному б) активно-ємнісному в) режим резонансу напруг

Рисунок 2.21 – Векторні діаграми при різних режимах роботи кола

У випадку, коли $X_L > X_C$, струм відстає від загальної напруги ($\varphi > 0$), характер навантаження активно-індуктивний (Рис. 2.21, а) У випадку, коли $X_L < X_C$, струм випереджає загальну напругу ($\varphi < 0$), характер навантаження активно-ємнісний (Рис. 2.21, б).

2.5.1. Режим резонансу напруг

У випадку, коли $X_L = X_C$ у колі має місце резонанс напруг. Повний опір кола буде дорівнюватися активному незважаючи на наявність індуктивного та ємнісного елементів, а струм досягає найбільшого значення та співпадає за фазою з загальною напругою (Рис. 2.21, в).

Резонансна частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.39)$$

У режимі резонансу напруга на індуктивному та ємнісному елементах може значно перевершувати загальну напругу. Співвідношення напруги на ємнісному елементі або рівної їй напруги на індуктивному елементі до загальної напруги називають коефіцієнтом резонансу або добротністю контуру

$$D = \frac{U_C}{U} = \frac{U_L}{U} = \frac{X_C I}{RI} = \frac{X_C}{R} = \frac{\rho}{R} \quad (2.40)$$

де $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - хвильовий опір кола.

2.5.2 Порядок проведення підготовчої роботи

2.5.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

2.5.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (Рис. 2.22), таблиця 5.1 та розрахунок за п. 5.2.3.

2.5.2.3 Розрахувати струм та спади напруг на елементах кола, схема якого наведена на Рис. 2.20, побудувати векторну діаграму, якщо задано

$U = 10$ В, $R = 10 + n$ Ом, $X_L = 25 - 3n$ Ом, $X_C = 20 + 2n$ Ом, де n – номер бригади, що задається викладачем.

2.5.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді використовуються:

- джерело ЕРС синусоїдного струму (затискачі A , B на стенді);
- котушки індуктивності $L1$, $L2$;
- батарея конденсаторів $C3 - C7$;
- вольтметри електромагнітної системи $V3$, $V4$;
- амперметр електромагнітної системи $A5$,
- ватметр електродинамічної системи $W1$.

2.5.4 Порядок проведення роботи

2.5.4.1 Скласти електричне коло за схемою Рис. 2.22.

2.5.4.2 Увімкнути стенд і виміряти потужність P , спад напруг на котушках індуктивності та конденсаторі, струм по чергово підключаючи конденсатори $C4$, $C5$, $C6$, $C7$. Результати вимірювань занести в табл. 5.1.

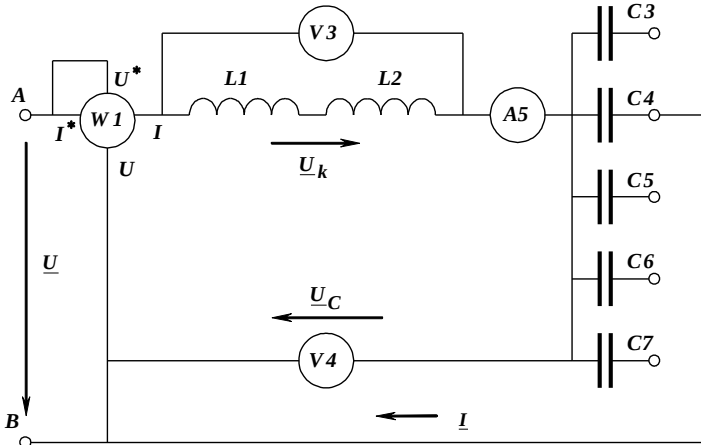


Рисунок 2.22 – Схема нерозгалуженого електричного кола

Таблиця 5.1 - Результати експерименту

C_i	Виміряно				Обчислено									
	U_C , В	P , Вт	U_k , В	I , А	Z , Ом	X_C , Ом	Z_k , Ом	R_k , Ом	X_L , Ом	U_R , В	U_L , В	S , ВА	Q , вар	$\cos \varphi$
C4														
C5														
C6														
C7														

5.4.3 Підключити вольтметр **V3** до затискачів джерела ЕРС синусоїдного струму. Увімкнути стенд і виміряти напругу на затискачах джерела ЕРС.

2.5.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

2.5.5.1 По результатам кожного експерименту розрахувати:

- повний опір електричного кола - $Z = \frac{U}{I}$;

- опір конденсатора - $X_C = \frac{U_C}{I}$;

- повний опір котушки індуктивності - $Z_k = \frac{U_k}{I}$;
- активний опір котушки - $R_k = \frac{P}{I^2}$;
- індуктивний опір котушки - $X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$;
- активну складову спаду напруги на котушці - $U_R = R_k I$;
- реактивну складову спаду напруги на котушці - $U_L = X_L I$;
- повну потужність електричного кола - $S = UI$;
- реактивну потужність електричного кола - $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$;
- коефіцієнт потужності електричного кола - $\cos \varphi = \frac{P}{S}$.

Результати розрахунку занести у таблицю 5.1.

2.5.5.2 Використовуючи розрахунки, побудувати векторні діаграми в одному масштабі для кожного експерименту. Показати на діаграмах спад напруги на кожному елементі кола, на вході кола та на котушці індуктивності.

2.5.5.3 Визначити характер навантаження для кожного експерименту.

2.5.5.4 Визначити який з експериментів найбільше відповідає режиму резонансу напруг.

2.5.5.5 Побудувати на однім полі графіки залежностей $I = f_1(X_C)$, $Z = f_2(X_C)$, $U_L = f_3(X_C)$, $U_C = f_4(X_C)$, $\cos \varphi = f_5(X_C)$.

2.5.6 Контрольні запитання

2.5.6.1 Які кути зсуву фаз дають резистивний, індуктивний і ємнісний елементи?

2.5.6.2 Чім пояснюються фазові зсуви між струмами та напругами і як їх треба урахувати при аналізі кіл синусоїдального струму?

2.5.6.3 Що таке векторна діаграма електричного струму, з якою метою її будують?

2.5.6.4 Як по векторній діаграмі визначити фазові зсуви?

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

2.5.6.6 Що таке реактивна і повна потужності? Як їх обчислити?

2.5.6.7 Що таке коефіцієнт потужності?

2.5.6.8 Що таке резонанс напруг, в яких електричних колах він можливий?

2.5.6.9 Умова резонансу напруг.

2.5.6.10 Які властивості режиму резонансу напруг?

2.5.6.11 Що таке хвильовий опір, добротність електричного кола?

2.5.6.12 Що таке діюче значення синусоїдального струму?

2.5.6.13 Який характер навантаження може бути в колі в залежності від співвідношення між значеннями R , L , C ?

2.6 Лабораторна робота №6. Дослідження розгалуженого електричного кола синусоїдного струму

Мета роботи: ознайомитися з особливостями роботи електричного кола при паралельному сполученні котушки індуктивності та конденсатора, навчитися методики розрахунків цих кіл, побудування векторних діаграм.

2.6.1 Короткі теоретичні відомості

2.6.1.1 Основні співвідношення в електричному колі при паралельному сполученні споживачів

При паралельному сполученні споживачів за першим законом Кірхгофа миттєве значення загального струму в нерозгалуженій частині електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень струмів кожного споживача (Рис.2.23)

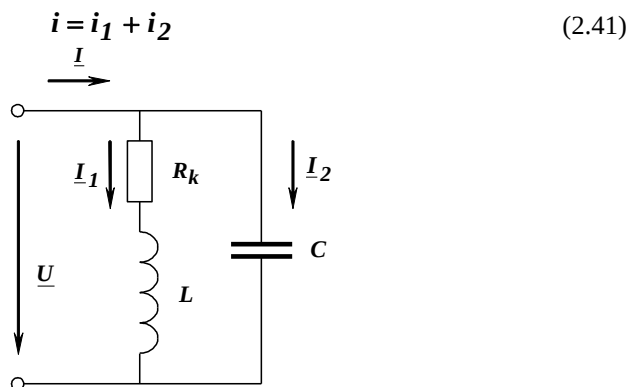


Рисунок 2.23 - Схема розгалуженого електричного кола

Комплекс струму у вітці, що складається з котушки індуктивності

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1}, \quad (2.42)$$

де $\underline{Z}_1 = R_k + jX_L$ - комплексний опір реальної котушки індуктивності.

Струм вітці, що складається з конденсатора

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_2} \quad (2.43)$$

де $\underline{Z}_2 = -jX_L$ - комплексний опір конденсатора.

Струм у кожній вітці дорівнює геометричній сумі реактивної та активної складових

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \frac{\underline{U}}{R_k + jX_L} \cdot \frac{R_k - jX_L}{R_k - jX_L} = \left(\frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2} - j \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} \right) \underline{U} = \\ &= (G_1 - jB_L) \underline{U} = \underline{Y}_1 \underline{U} \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{-jX_C} \cdot \frac{jX_C}{jX_C} = j \frac{1}{X_C} \underline{U} = jB_C \underline{U} = \underline{Y}_2 \underline{U}$$

де $G_1 = \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2}$ - активна провідність першої вітки;

$B_L = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2}$ - реактивна провідність першої вітки;

$B_C = \frac{1}{X_C}$ - реактивна провідність другої вітки;

$\underline{Y}_1, \underline{Y}_2$ - комплекси повної провідності відповідно першої та другої віток.

Струм у нерозгалуженій частині кола дорівнює геометричній сумі струмів окремих споживачів

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = (G_1 - j(B_L - B_C)) \underline{U} = (G - jB) \underline{U} = \underline{Y} \cdot \underline{U} \quad (2.45)$$

де $G = G_1$ - активна провідність кола;

$B = B_L - B_C$ - реактивна провідність кола;

$\underline{Y}$ - комплекс повної провідності кола.

В залежності від співвідношення реактивних провідностей першої та другої віток електричного кола (Рисунок 6.1) навантаження може набувати різного характеру

- активно-індуктивного при $B_L > B_C$;
- активно-ємнісного при $B_L < B_C$;
- активного при $B_L = B_C$.

Побудуємо векторні діаграми для різних режимів роботи електричного кола (Рис. 2.24).

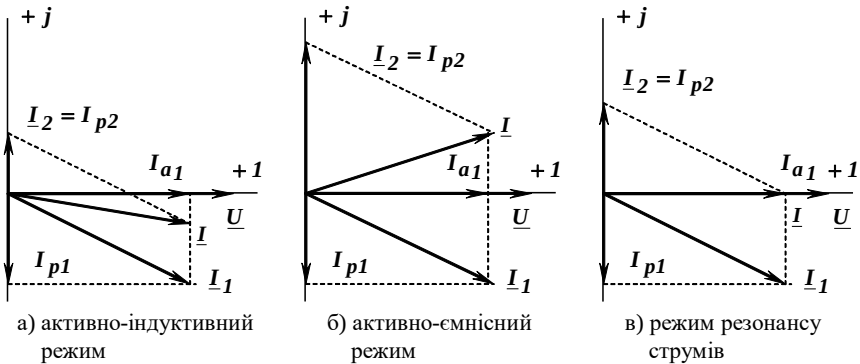


Рисунок 2.24 – Векторні діаграми при різних режимах роботи кола

У випадку, коли $B_L > B_C$, струм відстає від загальної напруги ($\varphi > 0$), характер навантаження активно-індуктивний (Рис. 2.24, а) У випадку, коли $B_L < B_C$, струм випереджає загальну напругу ($\varphi < 0$), характер навантаження активно-ємнісний (Рис. 2.24, б).

2.6.1.2 Режим резонансу струмів

У випадку, коли $B_L = B_C$ у колі має місце резонанс струмів. Повна провідність кола буде дорівнюватися активній незважаючи на наявність індуктивного та ємнісного елементів

$$Y = \sqrt{G_1^2 + (B_L - B_C)^2} = G_1 = G \quad (2.46)$$

Повний струм матиме найменше значення. Він дорівнює активній складовій струму першої вітки та співпадає за фазою з загальною напругою (Рис. 2.24, в).

Резонансна частота для кола (Рис. 2.23)

$$\omega_0 = \frac{1}{L} \sqrt{\rho^2 - R_k^2} \quad (2.47)$$

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

Резонанс струмів в електричних колах явище корисне так, як зменшує струм в лініях електропередачі, що призводить до зменшення втрат потужності та напруги при транспортуванні електроенергії.

2.6.1.3 Метод "зарубок"

При дослідженні кола з двома паралельними вітками (Рис. 2.23) та побудові векторних діаграм може бути використаний метод "зарубок". Спочатку вимірюють усі струми за допомогою амперметрів. Потім довільно відкладають вектор напруги $\underline{U}$. Будуємо вектор струму $\underline{I}_2$ у вітці, що містить конденсатор, з урахуванням того, що він випереджає вектор напруги на кут 90° (Рис. 2.24). З початку координат радіусом I креслимо дугу, а з кінця вектора радіусом $\underline{I}_1$ робимо зарубку. Поєднавши початок координат з одержаною точкою, отримаємо вектор струму $\underline{I}$. Коли поєднаємо кінець вектора $\underline{I}_2$ з одержаною точкою, отримаємо вектор струму $\underline{I}_1$. Кут між векторами напруги $\underline{U}$ та повного струму $\underline{I}$ є кутом зсуву фаз φ .

Коли перенесемо вектор струму $\underline{I}_1$ у початок координат, одержимо кут зсуву фаз котушки індуктивності φ_k , а також активну і реактивну складові струму котушки (Рис. 2.24).

2.6.2 Порядок проведення підготовчої роботи

2.6.2.1 Вивчити теоретичний матеріал і підготувати усні відповіді на контрольні запитання.

2.6.2.2 Підготувати бланк звіту, до якого повинні входити мета роботи, схема електричного кола (Рис. 2.25), таблиця 6.1 та розрахунок за п. 6.2.3.

2.6.2.3 Розрахувати повний струм та струми у вітках кола, схема якого наведена на Рисунок 6.1, побудувати векторну діаграму, якщо задано

$$U = 10 \text{ В}, R = 10 + n \text{ Ом}, X_L = 25 - 3n \text{ Ом}, X_C = 20 + 2n \text{ Ом},$$

де n – номер бригади, що задається викладачем.

2.6.3 Опис лабораторної установки

Для виконання лабораторної роботи на стенді використовуються:

- джерело ЕРС синусоїдного струму (затискачі A , B на стенді);
- котушки індуктивності $L1$, $L2$;
- батарея конденсаторів $C3 - C7$;
- вольтметр електромагнітної системи $V3$;
- амперметри електромагнітної системи $A5$, $A6$, $A7$.

2.6.4 Порядок проведення роботи

2.6.4.1 Скласти електричне коло за схемою Рисунок 6.3. Запросити викладача для перевірки вірності складання електричного кола.

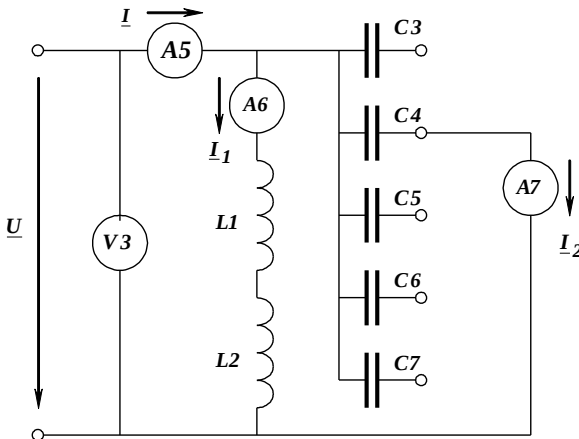


Рисунок 2.25 – Схема електричного кола з паралельним

поєднанням споживачів

2.6.4.2 Увімкнути стенд і виміряти повний струм I , струми у вітках I_1 , I_2 та напругу U по чергово підключаючи конденсатори $C4$, $C5$, $C6$, $C7$. Результати вимірювань занести в табл. 5.1. Вимкнути стенд. Результати вимірів показати викладачеві. Електричне коло розібрати.

Таблиця 6.1 - Результати експерименту

C_i	Виміряно				Обчислено						
	U , В	I , А	I_1 , А	I_2 , А	Y , Ом ⁻¹	Y_1 , Ом ⁻¹	Y_2 , Ом ⁻¹	I_{a1} , А	I_{p1} , А	$\cos \varphi$ -	$\cos \varphi_k$ -
$C4$											
$C5$											
$C6$											
$C7$											

2.6.5 Обробка результатів вимірювань та оформлення звіту

2.6.5.1 По результатам кожного експерименту розрахувати:

- повну провідність електричного кола - $Y = \frac{I}{U}$;

- повну провідність першої вітки - $Y_1 = \frac{I_1}{U}$;

- повну (реактивну) провідність другої вітки - $Y_2 = B_2 = \frac{I_2}{U}$.

Результати розрахунку занести у таблицю 6.1.

2.6.5.2 Використовуючи метод "зарубок" побудувати векторні діаграми в одному масштабі для кожного експерименту. Визначити активну та реактивну складові струму котушки індуктивності I_{a1} , I_{p1} . Результати занести у таблицю 6.1.

2.6.5.3 Розрахувати коефіцієнти потужності:

- котушки індуктивності $\cos \varphi_k = \frac{I_{a1}}{I_1}$;

- усього кола $\cos \varphi = \frac{I_{a1}}{I}$.

2.6.5.4 Визначити який з експериментів найбільше відповідає режиму резонансу струмів.

2.6.5.5 Побудувати на однім полі графіки залежностей $I = f_1(B_2)$, $\cos \varphi = f_2(B_2)$, $Y = f_3(B_2)$.

2.6.6 Контрольні запитання

2.6.6.1 У яких колах може виникнути резонанс струмів та яка умова його виникнення?

2.6.6.2 Який коефіцієнт потужності, повна провідність та повний струм при резонансі струмів?

2.6.6.3 Чим корисне явище резонансу струмів в електричних колах?

2.6.6.4 Як визначити характер навантаження електричного кола за векторною діаграмою?

2.6.6.5 Як будується векторна діаграма для паралельного поєднання споживачів методом "зарубок"?

2.6.6.6 Що таке компенсація реактивної потужності?

ЛІТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи, - М.: Высшая школа, 1988. – 480 с.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники Ч.1. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 454 с.
3. Зевеке Г.В. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 527 с.
4. Качан Ю.Г. Лінійна електротехніка (теоретичні основи). Запоріжжя: - видавництво ЗДІА, 1995. – 206 с.
5. Паначевский Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: Теорія і практикум. К.: Каравела, 2003. – 440 с.
6. Маліновський С.М. Загальна електротехніка: Підручник. – Львів: Видавництво 2Бескид Біт", 2003. 640 с.
7. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории электрических цепей. М.: Высшая школа, 1990. – 543с.
8. *Карлацук В.І.* Електронна лабораторія на IBM PC. Програма

Electronics Workbench і її застосування. М.: Солон-Р, 2003. 726 с.

9. *Алієв І.І.* Віртуальна електротехніка. Комп'ютерні технології в електротехніці й електроніці. М.: Радіософт, 2003. 112 с.

10. *Лачин В.І., Савелов Н.С.* Електроніка. Ростов Н/Д.: Феника, 2000. 448 с.

11. *Карлаицук В.І.* Електронна лабораторія на IBM PC. Лабораторний практикум на базі Electronics Workbench і MATLAB. М.: Солон-Р, 2004. 799 с.

Додаток А
Зразок титульного аркуша

Міністерство освіти та науки України
Національний університет
«Запорізька політехніка»

Кафедра теоретичної та загальної електротехніки

Лабораторна робота №1
Дослідження роботи джерела електричної енергії в різних режимах

Допустив

доцент Іванов В.В.

Виконав

ст. гр. Е-414 Бережна А.М.

Прийняв

доцент Іванов В.В.

м. Запоріжжя, 2021 р.