

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

В. М. РЯБЕНЬКИЙ, В. С. БУРЯК

ПРАКТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Посібник для виконання лабораторних і практичних робіт
з курсу
«ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА СИГНАЛІВ»
на основі віртуальної лабораторії
MULTISIM

Частина I

Рекомендовано Вченою радою НУК

Миколаїв • НУК • 2016

УДК 621.3(076)
ББК 31.2я73
Р 98

Автори:

В. М. Рябенський, доктор технічних наук, професор, зав. кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем;

В. С. Буряк, старш. викладач кафедри теоретичної електротехніки та електронних систем

Рецензент Г. В. Павлов, доктор технічних наук, професор

*Рекомендовано Вченою радою НУК як навчальний посібник
(протокол № 4 від 29.04.2016 р.)*

Рябенський В. М.

Р 98 Практична електротехніка. Посібник для виконання лабораторних і практичних робіт з курсу «Основи теорії електричних кіл та сигналів» на основі віртуальної лабораторії **Multisim**. Частина I / В.М. Рябенський, В.С. Буряк. – Миколаїв : НУК, 2016. – 164 с.

У посібнику наведено детальний опис особливостей викори-стання віртуальної лабораторії **Multisim** для проведення лабораторних робіт з електротехніки та електроніки, а також опис лабораторних робіт для дослідження електричних кіл постійного струму, однофазного та трифазного змінних струмів, електричних кіл з несинусоїдальними струмами і напругами та кіл з нелінійними елементами, у тому числі з діодами і транзисторами, для вивчення основ теорії чотириполусників. Загальна кількість запропонованих лабораторних робіт дорівнює 17.

Призначено для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів і може бути використано як частина загального лабораторного практикуму студентами електротехнічних спеціальностей. Посібник може бути корисним для студентів, які навчаються за заочною формою навчання, а також для самостійного вив-чення основних розділів електротехніки та електроніки.

УДК 621.3(076)
ББК 31.2я73

© Рябенський В. М., Буряк В. С., 2016
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2016

ВСТУП

Посібник підготовлений на основі циклу лабораторних робіт, які проводяться для студентів, що навчаються за напрямом «Телекомунікації», при вивченні однойменного курсу «Основи теорії електричних кіл та сигналів». Враховується, що ця дисципліна є базовою для наступного вивчення ряду дисциплін спеціальності.

Віртуальна лабораторія **Multisim** орієнтована на вивчення дисциплін електротехнічного та електронного напрямів. Віртуальна лабораторія використовує **Spice**-моделі електричних та електронних компонентів, що не завжди дозволяє врахувати ряд реальних параметрів і характеристик електричних кіл – наприклад, потужності елементів електричних кіл, обмеження по величинах робочих струмів, напруг тощо. Але, в той же час, наявність віртуальних вимірювальних приладів, які працюють в реальному масштабі часу, а також великої кількості інших електричних та електронних приладів, джерел живлення, комутаційних пристроїв відкривають широкі можливості використання цього програмного продукту для забезпечення навчального процесу в умовах, вкрай наближених до реальних.

Віртуальна лабораторія **Multisim** надає хороші можливості для проведення досліджень електричних кіл постійного, змінного однофазного та трифазного струмів, кіл з несинусоїдальними струмами і напругами, вивчення особливостей електричних кіл з нелінійними елементами як в режимі малих сигналів, так і при дії синусоїдальних струмів і напруг значних амплітуд. За допомогою віртуальної лабораторії легко вивчаються однофазні трансформатори, частотні й часові параметри чотириполюсників.

Виконання лабораторних робіт передбачає попереднє вивчення студентами теоретичного матеріалу, тобто заплановано для підготовлених студентів. Кожна наступна лабораторна робота передбачає високий рівень засвоєння попередніх робіт і вміння використовувати набуті знання для отримання нових знань.

У кожній роботі наводяться типові запитання, на які студент повинен вміти давати правильні й обґрунтовані відповіді, перш ніж він захищатиме роботу викладачеві, а також задачі, вміння розв'язувати які є обов'язковим.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ1

Ознайомлення з програмою для моделювання електричних кіл Multisim

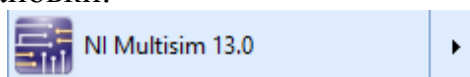
1.1. Мета роботи

Ознайомлення з програмою Multisim для її використання в якості віртуальної лабораторії при вивченні курсу загальної електротехніки.

1.2. Коротка інформація про програму

Програма Multisim призначена для проектування як електричних кіл невисокого рівня складності, так і аналогових та цифрових електронних схем. Особливістю цієї програми є наявність контрольно-вимірювальних приладів, які за своїм зовнішнім виглядом і характеристиками максимально наближені до промислових аналогів.

Запуск програми виконується натисканням лівої кнопки миші на його піктограмі в програмах установки.



Загальний вигляд інтерфейсу користувача наведено на рис. 1.1.

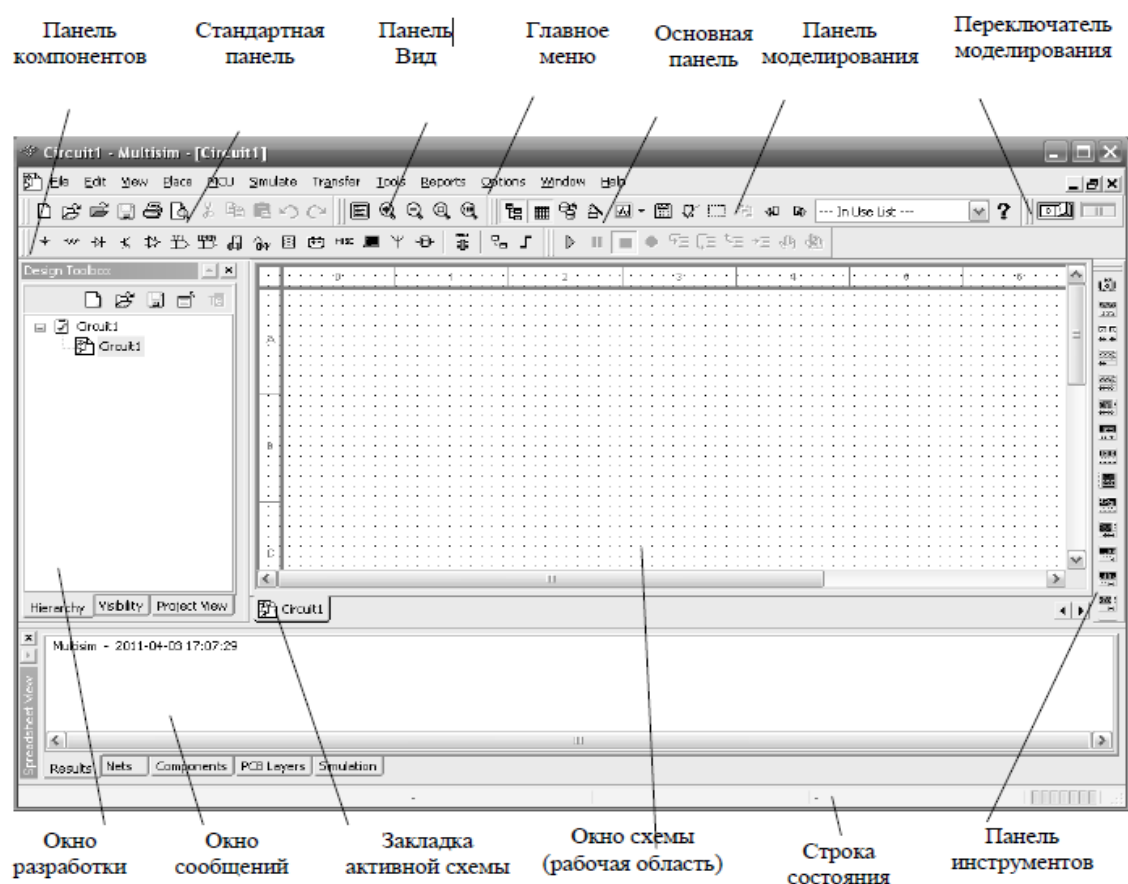


Рис. 1.1

Основними елементами користувацького інтерфейса є: головне меню, панель інструментів, рядок стану, смуги прокрутки та інші стандартні елементи вікон операційних систем сімейства Windows.

1.3. Характеристика меню програми і команд

Головне меню програми Multisim має великий набір інструментів для підготовки схем та проведення їх аналізу. Пункти головного меню **File**, **Edit**, **View** мають набори команд для роботи з файлами та проектами, друкування, редагування та зміни властивостей схем та креслень, орієнтації, виділення, масштабування, переміщення елементів схеми, налагодження користувацького інтерфейсу з можливістю зміни набору інструментальних панелей, які мало чим відрізняються від стандартних пунктів операційних систем сімейства Windows. Окремі специфічні команди поки що не використовуватимуться.

Пункт меню **Place** (розмістити в робочій області)

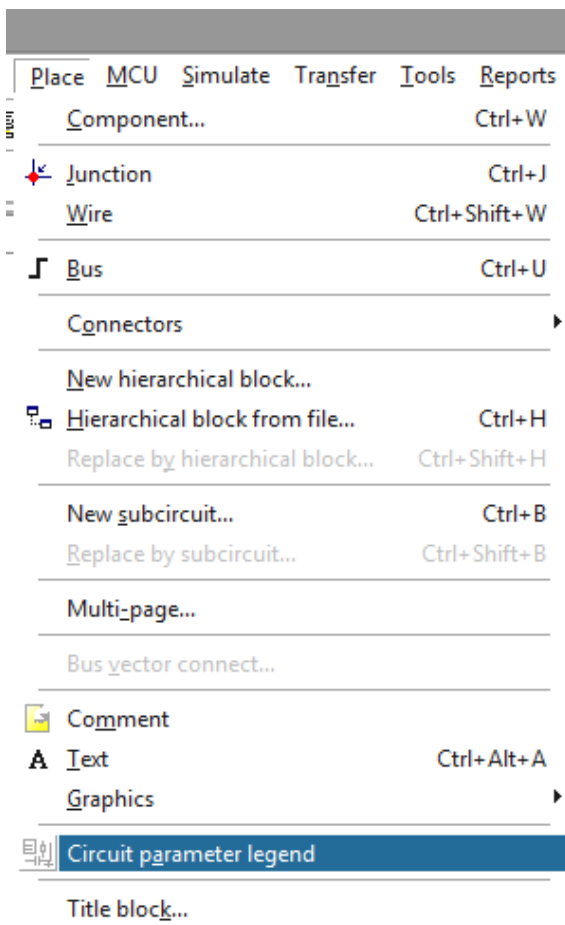


Рис. 1.2

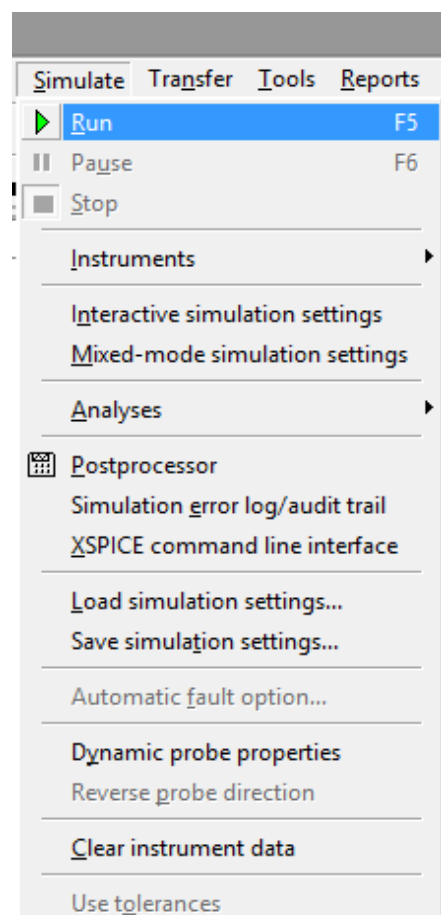


Рис. 1.3

Після вибору цієї опції на екрані з'являється вікно, вигляд якого наводиться на рис. 1.2.

Залежно від поставленої задачі, за допомогою обраного меню на робочому полі можна розташувати необхідні електротехнічні або електронні компоненти (**Component...**), з'єднання (**Junction**), провідники (**Wire**), шини (**Bus**),

коннектори (**Connectors**), раніше створені ієрархічні блоки (**New hierarchical block from file...**), коментарі (**Comment**), текстові фрагменти (**Text**), графіки (**Graphics**) тощо.

Пункт меню **MCU** в задачах електротехніки не використовується (він призначений для роботи з мікроконтролерами).

Пункт меню **Simulate (Моделювання)** (рис. 1.3) задає тип аналізу, що проводитиметься, дозволяє обрати необхідні прилади, які наявні у віртуальній лабораторії, зберегти отримані результати досліджень та виконати їх обробку. В цьому меню є можливість змінити часовий крок моделювання за допомогою пункту **Interactive Simulation Setting**. У програмі автоматично встановлено крок виведення результатів моделювання 10^{-5} сек. При високих частотах роботи моделей цей крок може бути малим, і його потрібно буде збільшувати, щоб не спотворювались часові діаграми. При роботі моделей на низьких частотах його, навпаки, треба буде зменшувати, щоб забезпечити більш швидку обробку результатів моделювання. Для задач моделювання електротехнічних схем у меню **Simulate** використовуються лише команди **Run (Пуск)**, **Pause (Пауза)**, **Stop (Зупинка)**, **Instruments (Прилади)**, **Analyses (Види моделювання)**.

Пункт меню **Transfer (Перетворення)** при виконанні лабораторних робіт з моделювання електротехнічних схем не використовується. Його призначення – підготовка вихідних даних для розробки друкованих плат.

Пункт меню **Tools (Інструменти)** дозволяє працювати з базою даних компонентів програми, використовувати можливості автоматизованого проектування на основі типових пристроїв. У цьому меню також є можливість підібрати вихідні дані для багатоваріантного аналізу схеми, яка досліджується, перевірити її на наявність помилок, відредагувати назви електронних компонентів і навіть реалізувати подальше збереження отриманої картини у вигляді графічного файлу.

Пункт меню **Report (Звіт)** пропонує скласти детальний звіт про схему: кількість і типи компонентів, їхні параметри, дані про вузли схеми тощо. Окрім цього, отриману інформацію можливо передати до офісних програм для подальшого використання.

Пункт меню **Option (Варіанти)** задає умови роботи щодо підготовки та збереження схем, визначення зовнішнього вигляду схем та умов вводу і розміщення елементів при малюванні. Він містить наступні підменю:

- **Global preferences...**
- **Sheet Properties...**
- **Customize User Interface...**
- **Lock toolbars...**

Перше з них – **Global preferences (Глобальні попередні установки)** – визначає режими і умови роботи програми як в процесі виводу схеми, так і при зберіганні створеної схеми у вигляді файлу. Так, на закладці **Paths** (рис. 1.4) задається шлях до папок зберігання файлів схем, файлів конфігурації і баз даних.

На закладці **Message prompts (Повідомлення з запитом)** є можливість відображати бажані ситуації, перелік яких задається. За замовчуванням вони всі активовані.

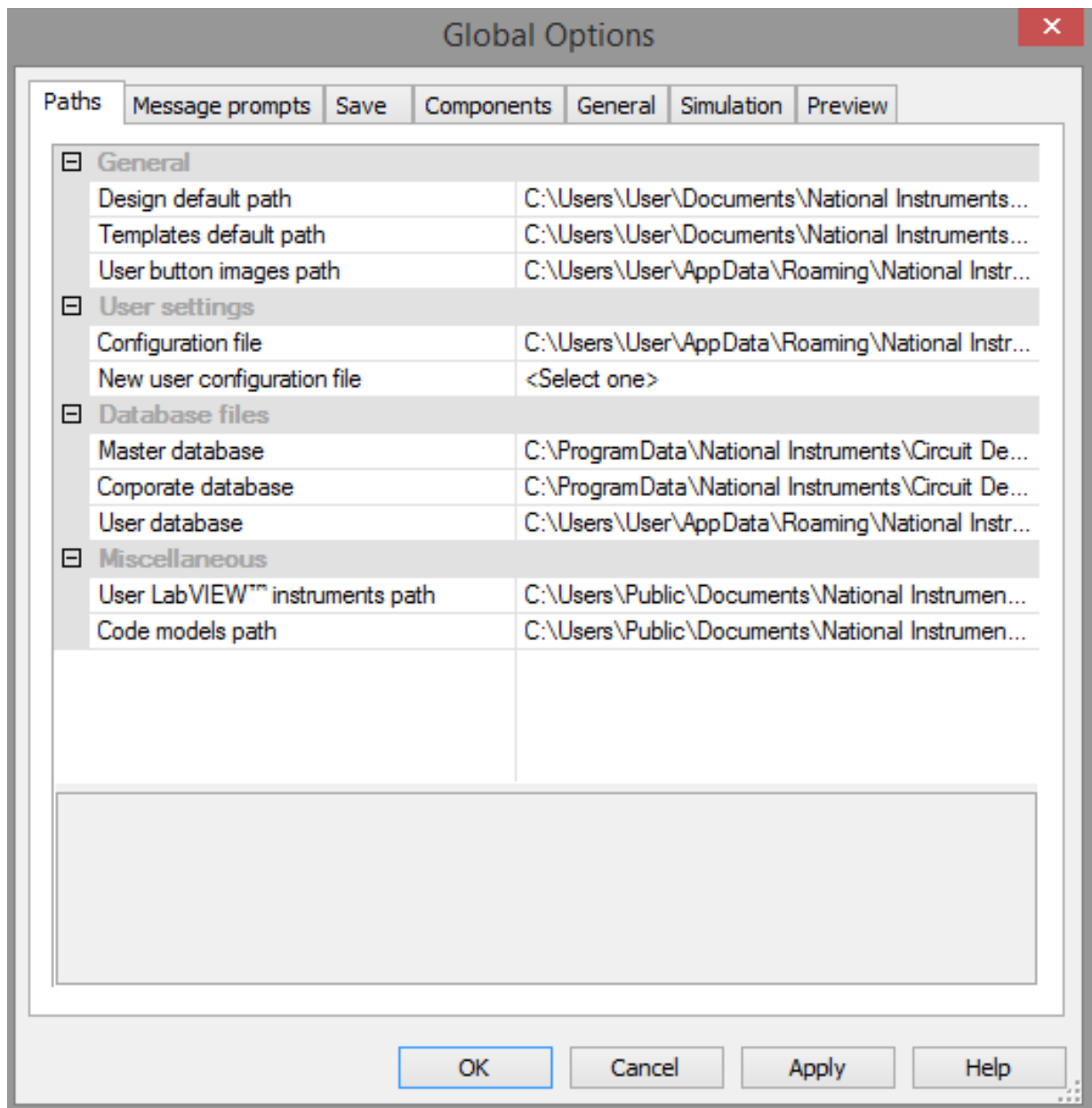


Рис. 1.4

У закладці **Save (Збереження)** визначаються режими зберігання та розміри файла даних. У цій закладці при аналізі електричних та електронних схем бажано, щоб опції, які вказані на рис. 1.5, були встановлені. Розміри файла більш ніж 1М необхідно встановлювати лише у таких проектах, де використовується ряд підсхем. У той же час, слід пам'ятати, що зберігання файла з показами вимірювальних приладів також призводить до значного зростання розміру файла.

У закладці **Components (Елементи схеми)** встановлюються стандарти, що використовуватимуться при виборі елементної бази. В данному випадку обирається або американський національний стандарт ANSI, або міжнародний стандарт ІЕС. Умовні позначення елементів на схемах, зрозуміло, будуть різними. Рекомендовано орієнтуватися на міжнародний стандарт.

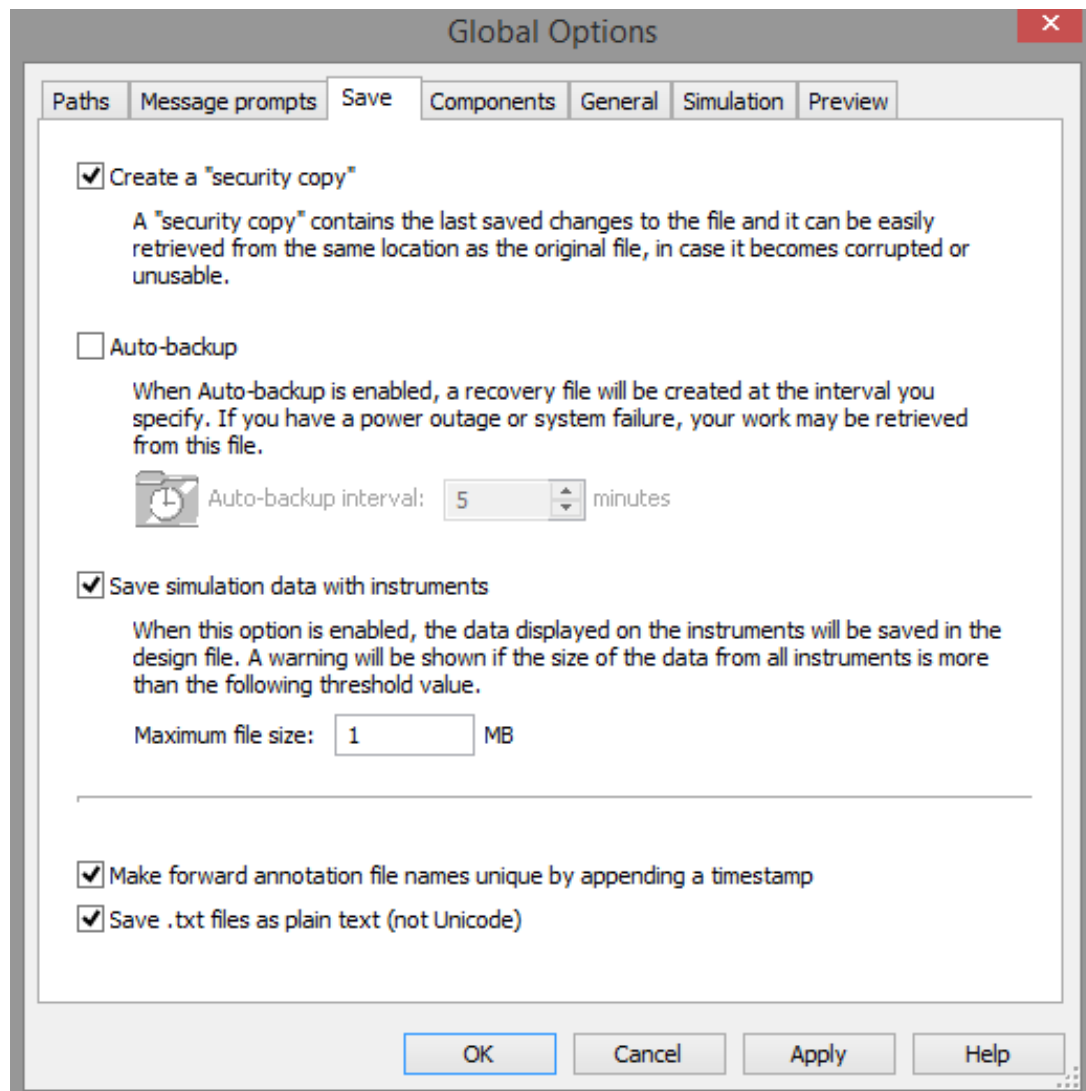


Рис. 1.5

У закладці **General (Основні)** визначаються дії, характерні при роботі з мишкою, задаються можливості автоматизації з'єднань провідників та можливості вибору областей схеми за допомогою курсору.

У закладці **Simulation (Моделювання)** задаються значення початкової фази періодичного сигналу, вибір кольору екранів вимірювальних приладів «за замовчуванням», підказки при наявності помилок у схемі.

У закладці **Preview (Попередній перегляд)** задаються можливості попередньо проглядати створені проекти.

Підменю **Sheet Properties (Властивості креслень)** визначає зовнішній вигляд підготовленої схеми (рис. 1.6). На закладці **Sheet visibility** розташовано

чотири вікна, які встановлюють ряд параметрів компонентів схеми. У вікні **Components** за допомогою допоміжного вікна можна визначитись, які параметри компонентів встановлюються на схемі, і визначитись з їх необхідністю. Слід звернути увагу на те, що після встановлення (активації) тих чи інших умовних позначень, які потрібно виводити на схему, на нижніх кнопках вікна спочатку натискається кнопка **Apply**, а потім **OK**.

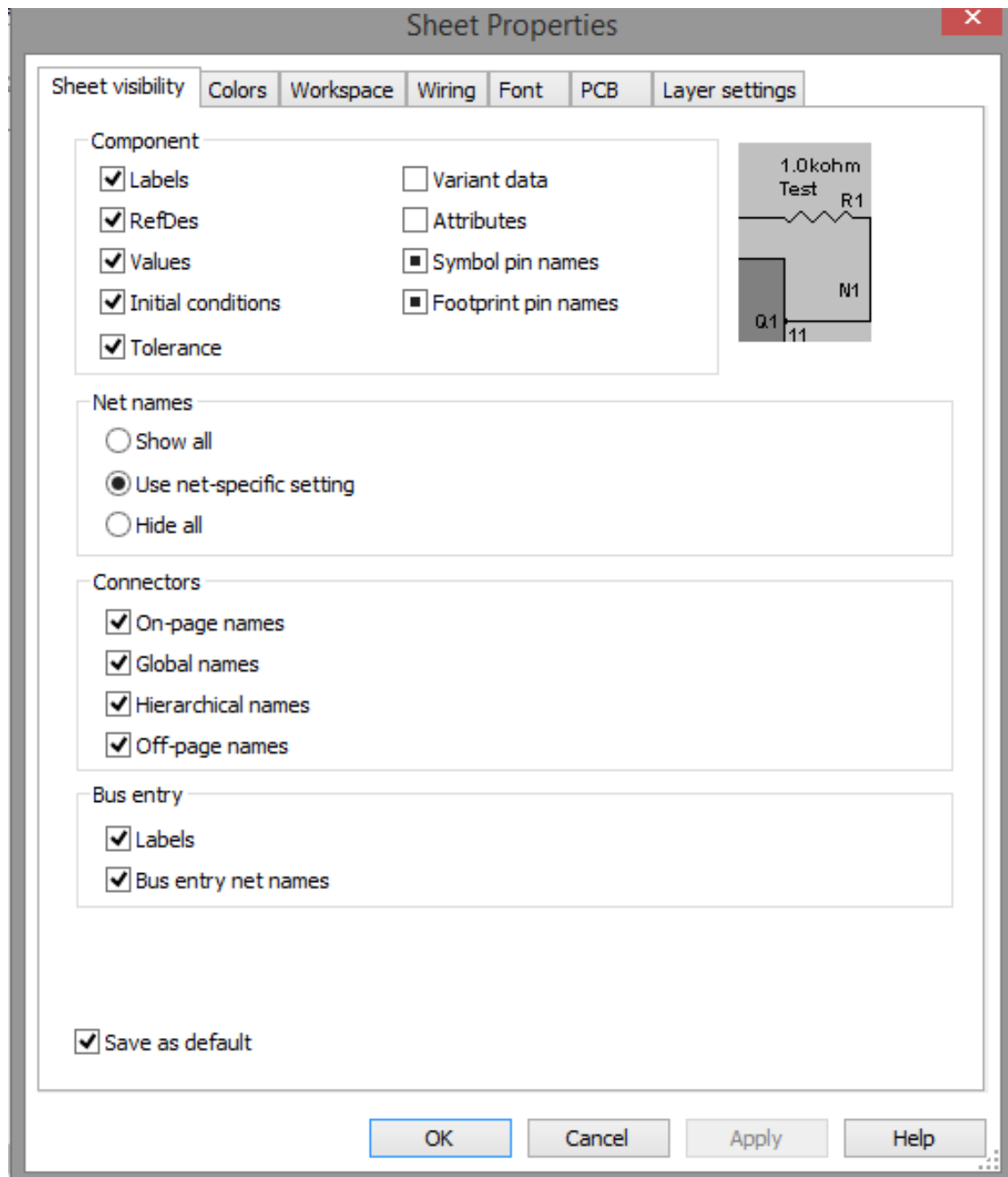


Рис. 1.6

В інших вікнах аналогічно встановлюються властивості провідників, конекторів, шин.

Звертаємо увагу на те, що зростання кількості видимих параметрів компонентів на схемі призводитиме до зростання щільності розміщення елементів, ускладнення читання креслення, появи накладок при розміщенні компонентів схеми і нагромадження інформації, яка у більшості випадків не є обов'язковою.

Закладка **Colors (Кольори)** (рис. 1.7) забезпечує встановлення кольорів елементів схеми. На закладці є можливість попереднього огляду схеми при встановленні тих чи інших кольорів.

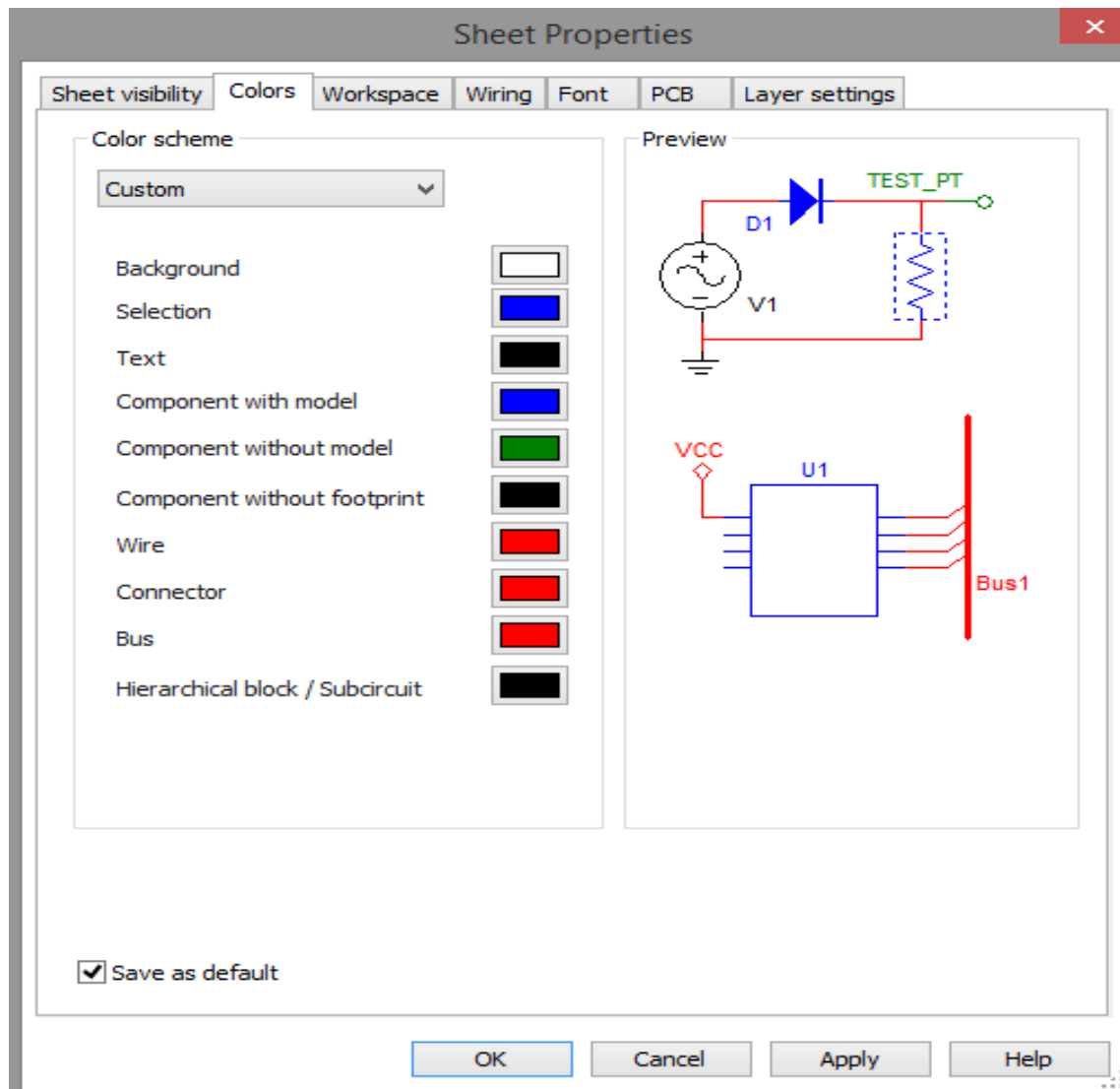


Рис. 1.7

Закладка **Workspace (Робоча область)** використовується для виводу на креслення необхідних його стандартних атрибутів – розмірів, орієнтування (горизонтальне чи вертикальне), ліній обмеження схеми, координатних ліній, а також наявності чи відсутності сітки.

Закладка **Wiring (Провідники, лінії з'єднання)** використовується при встановленні товщини ліній з'єднання та шин.

Закладка **Font (Шрифт)** дозволяє обрати шрифти для всіх текстових вставок.

Закладка **PCB** при побудові електричних схем не використовується, так само як і наступна – **Layer setting**, яка призначена для встановлення шарів схеми (на одному шарі можуть розташовуватись компоненти схеми, на іншому – розміщуватись умовні позначення, величини струмів у гілках або потенціалів на вузлах схеми тощо).

1.2. Прилади, що слід використовувати при проведенні дослідів

Вимірювальні прилади можуть мати різний зовнішній вигляд залежно від того, яка задача ставиться користувачем, де вони розміщені, активовані вони чи ні. На рис. 1.8 наведено шлях до вибору приладів та їх бібліотека.

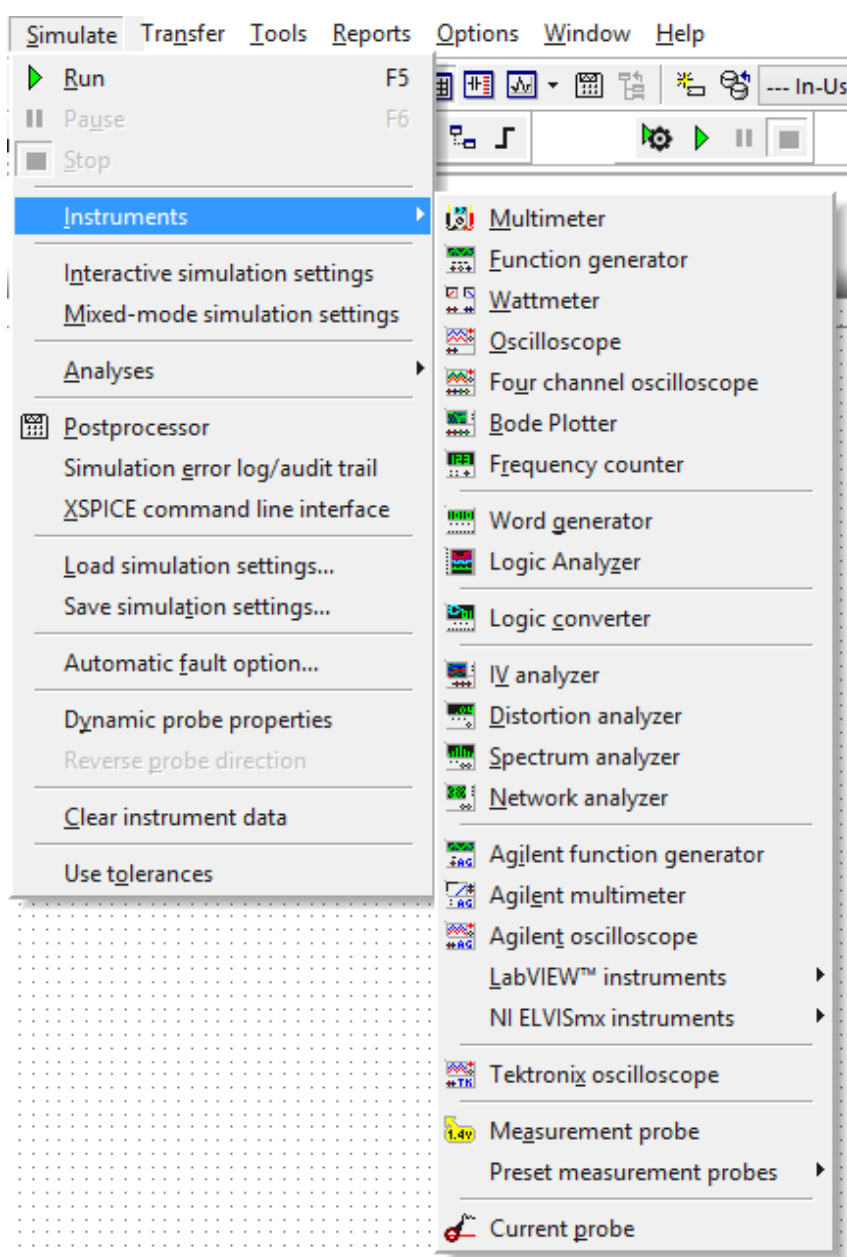


Рис. 1.8

Розглянемо лише ті прилади, які у подальшому використовуватимуться нами у лабораторних роботах з електротехніки.

1. Мультиметр (рис. 1.9).

Прилад призначений для вимірювання струму, напруги, опору, величини затухання сигналу. Використовується для електричних кіл постійного та змінного струмів.



Рис. 1.9

При натисканні кнопки **Set** з'являється вікно установок (рис. 1.10), в якому задаються вказані параметри мультиметра, або ж їх можна використовувати за замовчуванням. При цьому слід розуміти, що параметри мультиметра не ідеальні.

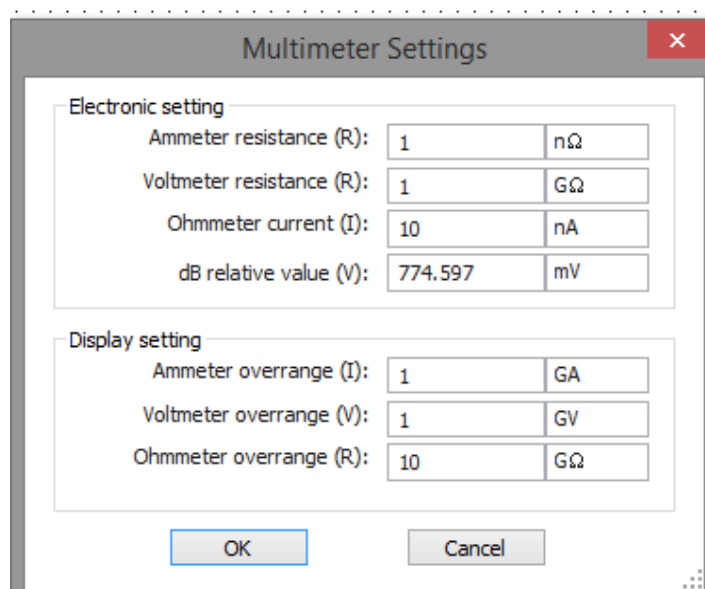


Рис. 1.10

2. Функціональний генератор (рис. 1.11).

Прилад призначений для створення електричних сигналів синусоїдальної форми, пиловидної напруги та прямокутних імпульсів. Діапазони параметрів встановлюються безпосередньо у відповідних вікнах. Для цього слід помістити у необхідне вікно і натиснути ліву кнопку миші.

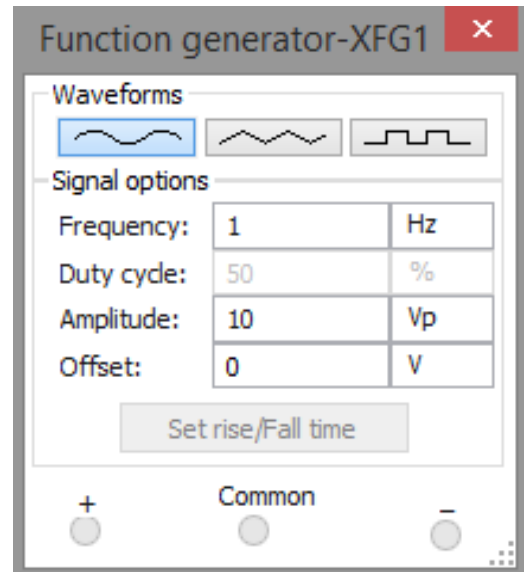
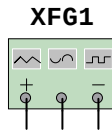


Рис. 1.11

3. Ватметр (рис. 1.12).

Прилад призначений для вимірювання потужності в колах постійного та змінного струму, а також коефіцієнта потужності.

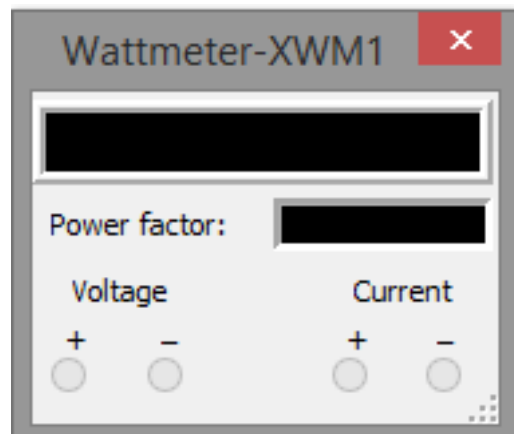
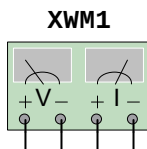


Рис. 1.12

4. Осцилограф (рис. 1.13).

Двохканальний осцилограф дозволяє отримувати зображення сигналів постійного, змінного струму та сигналів випадкової форми, вимірювати їх амплітуди, початкові фази, зміщення фаз сигналів (фазовий кут) у широкому частотному та амплітудному діапазоні. Він може працювати як з внутрішньою синхронізацією, так і з зовнішньою.

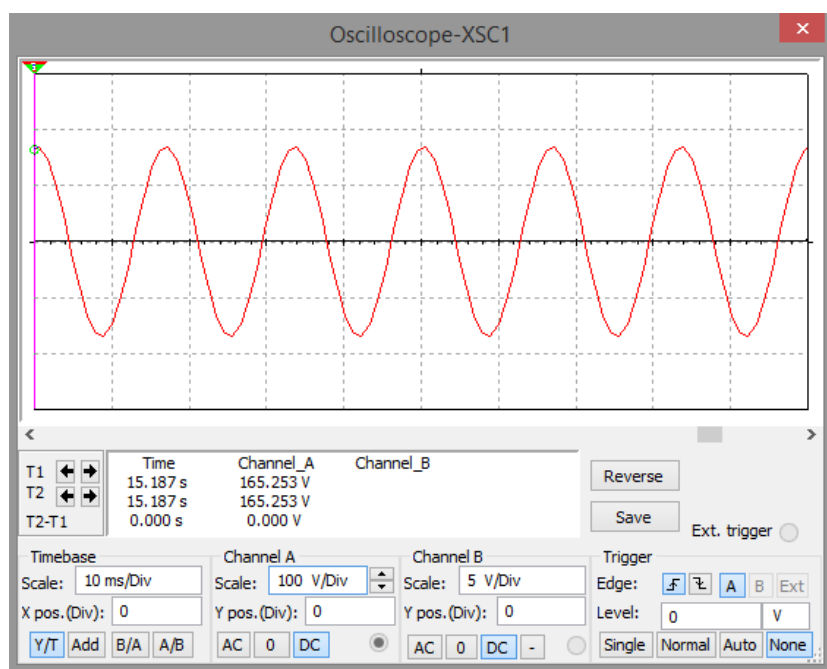
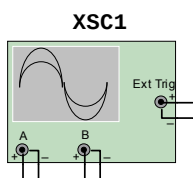


Рис. 1.13

5. Лічильник частоти (рис. 1.14).

Прилад призначений для вимірювання частоти, періоду синусоїдальних сигналів, а також частоти та тривалості фронту і зрізу імпульсних сигналів.

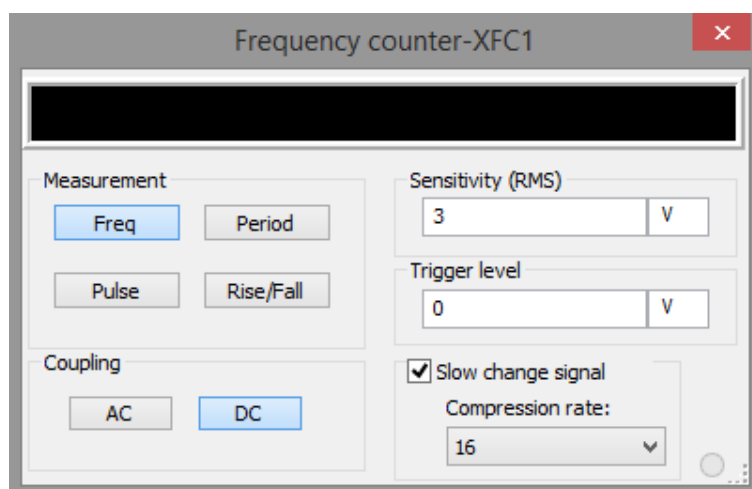
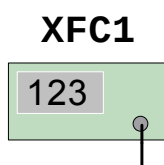


Рис. 1.14

6. Прилад для зняття вольт-амперних характеристик (рис. 1.15).

Прилад призначений для отримання вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів тощо), але його реальні можливості значно ширші. За його допомогою також можна отримувати вольт-амперні характеристики будь-яких нелінійних двополюсників та чотириполюсників. Діапазон параметрів, в якому виконуються вимірювання, або задається автоматично, або встановлюються у вікні, що з'являється після натискання кнопки **Simulate param.**

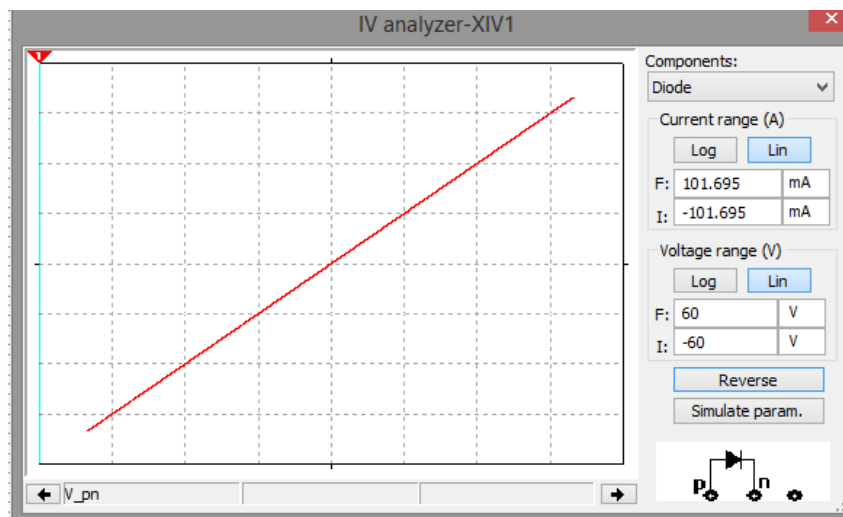
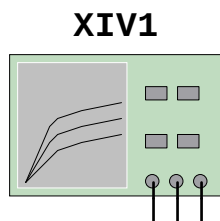


Рис. 1.15

7. Датчик для вимірювання електричних параметрів у гілках схеми (**Probe**) (рис. 1.16).

В електричних колах таких датчиків можна встановлювати будь-яку кількість. Датчик може вимірювати величину струму, напруги по відношенню до загальної шини і т.п. За допомогою вікна установок, яке активізується подвійним натисканням лівої кнопки миші, на фоні вимірюваних параметрів можна встановлювати розмір та колір вікна, параметри тексту та інші необхідні установки. Прилад ХСР1, що встановлений в схемі (рис. 1.16), є датчиком струму. Він дозволяє вимірювати величину постійного та змінного струмів у гілці схеми, в якій він встановлений.

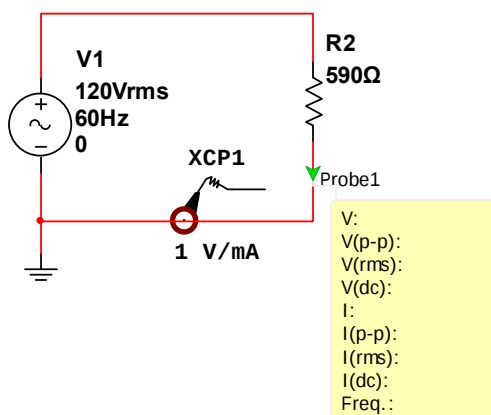


Рис. 1.16

1.3. Бібліотека електричних компонентів Multisim

Компоненти електричних схем обираються з бази даних і розміщуються на робочому полі наступними шляхами:

- Через головне меню (**Place → Component...**);
- Через контекстне меню робочої області;
- Через панель компонентів (рис. 1.17).

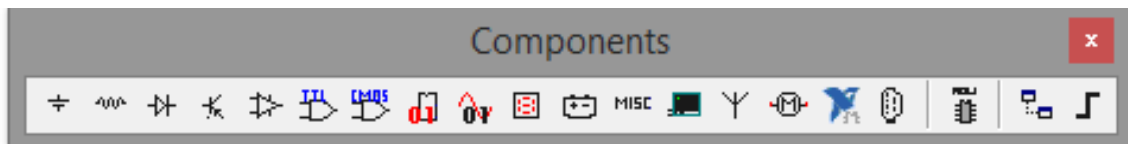


Рис. 1.17

У першому випадку з'являється вікно компонентів, яке розділене на три частини. Звернемо увагу спочатку на ліву частину (рис. 1.18).

Верхня строчка (**Database**) містить три опції (**Master Database, Corporate Database, User Database**). Скористаємось першою опцією, оскільки інші створюються користувачами.

У другій строчці (**Group**) слід обрати **Basic**. Як наслідок, з'явиться вікно з групами компонентів (рис. 1.19).

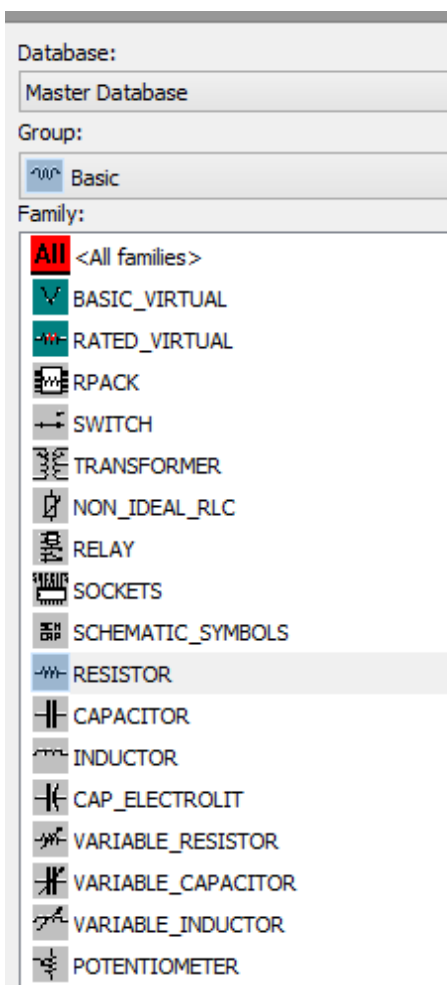


Рис. 1.18

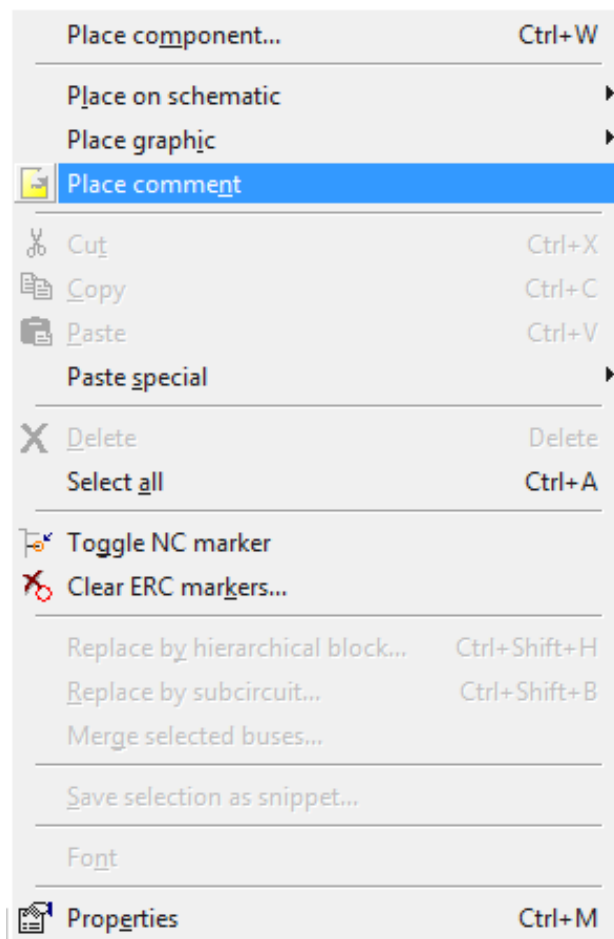


Рис. 1.19

Активізація обраної групи компонентів призводить до появи у другому вікні екрана повної бібліотеки відповідних елементів із вказаними номінальними параметрами та з лінійкою прокрутки для полегшення вибору того чи іншого номіналу. При цьому в третьому вікні екрана з'явиться умовне зображення обраного елемента і ряд опцій, призначених для вибору (визначення)

виробника, параметрів моделі, розкид параметрів та ін. Вони необхідні професійним розробникам, які повинні враховувати і конструктивні параметри елемента, і температурні, і вартісні показники. Для лабораторних задач ці опції не потрібні. Натискаючи кнопку **ОК** у правому верхньому куті вікна, повертаємось на робочу поверхню проекту, де обраний компонент прикріплений до курсору миші. Обравши місце розміщення, натискається ліва кнопка миші, і компонент встановлюється на робочому місці.

Контекстне меню робочої області з'являється, якщо встановити курсор миші на робочій поверхні та натиснути праву кнопку (рис. 1.18). Обираємо команду **Place Component** і потрапляємо у те ж саме вікно компонентів.

Для вибору компонентів схеми простіше використовувати панель компонентів.

Для моделювання електротехнічних задач використовуються такі групи елементів:

- група **Sources** – джерела енергії та сигналів;
- група **Basic** – група з базовими елементами;
- група **Indicators** – індикатори;
- група **Power Component**.

Група **Sources** містить у собі підгрупи елементів, які можна побачити на рис. 1.20.

При виборі підгрупи **POWER_SOURCES** з'являється вікно вибору елементів (рис. 1.21).

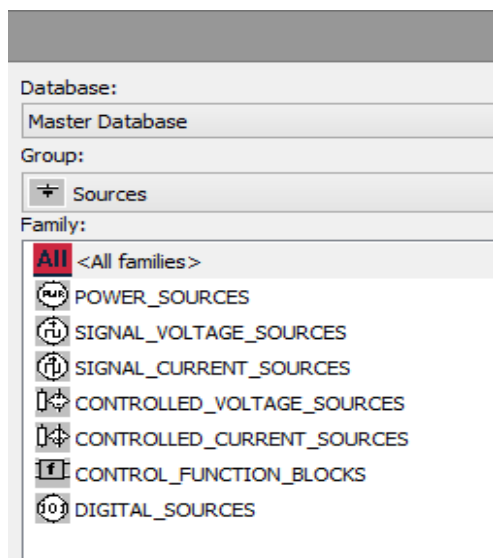


Рис. 1.20

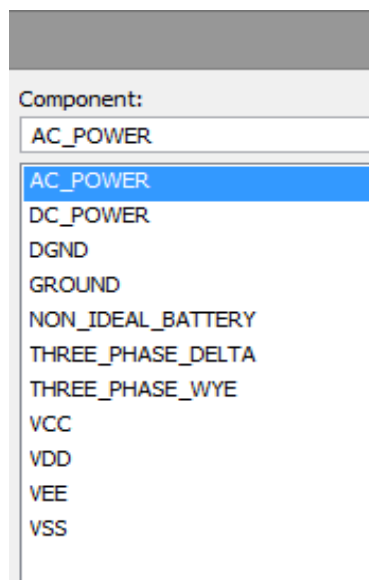
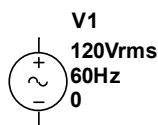
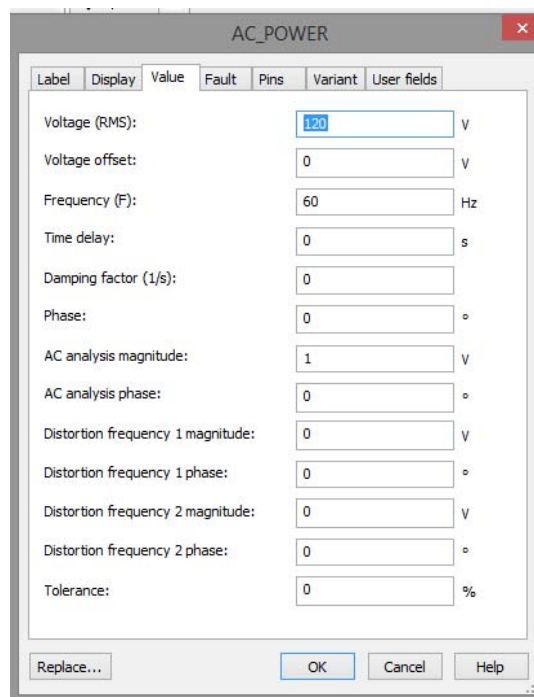


Рис. 1.21

Як приклад, на рис. 1.22, **а** виведено джерело змінного струму з початковими установками. Для зміни цих установок викликається вікно установок (рис. 1.22, **б**).



a



б

Рис. 1.22

При виконанні лабораторних робіт обов'язково слід використовувати заземлення **GROUND** – це аналогове заземлення, на відміну від іншого типу заземлення **DGND** – цифрового заземлення, яке використовується при моделюванні цифрових схем.

Для кожного джерела є вікно установок, яке викликається після виводу його на робочу область шляхом подвійного натискання лівої кнопки миші. Група з базовими елементами наведена на рис. 1.17. Вибір та вивід елементів на робоче поле виконується аналогічно.

Група **Indicators** містить в собі підгрупи, які наведені на рис. 1.23. Вивід відповідного елемента забезпечується аналогічно.

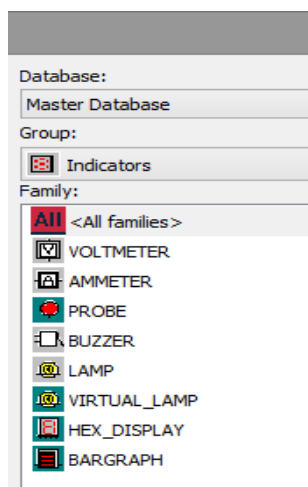


Рис. 1.23

Для кожного з елементів є вікно параметрів, в якому встановлюються необхідні коефіцієнти. Для задач електротехніки можуть використовуватись амперметр **AMMETER**, вольтметр **VOLTMETER**, датчик **PROBE**, який описаний вище, і, можливо, **LAMP** – лампочка. При роботі з амперметром та вольтметром налагоджувати їх немає необхідності. Діапазон параметрів встановлюється автоматично.

Звертаємо увагу на те, що як компоненти, так і вимірювальні прилади в робочому вікні можуть використовуватись багаторазово.

У тих випадках, коли знадобиться використовувати запобіжники, слід звертатись до групи **POWER_COMPONENTS**.

1.4. Створення проекту. Порядок виконання роботи

При відкритті програми Multisim автоматично створюється проект схеми з назвою Circuit1. Для зміни імені файла його слід зберегти через пункт меню **File** → **Save as...** Рекомендується використовувати англійські букви.

1.4.1. Поекспериментуйте з вибором пасивних компонентів і джерел живлення з бібліотеки EWB і встановленням їх положень на екрані. Установіть самостійно обрані параметри для резистора, конденсатора, котушки індуктивності, джерела живлення.

1.4.2. Складіть найпростіші схеми з послідовним і паралельним з'єднанням джерел живлення постійного та змінного струмів і пасивних компонентів (резисторів – при використанні джерел постійного струму та резисторів, конденсаторів, індуктивностей – при використанні джерел змінного струму).

Перед тим, як створити креслення електричної принципової схеми засобами програми Multisim, необхідно на аркуші паперу підготувати її ескіз із зразковим розташуванням компонентів.

Процес створення схеми починається із розміщення компонентів з бібліотек на робочому полі програми відповідно до підготовленого ескізу.

Необхідний для створення схеми значок (символ, умовне позначення) компонента переноситься з каталога на робоче поле програми рухом миші при натиснутій лівій кнопці, після чого кнопка відпускається для фіксації символу.

Правою кнопкою миші активується інтерактивне меню, з якого можна обрати команди **Flip horizontally** (повернути горизонтально), **Flip vertically** (повернути вертикально), **Rotate 90° clockwise** (повернути у напрямку за годинниковою стрілкою), **Rotate 90° counter clockwise** (повернути у напрямку проти годинникової стрілки) встановлюється положення елемента у схемі.

Подвійне натиснення кнопки миші на умовному зображенні елемента забезпечує вивід вікна для встановлення необхідних параметрів: опір резистора, індуктивність дроселя, ємність конденсатора тощо. Вибір підтверджується натисканням кнопки **Accept (OK)** або клавіші **Enter**.

При розробці схем використовуються лише два перших вікна **Label** і **Value**: перше дозволяє встановлювати літерні й цифрові надписи біля обраних компонентів, а друге – їх номінали.

Після розміщення компонентів здійснюється з'єднання їхніх виводів провідниками. При цьому необхідно враховувати, що до кожного виводу компонента можна підключити тільки один провідник.

Складання електричних схем виконується у такій послідовності. Підводиться курсор миші до електроду компонента до моменту появи чорної (з'єднуючої) точки. Після цього натискається ліва кнопка миші і підводиться до електроду другого компонента електричної схеми. При появі аналогічної з'єднуючої точки кнопка миші відпускається. При цьому з'являється видиме з'єднання двох компонентів. Колір видимого з'єднання можна змінити. Для цього стрілка миші підводиться до провідника і подвійним натисканням лівої кнопки викликається вікно **Net Properties**, в якому обирається бажаний колір провідника. Якщо до кольорового провідника приєднується вхід осцилографа, то відповідний промінь матиме такий же колір.

При необхідності підключення до встановлених елементів схеми інших провідників у бібліотеці **Basic** обирається символ з'єднання і переноситься на раніше встановлений провідник. До цієї точки з'єднання можна підключити ще два провідники. При встановленні в проектувану схему символу з'єднання (точки) він буде засвічений червоним кольором. При переводі його у пасивний стан на точці може бути видимою лінія з'єднання. Це говорить про відсутність з'єднання. У такому випадку необхідно повторити установку символу з'єднання. Символ з'єднання може мати умовні позначення (номери), так само як і інші компоненти електричної схеми.

При необхідності розірвати встановлене з'єднання використовуються два способи. Перший з них такий. До провідника підводиться курсор миші і лівою кнопкою провідник виділяється (виділена лінія матиме по краях кольорові квадратики розміром приблизно 1 мм). Після цього правою кнопкою миші викликається вікно, в якому необхідно натиснути опцію **Delete**. Другий спосіб полягає у тому, що виконується процедура, зворотна процедурі з'єднання. Підводиться курсор миші до одного з електродів електричних компонентів і після появи чорної (з'єднуючої) точки натискається ліва кнопка й курсор відводиться від компонента.

Проведіть досліди з переміщення електричних компонентів, приладів, провідників по робочому полю. В будь-якому випадку їх слід активізувати.

Проведіть досліди з копіювання елементів схеми на робочому столі, з копіювання схеми та з перенесення її в офісний документ.

1.4.3. Складіть схеми у відповідності до рис. 1.24 і додатку. Встановіть вимірювальні прилади на використання в електричних колах постійного струму. Включіть схему в роботу й заміряйте напругу, яку покаже вольтметр, і струм, що протікає крізь амперметр. Виконайте аналіз роботи схем на основі закону Ома.

1.4.4. Визначте величину внутрішнього опору вимірювальних приладів, яка задається за замовчуванням. Майте на увазі, що для перевірки внутрішнього опору амперметра потрібно паралельно до амперметра під'єднати вольтметр, а для перевірки внутрішнього опору вольтметра – послідовно до вольтметра під'єднати амперметр.

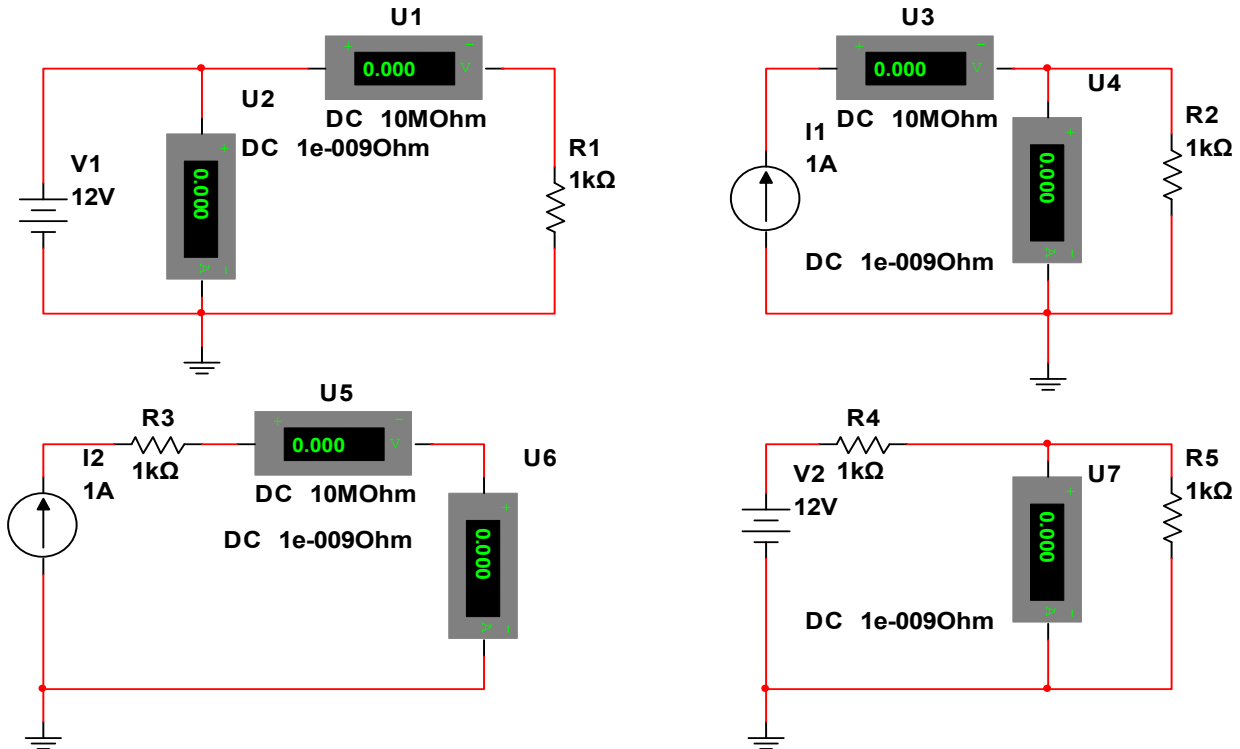


Рис. 1.24

1.4.5. Замініть резистори індуктивними дроселями (для непарних варіантів) або конденсаторами (для парних варіантів), а джерела постійного струму і напруги – джерелами змінного струму і напруги. Переключіть режим роботи вимірювальних приладів з **DC** на **AC** (режим вимірювання змінного струму). Для цього необхідно викликати вікно **Ammeter (Voltmeter)** і, обравши **Value** → **Mode**, встановити режим **AC**.

Для проведення вимірювань необхідно встановити частоту джерела змінного струму, наприклад, 1000 Гц. Розрахуйте необхідну величину індуктивності (ємності) за умови, що її опір на частоті 1000 Гц близький до величини опору резисторів, які наводяться у схемах на рис. 1.24. Провести вимірювання струмів і напруг відповідно до завдання.

1.4.6. Встановити частоту джерела змінного струму 200 Гц і заміряти струм та напругу електричного кола. Встановити частоту 5000 Гц і знову заміряти струм та напругу.

1.5. Вимоги до звіту

1.5.1. Перевірити дію закону Ома.

1.5.2. Визначити внутрішній опір вольтметра та амперметра.

1.5.3. Виконати розрахунки реактивних елементів.

1.5.4. Побудувати графік залежності опору дроселя (X_L) або опору конденсатора (X_C) від частоти джерела живлення.

1.5.5. Навести схеми, які досліджувались, результати обчислень і результати виконаних вимірювань для кіл постійного і змінного струму.

1.5.6. Зробити висновки за результатами роботи.

1.6. Питання до атестації

1.6.1. Пояснити, чому внутрішній опір вольтметра відрізняється від внутрішнього опору амперметра.

1.6.2. Пояснити необхідність врахування потужності резистора при розрахунках електричних схем.

1.6.3. Пояснити залежність між струмом, що протікає крізь конденсатор; зарядом, який накопичується на ньому, і напругою, яка може бути заміряна на його обкладках.

1.6.5. Пояснити взаємозв'язок між струмом, що протікає через дросель; потокозчепленням, що створюється ним; напругою, що прикладається до дроселя, і ЕРС самоіндукції.

1.7. Задачі для тестування

1.7.1. У якому ідеальному пасивному елементі електрична енергія перетворюється на теплову?

1.7.2. У якому ідеальному пасивному елементі електрична енергія перетворюється на енергію магнітного поля?

1.7.3. У якому ідеальному пасивному елементі електрична енергія перетворюється на енергію електричного поля?

1.7.4. Визначити індуктивність ідеальної котушки індуктивності, якщо на частоті 100 кГц її індуктивний опір дорівнює 16 кОм.

1.7.5. Визначити індуктивний опір ідеальної котушки індуктивності, яка на частоті 100 Гц має індуктивність $L = 25,5$ мГн.

1.7.6. Визначити індуктивний опір ідеальної котушки індуктивності, яка на частоті 150 Гц має індуктивність $L = 25,5$ мГн.

1.7.7. Визначити індуктивний опір ідеальної котушки індуктивності, яка має індуктивність $L = 25,5$ мГн, на частоті 50 Гц.

1.7.8. До джерела постійної напруги з ЕРС $E = 1,5$ В і внутрішнім опором $r = 2,5$ Ом під'єднали навантаження з опором $R = 10$ Ом. Знайти струм в утвореному електричному колі та падіння напруги на джерелі напруги.

1.7.9. Напруга на затискачах джерела живлення, яке навантажене опором $R = 250$ Ом, дорівнює $U_1 = 4,5$ В. Напруга на затискачах того ж джерела без навантаження складає $U_2 = 4,77$ В. Знайти внутрішній опір джерела.

1.7.10. До джерела постійної напруги з ЕРС $E = 125$ В під'єднали послідовно три резистора з опорами $R_1 = 100$ Ом, $R_2 = 30$ Ом, $R_3 = 120$ Ом.

Знайти струм в утвореному електричному колі, падіння напруги та потужність, що виділяється на кожному резисторі.

1.7.11. У скільки разів збільшиться потужність, що розсіюється на резисторі, якщо струм у ньому збільшився у 1,5 рази?

1.7.12. Як зміниться струм I та напруга U після замикання рубильника у схемах на рис. 1.25?

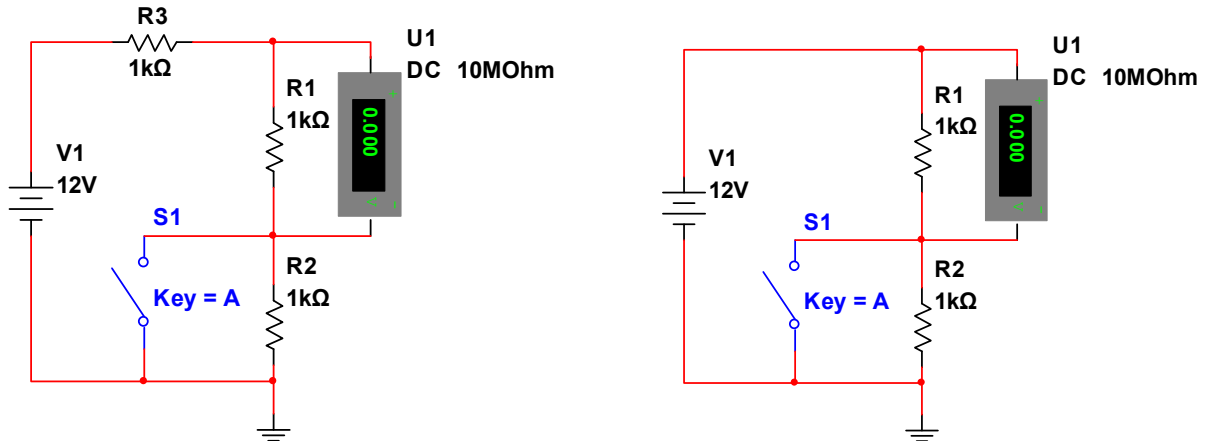


Рис. 1.25

1.7.13. Визначити ємність конденсатора, якщо при частоті 100 Гц його ємнісний опір $X_C = 3 \text{ кОм}$.

1.7.14. Через дросель з індуктивністю 1 мГн протікає струм 10 А. Визначити енергію, що накопичена у дроселі.

1.7.15. Визначити ємнісний опір конденсатора, ємність якого 150 мкФ, на частоті 100 Гц.

1.7.16. Визначити ємнісний опір конденсатора, ємність якого 150 мкФ, на частоті 150 Гц.

1.7.17. Визначити ємнісний опір конденсатора, ємність якого 150 мкФ, на частоті 200 Гц.

1.7.18. Визначити ємність конденсатора, якщо при частоті 100 Гц його ємнісний опір $X_C = 1 \text{ кОм}$.

1.7.19. Визначити ємність конденсатора, якщо при частоті 100 Гц його ємнісний опір $X_C = 0,5 \text{ кОм}$.

1.7.20. Визначити, на якій частоті працює конденсатор ємністю $C = 100 \text{ мкФ}$, якщо його ємнісний опір дорівнює $X_C = 10,62 \text{ Ом}$.

1.7.21. Визначити, на якій частоті працює індуктивна котушка індуктивністю $L = 50 \text{ мГн}$, якщо її індуктивний опір дорівнює $X_L = 15,7 \text{ Ом}$.

1.7.22. Конденсатор ємністю 100 мкФ заряджений до напруги 500 В. Визначити енергію, накопичену в конденсаторі.

1.8. Додаток

Таблиця варіантів до схем, які наведені на рис. 1.24.

Номер варіанту	Схеми	Джерела		R, Ом
		Е, В	I, А	
1	<i>a</i>	10	1,5	10
2	<i>б</i>	12	2	6
3	<i>a</i>	5	1	8
4	<i>б</i>	6	0,5	1
5	<i>a</i>	8	1,2	12
6	<i>б</i>	20	0,1	14
7	<i>a</i>	24	0,2	15
8	<i>б</i>	15	2,5	16
9	<i>a</i>	9	3	20
10	<i>б</i>	4	0,4	50
11	<i>a</i>	16	4	60
12	<i>б</i>	26	1,8	100
13	<i>a</i>	22	5	3
14	<i>б</i>	18	0,8	200
15	<i>a</i>	14	0,6	400

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ2

Дослідження вольт-амперних характеристик компонентів електричних кіл

2.1. Мета роботи

Дослідження вольт-амперних характеристик джерел напруги, струму, а також пасивних компонентів електричних кіл.

2.2. Основні теоретичні положення

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) електричного приладу називається залежність між струмом, що протікає через прилад, і напругою, яка виділяється на його виводах. Для пасивних компонентів ВАХ визначається з закону Ома:

$$U = I \cdot R, \quad (2.1)$$

і для постійного опору зображається у вигляді прямої лінії, крутизна якої в системі координат I , U залежить від величини опору R .

Для джерел постійної напруги ВАХ визначається рівнянням:

$$U = E - I \cdot r, \quad (2.2)$$

де E – електрорушійна сила джерела напруги, тобто максимальне значення напруги джерела, яке визначається в режимі холостого ходу (при розімкненому колі навантаження, коли струм навантаження відсутній); r – внутрішній опір джерела живлення.

Для джерела постійного струму ВАХ будується в системі координат струм – напруга, тобто залежність величини вихідного струму від напруги на навантаженні:

$$I = J - U \cdot g, \quad (2.3)$$

де J – максимальне значення струму в режимі короткого замикання; g – внутрішня провідність джерела струму.

Формули (2.1) – (2.3) також справедливі і для електричних кіл змінного струму.

При використанні в електричних схемах резисторів слід мати на увазі, що номінальний опір резистора справедливий тільки для температури 20°C. Якщо схема працює в іншому температурному середовищі, використовується коригуючий коефіцієнт ТКС, який береться з довідникової літератури. Дійсний опір резистора можна обчислити за формулою:

$$R_T = R_0 [1 + \alpha_R (T_2 - T_1)],$$

де R_0 – опір резистора при температурі 20°C;

T_1 – номінальна температура резистора (20°C);

T_2 – робоча температура резистора;
 α_R – температурний коефіцієнт на 1 градус Цельсія.

2.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

У віртуальній лабораторії Multisim джерела напруги і струму є ідеальними. Внутрішній опір ідеального джерела напруги дорівнює нулю, тому його вихідна напруга не залежить від навантаження. Ідеальне джерело струму має нескінченно великий внутрішній опір, тому його струм не залежить від опору навантаження.

Для побудови ВАХ резисторів можна використовувати схеми, які наведені на рис. 2.1, *а, б*. У першій схемі використовується джерело ЕРС, на яке навантажується опір, що досліджується. У цій схемі зняття даних для побудови ВАХ забезпечується шляхом зміни установочних значень ЕРС із записом відповідних значень струму, які контролюються амперметром. У другій схемі, навпаки, необхідно змінювати встановлені значення величини струму джерела струму, а напруга змірюється за допомогою вольтметра.

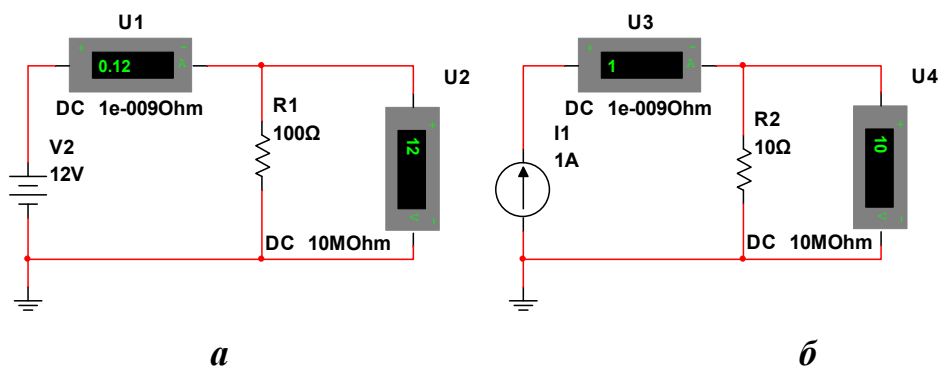


Рис. 2.1

Для проведення дослідів з визначення ВАХ реальних джерел живлення необхідно, перш за все, створити такі реальні джерела.

Послідовно з джерелом ЕРС встановлюється активний опір (R_1), величина якого повинна бути досить малою. Вона задається у відповідних варіантах.

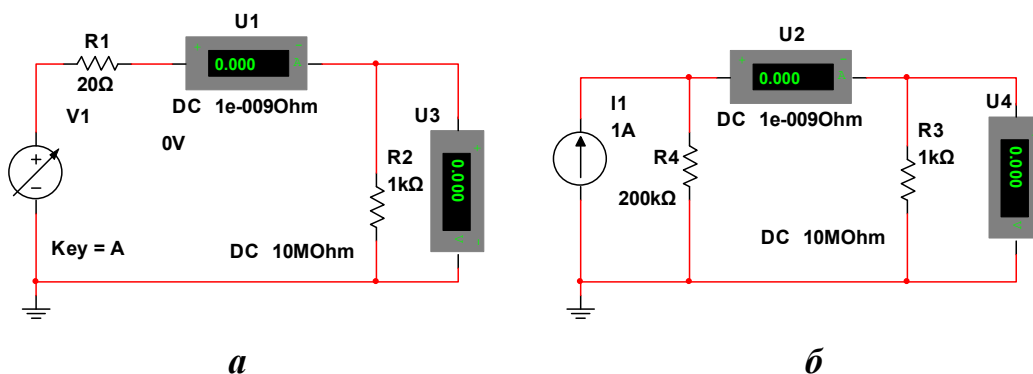


Рис. 2.2

Паралельно з джерелом струму встановлюється значний за величиною опір (R_2), номінал якого визначатиме внутрішній опір джерела струму.

Схеми, які використовуються для проведення вимірювань з метою побудови ВАХ реальних джерел струму і напруги, наводяться на рис. 2.2, а, б.

2.4. Порядок виконання роботи

2.4.1. Використовуючи схему, зображену на рис. 2.1, зробити заміри для побудови ВАХ резисторів. Експериментальна ВАХ заміряється при температурі 27°C (номінальний режим роботи резистора в пакеті **Multisim**). У пакеті Multisim передбачений спеціальний прилад для зняття ВАХ електронних компонентів, у тому числі і резисторів. На рис. 2.3 наведені його зображення. Після активізації роботи приладу за допомогою курсору можна зафіксувати ряд точок на вольт-амперній характеристиці резистора і заміряти відповідні значення напруги і струму. За допомогою замірених значень обчислюється величина опору резистора у кожній з точок.

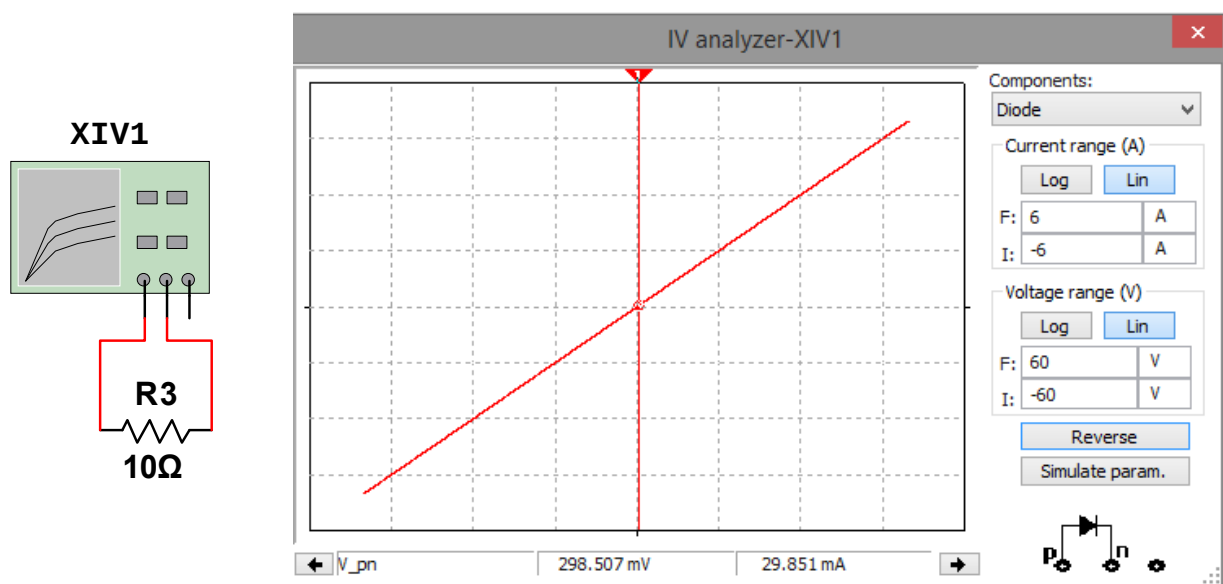


Рис. 2.3

2.4.2. Встановити відповідно до варіанту лінійний коефіцієнт температурної залежності **ТС1** і знову провести заміри у тих же точках, але при різних температурах. Перед тим, як ввести температурний коефіцієнт, треба встановити температуру, при якій працюватиме резистор (у вікні **Resistor** обрати вкладку **Value** і встановити значення температури та температурні коефіцієнти відповідно до варіанту).

2.4.3. Встановити квадратичний коефіцієнт температурної залежності **ТС2** і повторити проведений дослід.

2.4.4. Побудувати ВАХ ідеальних джерел живлення.

2.4.5. Побудувати схеми за рис. 2.2 і, відповідно до варіанту у додатку, встановити параметри електричного кола. Виконавши заміри у двох – трьох

точках, побудувати ВАХ реального джерела напруги. Повторити дослід для послідовного з'єднання двох джерел напруги (E1-r1 – E2-r2).

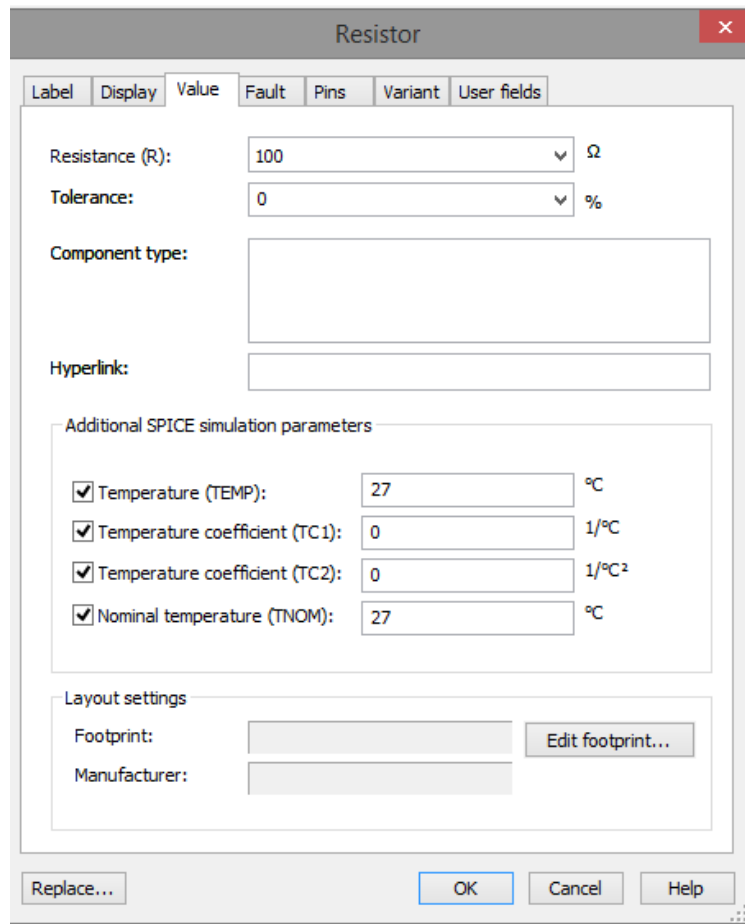


Рис. 2.4

2.4.6. Провести аналогічний дослід для заданих параметрів реального джерела струму і навантаження. Повторити дослід для паралельного з'єднання двох джерел струму (I1-r2 – I2-r2).

2.4.7. Розробити схеми і провести дослід для визначення еквівалентного опору при паралельному з'єднанні резисторів; при їх послідовному з'єднанні (взяти опори резисторів з додатку – R1, *a* та R1, *б*).

2.4.8. Розробити схеми і провести дослід при визначенні еквівалентних опорів при їх перетворенні з трикутника на зірку і навпаки.

2.5. Вимоги до звіту

2.5.1. Побудувати ВАХ резистора.

2.5.2. Побудувати графік залежності опору резистора від температури оточуючого середовища.

2.5.3. Побудувати ВАХ ідеальних і реальних джерел живлення.

2.5.4. Навести і обґрунтувати розроблені схеми для заміру еквівалентних параметрів резисторів. Порівняти експериментальні результати з обчисленими.

2.4.5. У звіті необхідно навести схеми, таблиці і графіки проведених досліджень.

2.4.6. Зробити власні висновки за результатами роботи.

2.6. Питання до атестації

2.6.1. Пояснити різницю між джерелом ЕРС і джерелом напруги.

2.6.2. Пояснити різницю між ідеальними і реальними джерелами струму та джерелами напруги.

2.6.3. Обґрунтувати способи знаходження еквівалентного опору резистора, ємності конденсаторів, індуктивності дроселів при їх послідовному і паралельному з'єднанні.

2.4.4. Пояснити, що таке температурний коефіцієнт.

2.6.4. Пояснити причини температурної залежності опорів. Чи можуть коефіцієнти температурної залежності мати від'ємні значення?

2.7. Задачі для тестування

2.7.1. Визначити еквівалентний опір групи резисторів у відповідності до схеми на рис. 2.5.

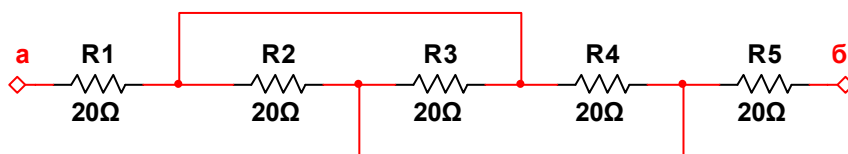


Рис. 2.5

2.7.2. Побудувати ВАХ такого джерела напруги, яке містить у собі 6 елементів з ЕРС $E = 2,2 \text{ В}$ і внутрішнім опором $r_0 = 0,01 \text{ Ом}$.

2.7.3. На рис. 2.6 наведена схема електричного кола. Відомо, що крізь резистор R_2 протікає струм $I = 1 \text{ А}$. Визначити ЕРС ідеального джерела напруги, підключеного до клем a і b резистивної збірки, і струми, що протікають крізь резистори R_1 та R_3 .

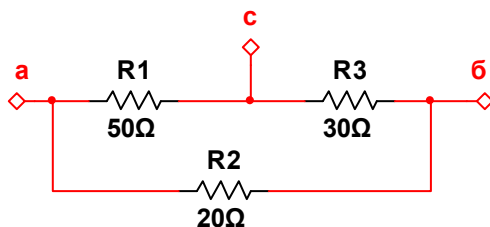


Рис. 2.6

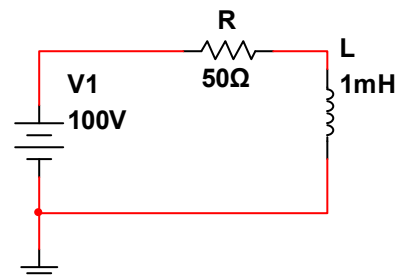


Рис. 2.7

2.7.4. Побудувати ВАХ джерела струму, яке містить у собі 3 батареї зі струмом $I = 1,1 \text{ А}$ і внутрішнім опором $r_0 = 1 \text{ МОм}$.

2.7.5. На рис. 2.6 наведена схема електричного кола. Відомо, що крізь опір R_3 протікає струм $I = 1$ А. Визначити напруги U_{ab} , U_{bc} , U_{ac} .

2.7.6. Яка потужність виділяється на навантаженні $R_H = 5$ Ом, якщо навантаження приєднане до джерела з параметрами, які були отримані в задачі 2.7.2?

2.7.7. Визначити, яка енергія накопичена в індуктивності $L = 1$ мГн, що розміщена в електричному колі, яке зображене на рис. 2.7. Чи залежить вона від величини опору R ?

2.7.8. Джерело напруги з ЕРС $E = 10$ В і $r_0 = 0.1$ Ом працює на навантаження R . Визначити величину R , при якому потужність, що віддається джерелом в навантаження, буде мати максимальну величину.

2.7.9. На рис. 2.8 наведена схема пристрою для зарядки конденсатора від ідеального джерела струму. Які обмеження накладаються на роботу пристрою? Визначити залежність, що існує між струмом та напругою на конденсаторі. Як у часі змінюється напруга на конденсаторі?

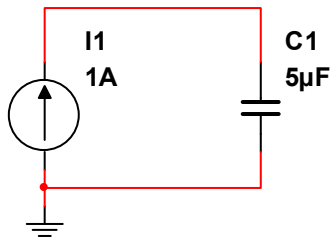


Рис. 2.8

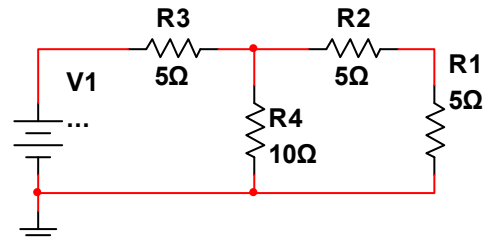


Рис. 2.9

2.7.10. Визначити величину падіння напруги на R_3 , якщо струм через R_1 дорівнює 0.1 А (рис. 2.9).

2.7.11. До джерела ЕРС з $E = 1.5$ В і внутрішнім опором $r_0 = 2.5$ Ом під'єднали резистор з опором $R = 10$ Ом. Визначити струм, який протікатиме в утвореному електричному колі, та падіння напруги на джерелі.

2.7.12. Визначити ЕРС генератора та його внутрішній опір, якщо при потужності навантаження $P_1 = 2.7$ кВт напруга на затискачах генератора дорівнює $U_1 = 225$ В, а при потужності $P_2 = 1.84$ кВт напруга на затискачах $U_2 = 230$ В.

2.7.13. До джерела постійної напруги $U = 150$ В під'єднали навантаження, яке складається з 4-х паралельних гілок. Потужності, що споживаються кожною гілкою, дорівнюють: $P_1 = 90$ Вт; $P_2 = 270$ Вт; $P_3 = 157.5$ Вт; $P_4 = 360$ Вт. Визначити провідність і струм кожної гілки; загальну провідність та еквівалентний опір навантаження.

2.7.14. Визначити струм I_1 , що протікає крізь резистор R_1 , якщо $U = 150$ В; $R_1 = R_2 = R_3 = 50$ Ом (рис. 2.10).

2.7.15. Визначити напругу U , якщо струм крізь резистор R_2 $I_2 = 1$ А; $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ кОм (рис. 2.11).

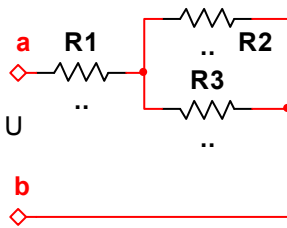


Рис. 2.10

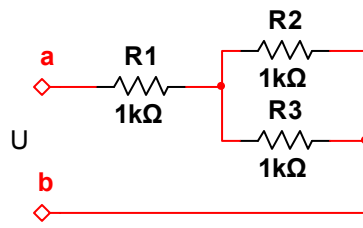


Рис. 2.11

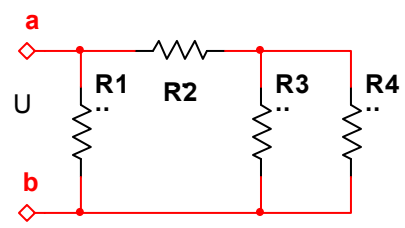


Рис. 2.12

2.7.16. Визначити струм I_2 , що протікає крізь резистор R_2 , якщо $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 6 \text{ Ом}$; $R_3 = R_4 = 8 \text{ Ом}$; $U = 10 \text{ В}$ (рис. 2.12).

2.7.17. Визначити струм I_3 , що протікає крізь резистор R_3 , якщо $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 1,5 \text{ Ом}$; $R_3 = R_4 = 3 \text{ Ом}$; $U = 16 \text{ В}$ (рис. 2.12).

2.7.18. Як зміняться струм і напруга після нагріву опору R_3 (рис. 2.12)?

2.7.19. Визначити опір R_{ab} , якщо $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 6 \text{ Ом}$; $R_3 = R_4 = 8 \text{ Ом}$ (рис. 2.12).

2.7.20. Визначити опір R_3 , якщо $U = 120 \text{ В}$; ватметр показує $P = 400 \text{ Вт}$; $R_1 = 20 \text{ Ом}$; $R_2 = 30 \text{ Ом}$ (рис. 2.13).

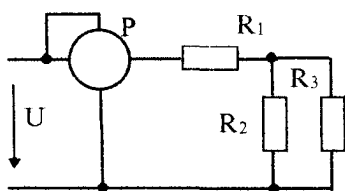


Рис. 2.13

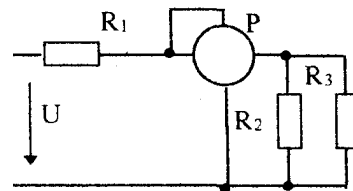


Рис. 2.14

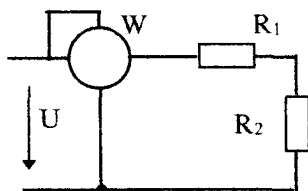


Рис. 2.15

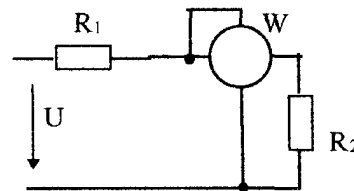


Рис. 2.16

2.7.21. Визначити, що покаже ватметр, якщо $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 8 \text{ Ом}$; $U = 49 \text{ В}$ (рис. 2.14).

2.7.22. Визначити опір R_2 , якщо $R_1 = 20 \text{ Ом}$; ватметр показує $P = 200 \text{ Вт}$; $U = 100 \text{ В}$ (рис. 2.15).

2.7.23. Визначити показання ватметра W , якщо $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $U = 14 \text{ В}$ (рис. 2.16).

2.7.24. Два конденсатори з ємностями $C_1 = 10 \text{ мкФ}$ і $C_2 = 15 \text{ мкФ}$ з'єднані послідовно. Визначити їхню еквівалентну ємність.

2.7.25. Три конденсатори з ємностями $C_1 = 47 \text{ пФ}$; $C_2 = 75 \text{ пФ}$; $C_3 = 2 \text{ мкФ}$ з'єднані паралельно. Визначити загальну ємність цієї ділянки електричного кола.

2.7.26. Дві індуктивні котушки з індуктивностями $L_1 = 15 \text{ мГн}$ і $L_2 = 27 \text{ мГн}$ з'єднані послідовно. Визначити еквівалентну індуктивність утвореної ділянки електричного кола.

2.7.27. Для електричного кола, що зображене на рис. 2.17, визначити еквівалентний опір відносно затискачів $a - b$, якщо резистори мають наступні опори: $R_1 = 4 \text{ Ом}$; $R_2 = 3 \text{ Ом}$; $R_3 = 6 \text{ Ом}$; $R_4 = 2 \text{ Ом}$; $R_5 = R_6 = 4 \text{ Ом}$; $R_7 = 9 \text{ Ом}$.

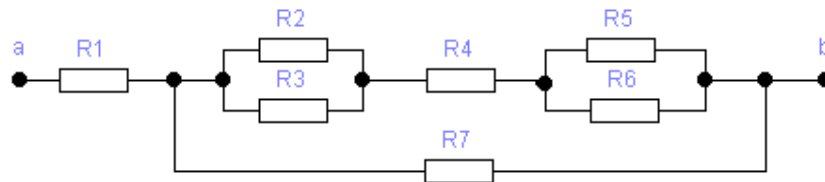


Рис. 2.17

2.7.28. На джерело напруги $U_1 = 4,5 \text{ В}$ навантажено опір $R = 250 \text{ Ом}$. Напруга на затискачах того ж джерела без навантаження $U_2 = 4,77 \text{ В}$. Визначити внутрішній опір джерела.

2.7.29. До джерела постійної напруги $E = 125 \text{ В}$ послідовно під'єднані три резистора з опорами $R_1 = 100 \text{ Ом}$; $R_2 = 30 \text{ Ом}$; $R_3 = 120 \text{ Ом}$. Визначити струм в утвореному електричному колі, падіння напруги і потужність на кожному резисторі. Внутрішнім опором джерела знехтувати.

2.7.30. Резистори R_1 , R_2 , R_3 з'єднали послідовно і підвели напругу $U = 24 \text{ В}$. На резисторі з опором $R_1 = 8 \text{ Ом}$ виділяється потужність $P = 4,5 \text{ Вт}$. Визначити опори резисторів R_2 і R_3 та падіння напруги на кожному з них, якщо опір $R_1 = 0,5 R_2$.

2.7.31. Провідності 3-х паралельних гілок в електричному колі постійного струму дорівнюють: $G_1 = 0,015 \text{ См}$; $G_2 = 0,02 \text{ См}$; $G_3 = 0,016 \text{ См}$. Струм у нерозгалуженій частині кола $I = 4,8 \text{ А}$. Визначити прикладену напругу, струми у гілках і потужність, яка споживається схемою.

2.7.32. До джерела з напругою $U = 300 \text{ В}$ під'єднані паралельно чотири лампи накаливання з опорами $R_1 = R_2 = 1200 \text{ Ом}$; $R_3 = 500 \text{ Ом}$; $R_4 = 750 \text{ Ом}$. Визначити загальний опір і провідність кола; струми у лампах; загальну потужність, що споживається.

2.7.33. Визначити опір ламп накаливання, якщо потужності, що вказані на них, дорівнюють $P = 25; 40; 60; 100; 150; 500 \text{ Вт}$. Напруга $U = 220 \text{ В}$.

2.7.34. Електронагрівальний елемент споживає потужність $P = 770 \text{ Вт}$ при напрузі $U = 220 \text{ В}$. Визначити струм, що проходить крізь цей елемент.

2.7.35. Задані провідності чотирьох паралельних гілок: $G_1 = 0,11 \text{ См}$; $G_2 = 0,03 \text{ См}$; $G_3 = 0,07 \text{ См}$; $G_4 = 0,04 \text{ См}$. Визначити еквівалентну провідність та еквівалентний опір.

2.7.36. На рис. 2.18 представлена схема електричного кола з джерелом напруги $U = 50 \text{ В}$, на яке навантажений споживач у вигляді резистивної збірки:

$R_1 = 80 \text{ Ом}$; $R_2 = 300 \text{ Ом}$; $R_3 = 700 \text{ Ом}$; $R_4 = 110 \text{ Ом}$. Знайти струми в усіх гілках електричного кола.

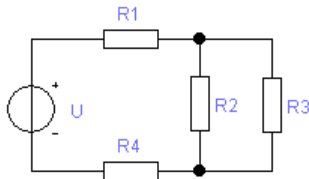


Рис. 2.18

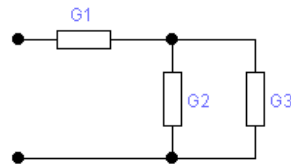


Рис. 2.19

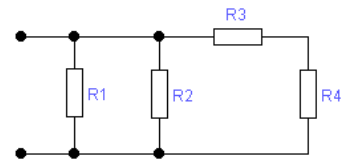


Рис. 2.20

2.7.37. Для електричної схеми, зображеної на рис. 2.19, задане значення еквівалентної провідності кола: $G = 0,025 \text{ См}$. Знайти провідність G_1 , якщо $G_2 = 0,01 \text{ См}$; $G_3 = 0,04 \text{ См}$.

2.7.38. Для електричного кола, зображеного на рис. 2.20, знайти загальну провідність, якщо $R_1 = 25 \text{ Ом}$; $R_2 = 50 \text{ Ом}$; $R_3 = 40 \text{ Ом}$; $R_4 = 60 \text{ Ом}$.

2.7.39. Визначити провідності G_2 та G_3 електричного кола (рис. 2.21), якщо $G_1 = 0,05 \text{ См}$; $G_4 = 0,2 \text{ См}$; $G_5 = 0,1 \text{ См}$; загальна провідність дорівнює $G = 0,17 \text{ См}$, а провідність $G_2 = G_3$.

2.7.40. Визначити еквівалентний опір на затискачах $a - b$ схеми, зображеної на рис. 2.22, де $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$; $R_2 = 5 \text{ Ом}$; $R_3 = 9 \text{ Ом}$.

2.7.41. Визначити еквівалентний опір електричного кола, що наведене на рис. 2.23, якщо $R_1 = 2,5 \text{ Ом}$; $R_2 = 6 \text{ Ом}$; $R_3 = 2 \text{ Ом}$; $R_4 = 1,5 \text{ Ом}$; $R_5 = 3 \text{ Ом}$.

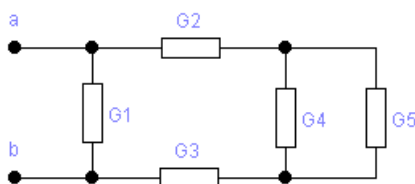


Рис. 2.21

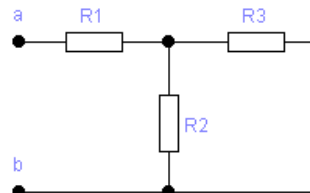


Рис. 2.22

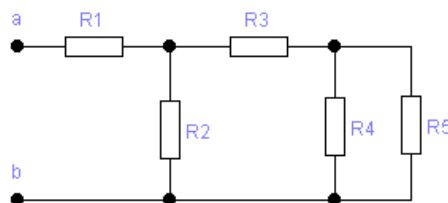


Рис. 2.23

2.7.42. Три джерела постійної напруги, що мають ЕРС по $4,5 \text{ В}$ кожний, з внутрішнім опором $r_0 = 0,6 \text{ Ом}$, з'єднали паралельно. Потім на ці джерела навантажили резистор з опором $R = 2,4 \text{ Ом}$. Визначити струм навантаження і падіння напруги на джерелах.

2.7.43. До батареї з трьох паралельно з'єднаних акумуляторів з ЕРС $E = 2,4 \text{ В}$ і внутрішнім опором $r_0 = 0,75 \text{ Ом}$ кожний, під'єднали навантаження з опором, що змінюється в діапазоні від $0,35 \text{ Ом}$ до $2,75 \text{ Ом}$. Визначити, у яких

межах змінюватиметься струм навантаження і потужність, що віддає джерело ЕРС, при максимальному і мінімальному значенні струму.

2.7.44. Резистор з номінальним опором $R = 44 \text{ Ом}$ працює при температурі 45°C . Температурний коефіцієнт резистора дорівнює $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$. Визначити дійсний опір резистора.

2.7.45. Резистор з номінальним опором $R = 44 \text{ Ом}$ працює при температурі 5°C . Температурний коефіцієнт резистора дорівнює $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$. Визначити дійсний опір резистора.

2.7.46. На рис. 2.24 наведені ВАХ двох резисторів. Який з них має більшу величину?

2.7.47. На рис. 2.25 наведені ВАХ двох джерел постійної напруги. В якому з них внутрішній опір менший?

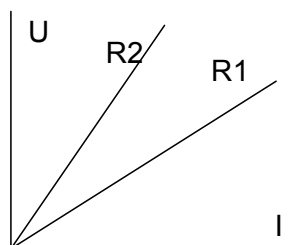


Рис. 2.24

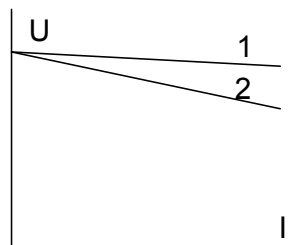


Рис. 2.25

2.8. Додаток

Таблиця варіантів до схем, що наведені на рис. 2.1 та 2.2.

Номер варіанту	TC1	TC2	T, град	E1, В	E2, В	r1, Ом	I1, mA	I2, mA	r2, Ом	R1a, Ом	R1б, Ом
1	0,1	0,3	25	12	200	1	100	700	10к	12	100
2	0,2	0,25	30	24	100	1	200	800	15к	30	200
3	0,1	0,26	24	36	150	2	300	900	18к	60	300
4	0,05	0,23	31	30	170	1	380	700	5к	50	350
5	0,15	0,3	23	20	190	1	500	800	5,5к	40	50
6	0,18	0,29	32	20	180	1	500	900	7к	40	250
7	0,3	0,1	22	25	300	1	130	700	16к	80	150
8	0,21	0,2	33	15	120	1	220	800	19к	60	200
9	0,22	0,1	21	10	150	2	360	900	11к	65	400
10	0,23	0,1	34	30	170	1	350	700	6к	34	280
11	0,3	0,15	20	35	190	1	50	800	9к	55	550
12	0,27	0,12	35	14	140	1	250	900	7к	45	320
13	0,11	0,25	19	20	170	2	130	700	7к	60	250
14	0,17	0,21	36	25	190	1	220	800	16к	65	150
15	0,15	0,23	18	15	180	1	360	900	19к	34	200

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕЗ

Методи розрахунку електричних кіл постійного струму за допомогою законів Кірхгофа та методу контурних струмів

3.1. Мета роботи

Експериментальна перевірка методів розрахунку електричних кіл постійного струму (методу на основі рівнянь Кірхгофа і методу контурних струмів).

3.2. Основні теоретичні положення

Електричні кола поділяються на нерозгалужені та розгалужені. Основними складовими електричного кола є гілка та вузол. **Гілка** – це ділянка електричного кола, яка утворена послідовно з'єднаними елементами, що розміщується між двома вузлами. **Вузол** – це точка кола, в якій збігається не менше трьох гілок.

Перший закон Кірхгофа має наступне формулювання: алгебраїчна сума струмів у вузлі електричного кола дорівнює нулю. При складанні рівнянь ті струми, що входять у вузол, приймають зі знаком «плюс» (+), а ті, що виходять з вузла, – зі знаком «мінус» (–).

Другий закон Кірхгофа: алгебраїчна сума падіння напруг на резисторах контуру, що досліджується, дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС цього контуру.

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа спочатку задають напрямки обходу контурів і напрямки протікання струмів у гілках кола. Після цього використовують наступне правило: при обході контуру складові беруть зі знаком (+), якщо напрямок струму чи ЕРС співпадають із напрямком обходу, і зі знаком (–), якщо ці напрямки протилежні.

Якщо в електричне коло ввімкнено два джерела енергії, дії ЕРС яких збігаються за напрямом, тобто ввімкнені узгоджено, то ЕРС усього кола дорівнює сумі ЕРС цих джерел: $E_{\text{заг.}} = E_1 + E_2$. Якщо ж у коло ввімкнено два джерела, ЕРС яких мають протилежні напрямки, тобто ввімкнені зустрічно, то загальна ЕРС кола дорівнює різниці між ЕРС цих джерел: $E_{\text{заг.}} = E_1 - E_2$.

За допомогою законів Кірхгофа можна розрахувати будь-яке електричне коло. Але у випадку складних розгалужень треба розв'язувати дуже громіздку систему рівнянь. Спростити розрахунки можна за допомогою методу контурних струмів (МКС). Суть МКС полягає у наступному:

1. Запроваджується поняття про контурні струми, що є умовними та замикаються лише на своїх контурах.
2. Контурні струми зв'язуються аналітично зі справжніми струмами у гілках електричного кола.
3. Складається система рівнянь за другим законом Кірхгофа для контурних струмів. Кількість контурних струмів є значно меншою, ніж справжніх, тож зменшується і кількість рівнянь у системі.
4. Розв'язується система рівнянь та визначаються контурні струми.

5. За допомогою аналітичних залежностей знаходяться справжні струми гілок.

3.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи використовується узагальнена електрична схема, яку наведено на рис. 3.1. Варіанти роботи наводяться у додатку. В кожному варіанті маємо чотири джерела ЕРС і одне джерело струму.

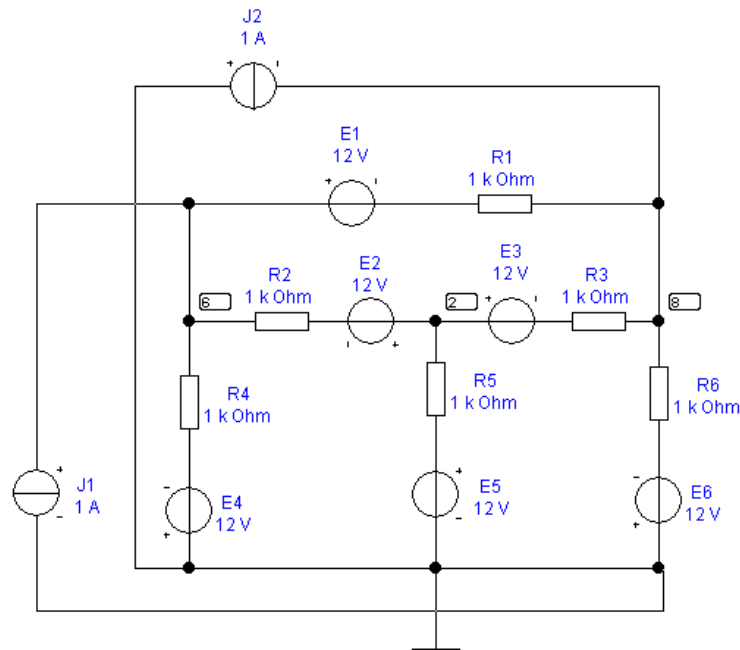


Рис. 3.1

3.4. Порядок виконання роботи

3.4.1. Проаналізувати схему, наведену на рис. 3.1, і спростити її, виходячи з обраного варіанту.

3.4.2. Встановити прилади, необхідні для проведення вимірювань струму в гілках електричного кола.

3.4.3. Встановити необхідні величини ЕРС джерел живлення і джерела струму з урахуванням їхньої полярності.

3.4.4. Встановити величини опорів відповідно до обраного варіанту.

3.4.5. Включити електричну схему в роботу і, виконавши вимірювання струмів і напруг, записати їх значення до підготовленої таблиці.

3.4.6. Використовуючи рівняння Кірхгофа, виконати розрахунки струмів у гілках схеми, яка досліджується.

3.4.7. Провести аналогічні розрахунки, використовуючи метод контурних струмів.

3.4.8. Порівняти результати вимірювань з виконаними розрахунками і зробити висновки.

3.5. Вимоги до звіту

3.5.1. Навести принципову схему, дослідження якої виконувалось у роботі, і результати експериментальних досліджень.

3.5.2. Виконати розрахунки струмів і напруг електричної схеми вказаними методами (методом на основі рівнянь Кірхгофа та методом контурних струмів).

3.5.3. Навести порівняльну таблицю експериментальних і розрахункових результатів.

3.5.4. Розробити програму і виконати розрахунки з використанням ЕОМ.

3.5.5. Зробити власні висновки за результатами роботи.

3.6. Питання до атестації

3.6.1. Сформулювати перший закон Кірхгофа для кіл постійного струму.

3.6.2. Сформулювати другий закон Кірхгофа для кіл постійного струму.

3.6.3. Подумати, які ще назви можна було б дати першому та другому законам Кірхгофа.

3.6.4. Дати пояснення особливостям використання рівнянь Кірхгофа для розрахунку електричних кіл постійного струму.

3.6.5. Пояснити особливості використання методу контурних струмів для розрахунку електричних кіл постійного струму.

3.6.6. Сформулювати закон Ома для ділянки електричного кола.

3.6.7. Сформулювати закон Ома для замкненого електричного кола.

3.7. Задачі

3.7.1. Визначити величину струму I_1 , якщо $E_1 = 20$ В; $E_2 = 6$ В; $R_1 = 20$ Ом; $R_2 = 80$ Ом (рис. 3.2).

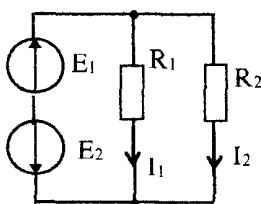


Рис. 3.2

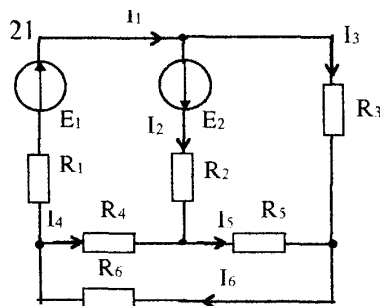


Рис. 3.3

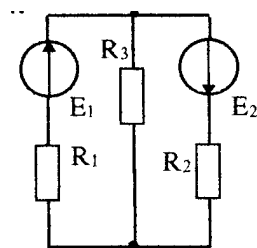


Рис. 3.4

3.7.2. Яку кількість незалежних рівнянь рівноваги напруг можна скласти за другим законом Кірхгофа, якщо електрична схема має p гілок і q вузлів?

3.7.3. Вказати правильні рівняння для електричної схеми, наведеної на рис. 3.3:

1. $R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_1 + E_2$;
2. $R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2$;

$$3. R_4 I_4 + R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

$$5. I_2 + I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.4. Яку кількість незалежних рівнянь рівноваги струмів можна скласти за першим законом Кірхгофа для довільного складного електричного кола з q вузлами і p гілками, якщо відомі ЕРС джерел живлення та опори окремих гілок?

3.7.5. На рис. 3.4 задані ЕРС E_1, E_2 та опори R_1, R_2, R_3 . Яку кількість рівнянь потрібно скласти для знаходження усіх струмів за методом рівнянь Кірхгофа?

3.7.6. На рис. 3.4 задані ЕРС E_1, E_2 та опори R_1, R_2, R_3 . Яку кількість рівнянь потрібно скласти для знаходження усіх струмів за методом контурних струмів?

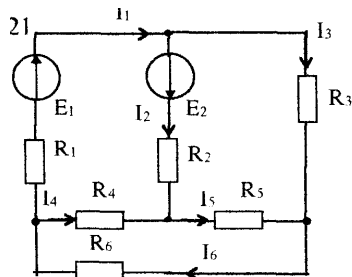


Рис. 3.5

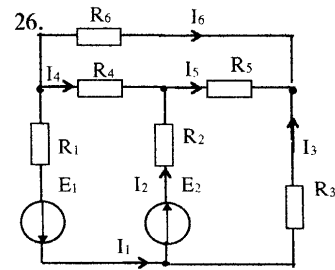


Рис. 3.6

3.7.7. Вказати правильні рівняння (рис. 3.5):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$3. R_4 I_4 + R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_1 - I_2 + I_3 = 0;$$

$$5. I_2 + I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.8. Вказати правильні рівняння (рис. 3.5):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_1 - E_2;$$

$$2. R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = -E_2;$$

$$3. R_4 I_4 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$5. I_2 - I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.9. Вказати правильні рівняння (рис. 3.5):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = -E_2;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 + R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

$$5. I_2 - I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.10. Вказати правильні рівняння (рис. 3.6):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_1 - E_2;$$

$$2. R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = -E_2;$$

$$3. R_4 I_4 + R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_1 + I_2 + I_3 = 0;$$

$$5. I_2 - I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.11. Вказати правильні рівняння (рис. 3.6):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = -E_2;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_5 - I_6 = 0;$$

$$5. I_2 - I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.12. Вказати правильні рівняння (рис. 3.6):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_5 - I_6 = 0;$$

$$5. I_2 - I_4 + I_5 = 0.$$

3.7.13. Яку загальну кількість незалежних рівнянь рівноваги струмів і напруг можна скласти за першим і другим законом Кірхгофа для довільного складного електричного кола з **q** вузлами і **p** гілками?

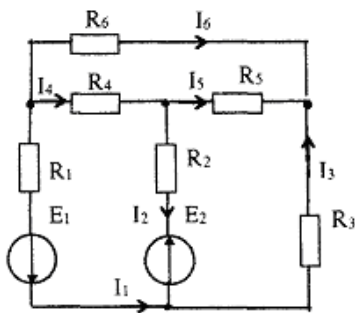


Рис. 3.7

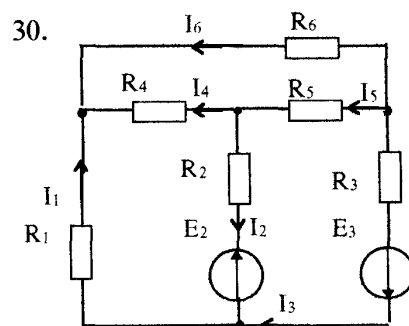


Рис. 3.8

3.7.14. Вказати правильні рівняння (рис. 3.7):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. -R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_5 - I_6 = 0;$$

$$5. I_2 - I_4 - I_5 = 0.$$

3.7.15. Вказати правильні рівняння (рис. 3.7):

$$1. R_1 I_1 - R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_5 - I_6 = 0;$$

$$5. I_2 - I_4 - I_5 = 0.$$

3.7.16. Вказати правильні рівняння (рис. 3.7):

$$1. R_1 I_1 - R_2 I_2 + R_4 I_4 = E_1 + E_2;$$

$$2. -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_5 - I_6 = 0;$$

$$5. -I_2 + I_4 - I_5 = 0.$$

3.7.17. Вказати правильні рівняння (рис. 3.8):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = -E_2;$$

$$2. -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2 + E_3;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_2 + I_1 = 0;$$

$$5. -I_1 + I_4 - I_6 = 0.$$

3.7.18. Вказати правильні рівняння (рис. 3.8):

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_2;$$

$$2. -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2 + E_3;$$

$$3. R_4 I_4 - R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_2 + I_1 = 0;$$

$$5. I_3 + I_4 + I_6 = 0.$$

3.7.19. Вказати правильні рівняння (рис. 3.8).

$$1. R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_4 I_4 = E_2;$$

$$2. -R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_5 I_5 = E_2 + E_3;$$

$$3. R_4 I_4 + R_5 I_5 - R_6 I_6 = 0;$$

$$4. I_3 + I_2 + I_1 = 0;$$

$$5. I_1 - I_4 - I_6 = 0.$$

3.7.20. Скласти рівняння за методом контурних струмів для електричної схеми, наведеної на рис. 3.2.

3.7.21. Скласти рівняння за методом контурних струмів (рис. 3.3).

3.7.22. Скласти рівняння за методом контурних струмів (рис. 3.4).

3.7.23. Скласти рівняння за методом контурних струмів (рис. 3.5).

3.7.24. Скласти рівняння за методом контурних струмів (рис. 3.6).

3.7.25. Скласти рівняння за методом контурних струмів (рис. 3.7).

3.7.26. Скласти рівняння за методом контурних струмів (рис. 3.8).

3.7.27. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.2).

3.7.28. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.3).

3.7.29. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.4).

3.7.30. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.5).

3.7.31. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.6).

3.7.32. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.7).

3.7.33. Скласти рівняння за допомогою законів Кірхгофа (рис. 3.8).

3.8. Додаток

Таблиця варіантів до схеми, яка наведена на рис. 3.1.

Номер варіанту	E1, В	E2, В	E3, В	E4, В	E5, В	E6, В	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом
1	—	15	45	65	56	—	34	789	44	24	10	16
2	—	—	62	34	13	19	26	366	226	66	98	3
3	36	—	—	87	55	10	89	34	28	39	37	20
4	20	32	—	—	12	77	36	33	56	98	28	46
5	88	12	15	—	—	31	27	38	30	27	26	10
6	21	34	45	26	—	—	25	18	321	77	923	12
7	—	36	43	79	94	—	27	35	19	44	89	356
8	—	—	46	38	47	99	100	260	330	470	56	62
9	40	—	—	29	97	33	33	27	18	150	120	11
10	24	53	—	—	64	32	44	16	22	48	111	74
11	16	23	47	—	—	76	22	19	83	20	18	78
12	34	46	27	48	—	—	26	37	39	90	71	14
13	—	16	47	43	26	—	367	39	93	56	28	19
14	—	—	40	50	60	70	100	80	60	40	20	10
15	15	—	—	31	25	30	20	50	10	10	20	30

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ4

Методи розрахунку електричних кіл постійного струму за допомогою методів вузлових потенціалів, суперпозиції та еквівалентного генератора

4.1. Мета роботи

Експериментальна перевірка методів розрахунку електричних кіл постійного струму (методу вузлових потенціалів, методу суперпозиції та методу еквівалентного генератора).

4.2. Основні теоретичні положення

Струм будь-якої гілки електричного кола можна знайти з використанням закону Ома для ділянки кола, але для цього необхідно знати потенціали всіх вузлів. Метод, в якому за невідомі змінні, котрі необхідно знайти, беруться потенціали вузлів, називаються *методом вузлових потенціалів*. Для використання цього методу необхідно прийняти потенціал одного з вузлів як відомий (краще за все потенціал обраного вузла прийняти за нульовий). Подальші розрахунки базуються на використанні першого закону Кірхгофа і закону Ома.

Якщо електричні кола мають декілька джерел живлення, то для обчислення струмів у гілках цих кіл можна застосовувати метод суперпозиції (метод накладання). Цей метод складається з наступних кроків:

1. Складне електричне коло замінюється декількома елементарними колами, кожне з яких має одне джерело електричної енергії, інші ж замінюються опорами, що дорівнюють внутрішнім опорам джерел.
2. Робиться розрахунок елементарних кіл, визначаються величини та напрямки струмів у кожній гілці.
3. Після розрахунку кожного кола результуючий струм знаходиться як алгебраїчна сума струмів від кожного джерела.

Метод еквівалентного генератора базується на тому, що частину схеми, яка не представляє інтересу при розрахунках, окрім тієї, що розглядається, незалежно від кількості пасивних і активних елементів, можна замінити одним активним і одним пасивним елементом. Основою методу є теорема про активний двополіусник: *будь-яке багатоелементне електричне коло, до якого приєднана пасивна або активна гілка, може бути замінено еквівалентним двох-елементним двополіусником з параметрами $E_{ек}$ і $R_{ек}$ або $I_{ек}$ і $g_{ек}$* . Режим досліджуваної гілки, що приєднана до двополіусника, при цьому не зміниться. Для визначення ЕРС та опору скористаємось режимами холостого ходу та короткого замикання для джерела напруги.

Послідовність розрахунку:

1. Складаємо еквівалентну схему. Коло розділимо на дві частини: гілка, в якій потрібно визначити струм (зовнішня частина), та все інше коло (внутрі-

шня частина). За теоремою про еквівалентний генератор усю внутрішню частину можна замінити одним джерелом енергії з ЕРС E_e та опором R_e . Еквівалентна схема представляє собою послідовно з'єднані елементи: елемент гілки (R_1), в якій необхідно визначити струм, джерело ЕРС E_e та резистор R_e .

2. Обчислюємо параметри еквівалентного генератора.

ЕРС еквівалентного генератора E_e дорівнює напрузі на клеммах внутрішньої частини кола U_{xx} при відімкнутій зовнішній частині кола.

Визначаємо опір еквівалентного генератора R_e , який дорівнює опору внутрішньої частини кола при відімкнутій зовнішній частині кола.

3. Визначаємо струм за формулою:

$$I = \frac{E_e}{R + R_e}.$$

4.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи спочатку використовуються узагальнені електричні схеми, наведені на рис. 4.1, *а*, *б* (вивчення методу вузлових потенціалів).

Вивчення методів суперпозиції та еквівалентного генератора проводиться з використанням схеми, що зображена на рис. 4.2.

Варіанти робіт наводяться у додатках.

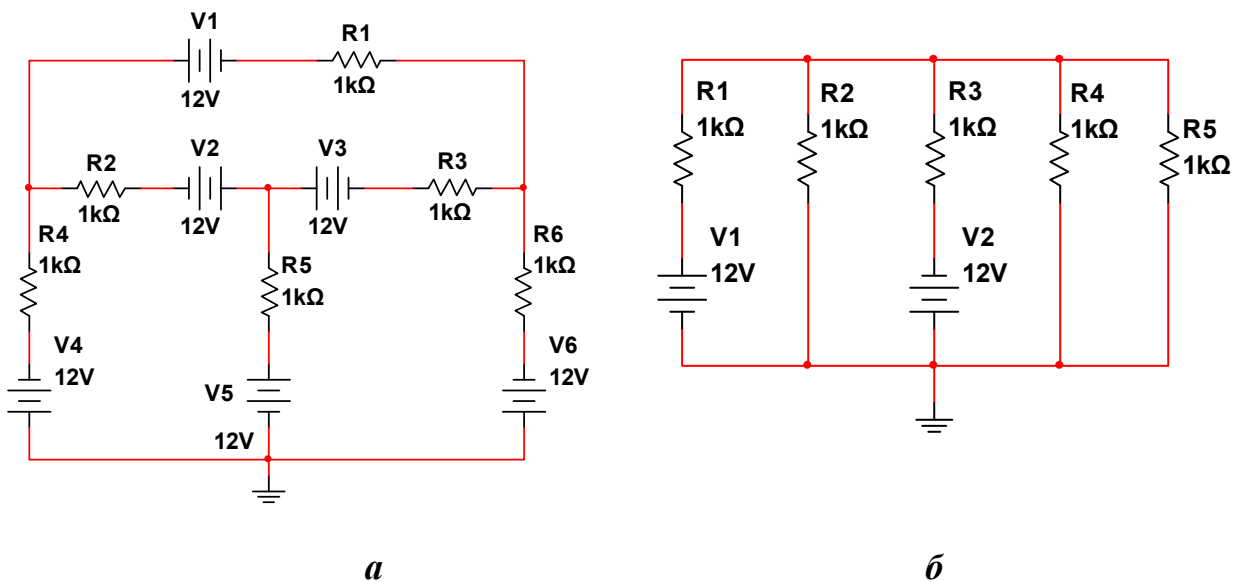


Рис. 4.1

4.4. Порядок виконання роботи

4.4.1. Проаналізувати схему, наведену на рис. 4.1, *а* або рис. 4.1, *б*, та спростити її, виходячи з умов обраного варіанту.

4.4.2. Встановити прилади, необхідні для проведення вимірювань потенціалів у вузлах розрахункової схеми.

4.4.3. Встановити необхідні величини ЕРС джерел з урахуванням їх полярності.

4.4.4. Встановити величини опорів у відповідності до обраного варіанта.

4.4.5. Включити електричну схему в роботу і, виконавши відповідні вимірювання напруг, записати їх значення у підготовлену таблицю.

4.4.6. Використовуючи рівняння, складені у відповідності до закону Ома, виконати розрахунки струмів у гілках схеми, що досліджується.

4.4.7. Встановити необхідну кількість вольтметрів і амперметрів у схему, що досліджується, для проведення необхідних вимірів.

4.4.8. Включити схему і виконати необхідні вимірювання. Виконати розрахунки відповідно до вашого варіанту. Результати порівняти з експериментальними даними.

4.4.9. Скласти схему, що наведена на рис. 4.2, і встановити параметри компонентів у відповідності до варіанту.

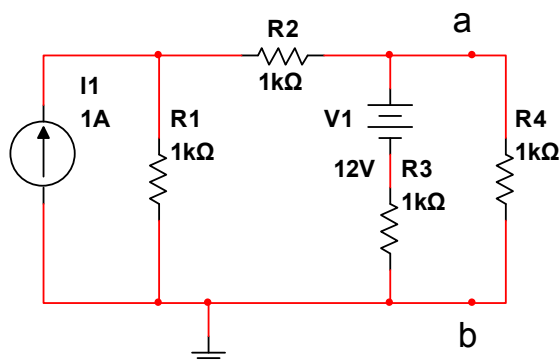


Рис. 4.2

4.4.10. Встановити у контрольні гілки вимірювальні прилади і виконати вимірювання струмів при дії обох джерел живлення.

4.4.11. Відключаючи по черзі одне, а потім друге джерело живлення, виконати вимірювання струмів у контрольних гілках.

4.4.12. Для контрольних точок *a – b*, використовуючи методи холостого ходу і короткого замикання, знайти еквівалентну ЕРС і внутрішній опір та зобразити схему заміщення у вигляді активного двополюсника.

4.4.13. Порівняти результати вимірювань з виконаними розрахунками і зробити висновки.

4.5. Вимоги до звіту

4.5.1. Навести електричні принципові схеми, дослідження яких проводились у роботі.

4.5.2. Навести результати експериментальних досліджень.

4.5.3. Виконати розрахунки струмів і напруг електричних схем вказаними методами. Для виконання розрахунків розробити програми на одній з мов програмування.

4.5.4. Навести порівняльні таблиці експериментальних і розрахункових результатів.

4.5.5. Зробити висновки за результатами роботи.

4.6. Питання до атестації

4.6.1. Дати пояснення особливостям використання методу вузлових потенціалів для розрахунку електричних кіл постійного струму. Обґрунтувати переваги і недоліки методу.

4.6.2. Навести приклади схем електричних кіл, для яких доцільно і недоцільно використовувати метод вузлових потенціалів.

4.6.3. Дати пояснення особливостям використання методу суперпозиції для розрахунку електричних кіл. Які, з Вашої точки зору, позитивні та негативні боки цього методу?

4.6.4. Пояснити особливості використання методу еквівалентного генератора для розрахунку електричних кіл постійного струму.

4.6.5. Навести приклади переважного використання методу еквівалентного генератора для розрахунку електричних кіл.

4.7. Задачі

4.7.1. Визначити струми у гілках електричного кола, схему якого зображено на рис. 4.3, методом еквівалентного генератора. Параметри схеми наступні: $I_k = 1$ А; $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 8$ Ом; $R_3 = 2$ Ом; $E_2 = 16$ В; $E_3 = 4$ В.

4.7.2. Визначити струми у гілках електричного кола, схему якого зображено на рис. 4.3, методом двох вузлів. Параметри схеми: $I_k = 1$ А; $R_1 = 5$ Ом; $R_2 = 8$ Ом; $R_3 = 2$ Ом; $E_2 = 16$ В; $E_3 = 4$ В.

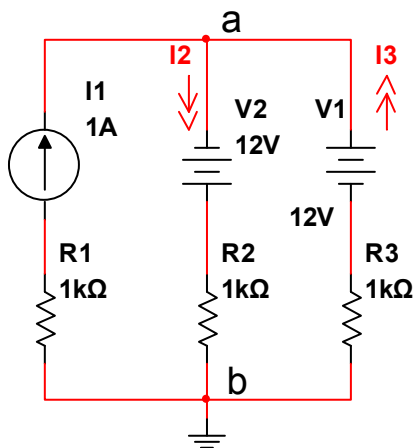


Рис. 4.3

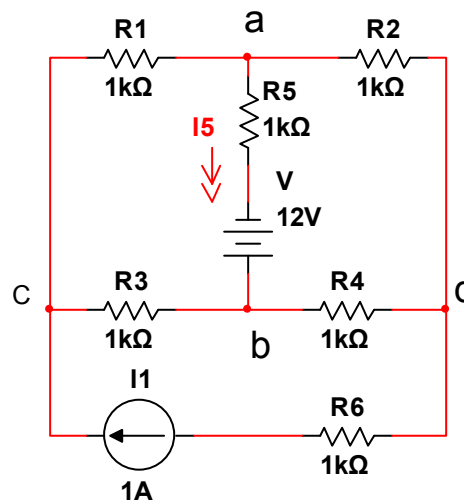


Рис. 4.4

4.7.3. Для електричної схеми на рис. 4.4 визначити струми у гілках методом еквівалентного генератора. Параметри схеми наступні: $R_1 = 1$ Ом; $R_2 = 2$ Ом; $R_3 = 3$ Ом; $R_4 = 14$ Ом; $R_5 = 0,6$ Ом; $R_6 = 3$ Ом; $I_k = 1$ А; $E_5 = 1$ В.

4.7.4. На електричній схемі (рис. 4.4) змінити полярність підключення джерела V і визначити струми у гілках методом еквівалентного генератора. Параметри схеми такі: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $I_k = 1 \text{ А}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.5. На електричній схемі (рис. 4.4) замінити джерело струму I_1 джерелом напруги V_2 і визначити струми у гілках методом еквівалентного генератора. Параметри схеми такі: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $E_2 = 5,1 \text{ В}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.6. На електричній схемі (рис. 4.4) замінити джерело струму I_1 на джерело напруги V_2 , змінити полярність джерела V на протилежну і визначити струми у гілках методом еквівалентного генератора. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $E_2 = 5,1 \text{ В}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.7. В електричному колі (рис. 4.4) визначити струми у гілках методом вузлових потенціалів. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $I_k = 1 \text{ А}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.8. На електричній схемі (рис. 4.4) змінити полярність підключення джерела V і визначити струми у гілках методом вузлових потенціалів. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $I_k = 1 \text{ А}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.9. На електричній схемі (рис. 4.4) замінити джерело струму I_1 джерелом напруги V_2 і визначити струми у гілках методом вузлових потенціалів. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $E_2 = 5,1 \text{ В}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.10. На електричній схемі (рис. 4.4) замінити джерело струму I_1 джерелом напруги V_2 та змінити полярність джерела V на протилежну і визначити струми у гілках методом вузлових потенціалів. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $E_2 = 5,1 \text{ В}$.

4.7.11. В електричній схемі (рис. 4.4) визначити струми у гілках за методом суперпозиції. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $I_k = 1 \text{ А}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.12. На електричній схемі (рис. 4.4) змінити полярність підключення джерела V і визначити струми у гілках методом суперпозицій. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $I_k = 1 \text{ А}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.13. В електричній схемі (рис. 4.4) замінити джерело струму I_1 джерелом напруги V_2 і визначити струми у гілках методом суперпозицій. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $E_2 = 5,1 \text{ В}$; $E_5 = 1 \text{ В}$.

4.7.14. В електричній схемі (рис. 4.4) замінити джерело струму I_1 джерелом напруги V_2 , змінити полярність джерела V на протилежну і визначити струми у гілках методом суперпозиції. Параметри схеми: $R_1 = 1 \text{ Ом}$; $R_2 = 2 \text{ Ом}$; $R_3 = 3 \text{ Ом}$; $R_4 = 14 \text{ Ом}$; $R_5 = 0,6 \text{ Ом}$; $R_6 = 3 \text{ Ом}$; $E_2 = 5,1 \text{ В}$.

4.8. Додатки

Таблиця варіантів до схеми, що наведена на рис. 4.1, а.

Номер варіанту	E1, В	E2, В	E3, В	E4, В	E5, В	E6, В	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом
1	—	15	45	65	56	—	34	789	44	24	10	16
2	—	—	62	34	13	19	26	366	226	66	98	3
3	36	—	—	87	55	10	89	34	28	39	37	20
4	20	32	—	—	12	77	36	33	56	98	28	46
5	88	12	15	—	—	31	27	38	30	27	26	10
6	21	34	45	26	—	—	25	18	321	77	923	12
7	—	36	43	79	94	—	27	35	19	44	89	356
8	—	—	46	38	47	99	100	260	330	470	56	62
9	40	—	—	29	97	33	33	27	18	150	120	11
10	24	53	—	—	64	32	44	16	22	48	111	74
12	16	23	47	—	—	76	22	19	83	20	18	78
13	34	46	27	48	—	—	26	37	39	90	71	14
14	—	16	47	43	26	—	367	39	93	56	28	19
15	—	—	65	54	49	44	47	80	29	73	50	27

Таблиця варіантів до схеми, що наведена на рис. 4.1, б.

Номер варіанту	E1, В	E3, В	E5, В	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом
1	12	15	45	65	56	34	34	789
2	23	34	62	34	13	19	26	366
3	36	24	19	87	55	10	89	34
4	20	32	65	24	12	77	36	33
5	88	12	15	40	75	31	27	38
6	21	34	45	26	38	71	25	18
7	31	36	43	79	94	26	27	35
8	10	18	46	38	47	99	105	260
9	40	55	42	29	97	33	33	27
10	24	53	17	49	64	32	44	16
12	16	23	47	49	89	76	22	19
13	34	46	27	48	42	19	26	37
14	22	16	47	43	26	49	367	39
15	24	19	37	53	39	41	231	23

Таблиця варіантів до схеми, що наведена на рис. 4.2.

Номер варіанту	J, А	Е, В	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом
1	1	15	45	65	56	34
2	2	34	62	34	13	19
3	3	24	19	87	55	10
4	2	32	65	24	12	77
5	8	12	15	40	75	31
6	2	34	45	26	38	71
7	3	36	43	79	94	26
8	1	18	46	38	47	99
9	4	55	42	29	97	33
10	2	53	17	49	64	32
12	7	23	47	49	89	76
13	3	46	27	48	42	19
14	2	16	47	43	26	49
15	1	53	78	97	49	14

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА TE5

Дослідження електричних кіл змінного струму

5.1. Мета роботи

Вивчення особливостей електричних кіл з джерелами змінного струму.

Для забезпечення вказаної мети у роботі планується:

- вивчення особливостей вимірювання амплітудних і діючих значень напруг та струмів, їх частоти й зміщення фаз між двома сигналами з використанням осцилографа;
- вивчення особливостей послідовного з'єднання джерел напруги й паралельного з'єднання джерел струму при різних початкових фазах;
- вивчення особливостей вимірювання потужності в електричних колах змінного струму з активним і реактивним навантаженням;
- вивчення особливостей взаємозв'язку між струмами і напругами в електричних колах змінного струму з індуктивностями й конденсаторами.

5.2. Основні теоретичні положення

Синусоїдальний сигнал $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_0)$ – це функція часу з початковою фазою ψ_0 , амплітудою U_m та кутовою частотою ω , що вимірюється в с^{-1} і пов'язана з періодом синусоїдальних коливань T формулою: $\omega = 2\pi / T$. Кількість періодів за одну секунду – це частота коливань, яка вимірюється у герцах: $f = 1 / T$.

Діючим значенням синусоїдального струму є значення такого постійного струму, що виробляє еквівалентну змінному теплову чи механічну дію. Діюче значення синусоїдальної величини у $\sqrt{2}$ разів менше, ніж її амплітудне значення.

При обчисленні струмів і напруг у розгалужених електричних схемах використовуються закони Ома і Кірхгофа в комплексній формі зображення.

Струм в електричному колі з активним опором, увімкнутим на синусоїдальну напругу, є синусоїдальним та збігається з напругою за фазою. При вмиканні індуктивності у синусоїдальне коло струм залишається синусоїдальним і відстає від напруги на кут 90° . При вмиканні ємності на синусоїдальну напругу у колі встановлюється синусоїдальний струм, що випереджає напругу на 90° .

5.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Віртуальна лабораторія **Multisim** має можливості продемонструвати особливості роботи електричних кіл змінного струму. Як відмічалось у роботі TE1, джерела змінного струму й напруги знаходяться в меню **Sources**. У вікні **AC Voltage Source Properties** є можливості для встановлення амплітуд напруг і струмів, їх частот, а також початкових фаз. Вимірювання цих параметрів по-

вністю може бути забезпечено за допомогою осцилографа, а діючі значення напруги і струмів можливо вимірювати цифровими амперметром і вольтметром. Для вимірювання потужності у бібліотеці інструментів **Instruments** слід обрати **Wattmeter**. Його зображення на схемі та інтерфейс наведені на рис. 5.1.

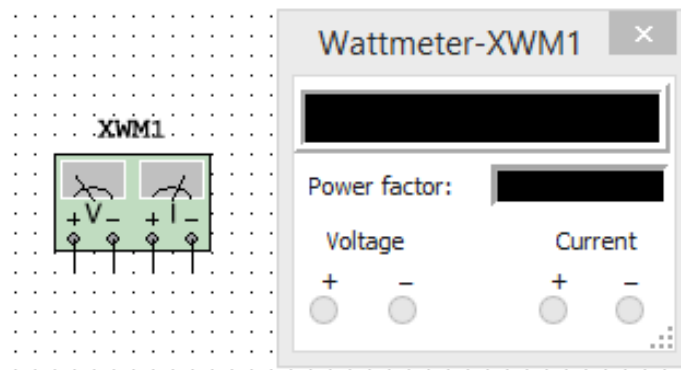


Рис. 5.1

Можливо також використовувати перемножувач (**Multiplier**) двох сигналів, який обирається з меню **Controls**. Особливості використання перемножувача можна знайти в меню **Help**, а відповідні схеми з перемножувачем будуть запропоновані дещо пізніше.

5.4. Порядок виконання роботи

5.4.1. Скласти схему у відповідності до рис. 5.2 і встановити напругу (**U**) і частоту (**F**), відповідно до варіанту. За допомогою осцилографа заміряти амплітуду й частоту напруги. Встановити фазу напруги 90° і заміряти її за допомогою осцилографа. Осцилограми додати до звіту.

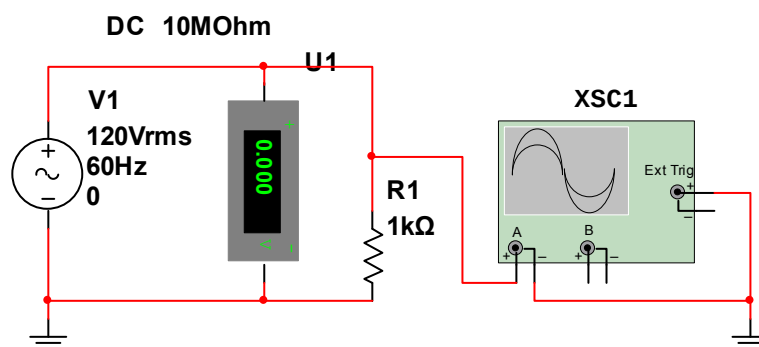


Рис. 5.2

5.4.2. Встановити послідовно два джерела напруги із заданими амплітудами (U_{m1} та U_{m2}) і фазами (ϕ_1 та ϕ_2). За допомогою осцилографа заміряти кут зсуву між результуючою напругою й напругою заземленого джерела, а також напругу результуючого джерела. Побудувати векторну діаграму для визначен-

ня результуючої напруги та її фазового кута. Зняті осцилограми додати до звіту роботи.

3.4.3. Вимірювання та визначення часової діаграми потужності, що виділяється на активному опорі та генерується джерелом сигналу. Для цього складається схема, що наведена на рис. 5.3.

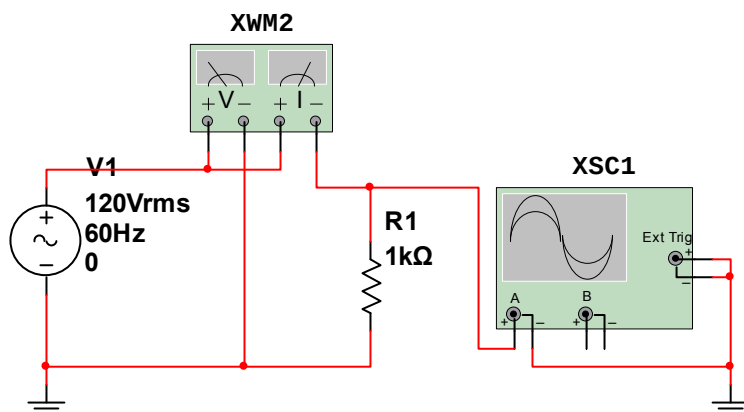


Рис. 5.3

Змінюючи величину напруги та опору заміряти значення потужності, що генерується, і перевірити шляхом розрахунків. Звернути увагу на коефіцієнт, що називається **Power factor**.

Для визначення часових діаграм потужності та їх зв'язку з часовими діаграмами напруги на елементі кола слід використати схему, що наведена на рис. 5.4.

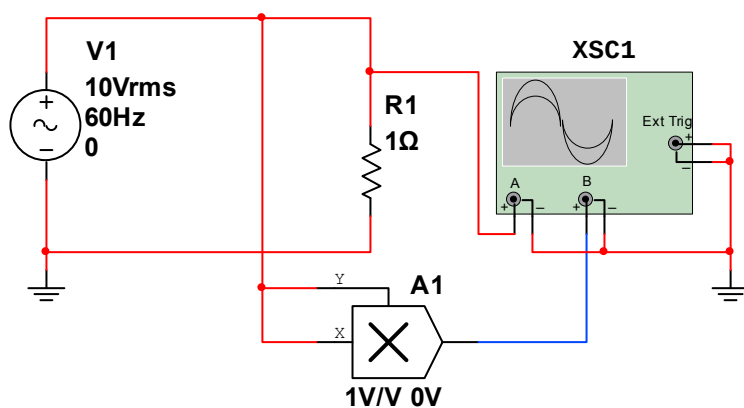


Рис. 5.4

Скласти схему та заміряти діючі й амплітудні значення напруг і потужності, встановити залежності між ними. Звернути увагу на фазові співвідношення між часовими діаграмами напруги та потужності, що виділяється на навантаженні – опорі величиною в 1 Ом.

Пропонується самостійно доповнити схему для отримання часових діаграм потужності на навантаженні, що не дорівнює 1 Ом. Необхідний прилад знаходиться в меню **Controls**.

5.4.4. Схема, що наведена на рис. 5.5, дає можливість визначити часові діаграми потужності, що виділяється на індуктивності. Резистор з опором 1 Ом призначений для отримання осцилограми струму і створення активно-індуктивного характеру навантаження. За допомогою схеми, що наведена на рис. 5.5, необхідно визначити кутові співвідношення між напругою, яка прикладається до дроселя, та струмом, який протікає через цей дросель.

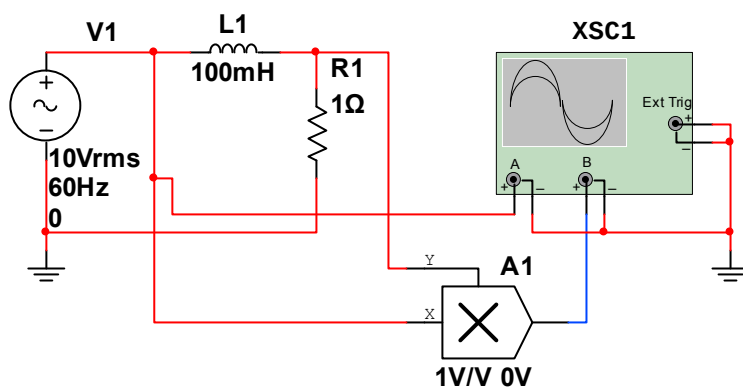


Рис. 5.5.

Для цього слід збільшувати величину індуктивності убік її зростання до 100 мГн і заміряти кути зсуву фаз між миттєвими значеннями напруги, що прикладається до навантаження, і миттєвими значеннями потужності. Дати пояснення отриманим результатам.

5.4.5. Замінивши на електричній схемі (рис. 5.5) індуктивність на конденсатор з ємністю 1 мкФ, встановити кутові співвідношення між струмом і напругою при ємнісному навантаженні, а також отримати осцилограму потужності, що циркулює в колі з конденсатором. Зменшуючи величину ємності конденсатора, зробити аналіз зміни фазових співвідношень залежно від неї.

5.5. Вимоги до звіту

5.5.1. Детально описати способи вимірювання амплітуди, частоти і фази синусоїдального сигналу та різниці фаз між двома сигналами за допомогою осцилографа. Навести відповідні осцилограми.

5.5.2. Навести векторні діаграми для визначення результуючої напруги і її фазового кута.

5.5.3. Навести часові діаграми потужності, що виділяється на активному опорі, на індуктивності, на ємності.

5.5.4. Дати пояснення зміни фазових співвідношень між напругою, що прикладається до кола, і потужністю.

5.6. Питання до атестації

5.6.1. Дати пояснення основним параметрам електричного сигналу: амплітуді, частоті, фазі.

5.6.2. Пояснити, як виконувались вимірювання амплітуди, частоти, різниці фаз.

5.6.3. Пояснити фізичну сутність потужності та її складових (активної, індуктивної, ємнісної), а також особливості фазових співвідношень між ними.

5.7. Задачі

5.7.1. Визначити період T змінного синусоїдального струму частотою 50 Гц.

5.7.2. Знайти частоту f та кутову частоту ω синусоїдального змінного струму період якого дорівнює 0,05 сек.

5.7.3. Записати вираз для визначення діючого значення синусоїдального змінного струму з періодом T .

5.7.4. Визначити діюче та середнє значення напруги, якщо її миттєве значення дорівнює $u(t) = 220 \sin(\omega t - 40^\circ)$ В.

5.7.5. Записати вирази для визначення миттєвих значень синусоїдальної напруги та струму в активному опорі.

5.7.6. Записати вирази для визначення миттєвих значень синусоїдальної напруги та струму в індуктивному опорі.

5.7.7. Записати вирази для визначення миттєвих значень синусоїдальної напруги та струму в ємнісному опорі.

5.7.8. Записати вирази миттєвих значень синусоїдальної напруги та струму для активно-індуктивного споживача.

5.7.9. Записати вирази миттєвих значень синусоїдальної напруги та струму для активно-ємнісного споживача.

5.7.10. Записати вираз для визначення миттєвого значення струму в активному опорі 10 Ом, який підімкнули до джерела синусоїдальної напруги $u(t) = 310 \sin(314 t - 90^\circ)$ В.

5.7.11. Записати вираз для визначення миттєвого значення струму в індуктивному опорі 10 Ом, який приєднаний до джерела синусоїдальної напруги $u(t) = 310 \sin 314 t$ В.

5.7.12. Записати вираз для визначення миттєвого значення струму в активному опорі 10 Ом, який приєднаний до джерела синусоїдальної напруги $u(t) = 310 \sin 314 t$ В.

5.7.13. Визначити активну, реактивну та повну потужності споживача, який приєднаний до джерела напруги $u(t) = 310 \sin(314t + 90^\circ)$ В, якщо його струм дорівнює $i(t) = 31 \sin(314t + 90^\circ)$ А.

5.7.14. Визначити активну, реактивну та повну потужності споживача, який приєднаний до джерела напруги $u(t) = 310 \sin 314t$ В, якщо його струм дорівнює $i(t) = 31 \sin(314t + 90^\circ)$ А.

5.7.15. Визначити активний опір електричної плитки, якщо при струмі $i(t) = 5,66 \sin(314t + 20^\circ)$ А вона споживає потужність 800 Вт.

5.7.16. Чи залежить миттєва потужність резистивного елемента від знаку струму?

5.7.17. За допомогою яких приладів, ввімкнених в електричне коло змінного струму з активно-індуктивним навантаженням, можна визначити активну потужність?

5.7.18. За допомогою яких приладів, ввімкнених в електричне коло змінного струму з активно-індуктивним навантаженням, можна визначити повну потужність?

5.7.19. Визначити активну потужність споживача, якщо напруга джерела живлення $u(t) = 310 \sin(\omega t + 90^\circ)$ В, струм споживача $i(t) = 31 \sin(\omega t + 90^\circ)$ А.

5.7.20. Визначити активну потужність споживача, якщо $u(t) = 310 \sin \omega t$, $i(t) = 31 \sin(\omega t + 90^\circ)$.

5.7.21. В електричному колі з індуктивною котушкою амперметр показав 4 А, вольтметр – 200 В. Визначте активну потужність, якщо $X_L = 30$ Ом.

5.7.22. В електричному колі з індуктивною котушкою амперметр показав 4 А, вольтметр – 200 В. Визначте повну потужність, якщо $X_L = 30$ Ом.

5.7.23. В електричному колі з індуктивною котушкою амперметр показав 4 А, вольтметр – 200 В. Визначте реактивну потужність, якщо $X_L = 30$ Ом.

5.8. Додатки

Таблиця варіантів до схем, які наведені на рис. 5.2, рис. 5.3 та рис. 5.5.

Номер варіанту	Рис. 5.1						Рис. 5.2, Рис. 5.3
	U, В	F, Гц	U _{m1} , В	U _{m2} , В	φ ₁ , гр.	φ ₂ , гр.	U, В
1	10	50	3	8	0	90	4
2	15	80	6	10	30	120	6
3	20	120	10	14	60	150	8
4	25	160	12	18	90	180	10
5	30	200	18	22	120	210	12
6	35	250	22	28	150	240	14
7	40	310	24	32	180	270	16
8	45	380	28	20	210	300	18
9	50	430	32	17	240	330	20
10	55	480	36	15	270	0	22
12	60	520	44	13	300	30	24
13	65	570	50	10	330	60	26
14	70	620	54	8	340	80	28
15	75	700	60	4	360	120	30

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ6

Електричні кола змінного струму з послідовним з'єднанням елементів

6.1. Мета роботи

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл з послідовним з'єднанням елементів. Результатом засвоєння роботи повинно бути вміння будувати часові та векторні діаграми струму і напруги в електричному колі з послідовним з'єднанням пасивних і активних елементів. Необхідно також зрозуміти й вміти використовувати явище резонансу напруги.

6.2. Основні теоретичні положення

При послідовному з'єднанні резистора, конденсатора та індуктивної котушки миттєве значення і комплексна напруга в електричному колі дорівнює:

$$u = u_R + u_L + u_C ; \\ \dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C .$$

Враховуючи, що крізь кожен з елементів протікає один і той самий струм, можемо записати:

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} ; \quad \dot{U}_L = jX_L \cdot \dot{I} ; \quad \dot{U}_C = -jX_C \cdot \dot{I}$$

або

$$\dot{U}_R = R \cdot \dot{I} ; \quad \dot{U}_L = j\omega L \cdot \dot{I} ; \quad \dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \cdot \dot{I} .$$

Це дає можливість попередні рівняння записати у вигляді:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I} \cdot (R + jX_L - jX_C) = \dot{I} \cdot \underline{Z} ,$$

де величина:

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = R + jX .$$

називається **еквівалентним комплексним опором** кола і визначається як сума комплексних опорів, що утворюють електричне коло. Повний опір кола має такий вигляд:

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

Уявна складова $X = X_L - X_C$ називається **реактивним опором**, який в залежності від величин X_L і X_C може носити індуктивний ($X_L > X_C$), ємнісний ($X_C > X_L$) характер або мати нульове значення ($X_L = X_C$).

За умови $X_L = X_C$ має місце явище **резонансу напруг**. У цьому випадку:

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad \text{або} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C} ,$$

а звідси:

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

Кутова частота ω_0 називається **резонансною кутовою частотою**. Кут зсуву фаз між напругою та струмом при резонансі дорівнює нулю, оскільки $\cos \varphi = 1$.

Напруги на затискачах конденсатора U_C та котушки індуктивності U_L можуть значно перевищувати напругу, прикладену до кола. Напруги U_C та U_L однакові і зсунуті за фазою на половину періоду, тобто у будь-який момент часу вони однакові та протилежні за знаком. Отже, в будь-який момент часу і миттєві потужності на реактивних ділянках однакові та протилежні за знаком, тобто збільшення енергії магнітного поля у котушці індуктивності відбувається внаслідок зменшення електричної енергії, що є в конденсаторі, а генератор витрачає енергію на активний опір.

6.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи використовується спеціальний віртуальний прилад, який називається **Bode plotter** (графобудівник) і призначений для отримання амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик схем. Він вимірює відношення амплітуд сигналів у двох точках схеми і фазовий зсув між ними. Прилад генерує власний спектр частот, діапазон яких можна задавати під час налагоджування приладу. Частота змінного джерела у схемі, що досліджується, ігнорується, однак схема повинна містити функціональний генератор або джерело змінного струму. Його використання дає можливість перевірити правильність розрахунків електричних кіл змінного струму, а, головне, дозволяє знаходити резонансні частоти в електричних колах як з послідовним, так і з паралельним з'єднанням реактивних елементів. **Bode plotter** обирається з меню **Instruments**, а його вигляд і схема включення для проведення аналізу наводиться на рис. 6.1, а, б.

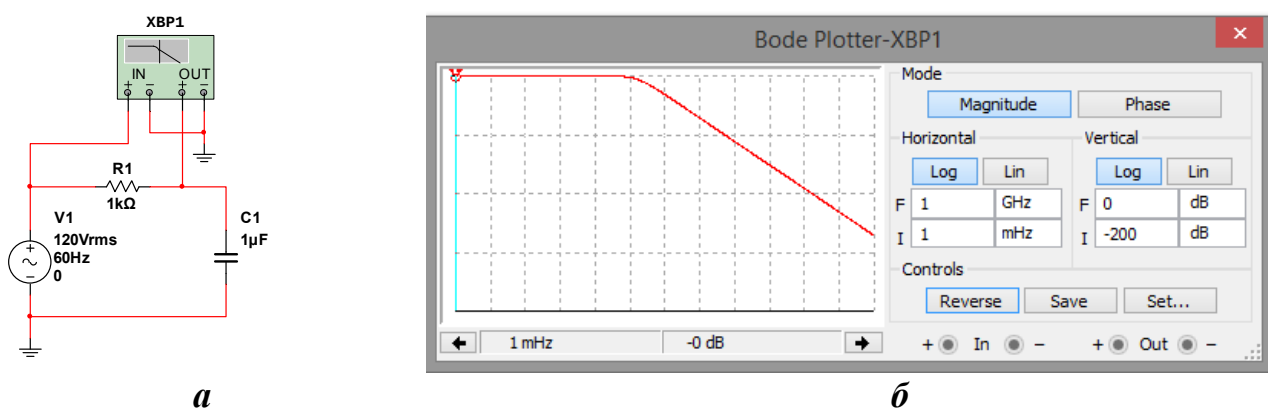


Рис. 6.1

Кнопки приладу мають наступні призначення:

Magnitude – вимірювання АЧХ (натиснута за замовчуванням);

Phase – вимірювання фазового зрушення між вхідним і вихідним сигналами чотирьохполюсника (ФЧХ);

Vertical – установка масштабу й типу вертикальної осі частотної характеристики. Можна встановлювати логарифмічний масштаб кнопкою **Log** або лінійний – кнопкою **Lin**;

– вікно встановлення початкового значення осі ординат **I (initial)** і кінцевого – **F (final)**, дає можливість встановити весь діапазон зміни параметрів по осі ординат. Якщо перед початком проведення дослідів цей діапазон невідомий, його можна змінювати під час проведення досліджень, встановлюючи початкові й кінцеві значення так, щоб забезпечити максимальну інформативність зображення.

Рис. 6.2

Опції, які задаються у вікні **Horizontal** (рис. 6.2), дають можливість вибору масштабу і типу горизонтальної, тобто частотної, осі. Їх призначення повністю співпадає з відповідними установками вертикальної осі.

Внизу екрану приладу розміщені два вікна, які призначені для точного визначення частоти та величини згасання вхідного сигналу для даних частот. Частота задається курсором. При натисканні на горизонтальні стрілки по вікну зображення відповідної частотної характеристики буде переміщуватись вертикальна вісь – курсор, як зображено на рис. 6.1, *а, б*. Її точки перетину з відповідною частотною характеристикою будуть зображатись у вікнах, що розміщені внизу.

У віртуальній лабораторії **Multisim** існує і широко використовується інший спосіб вимірювання частот та амплітудних відношень сигналів. Для цього у меню **Simulate** слід обрати послідовно опції **Analuses** → **AC – Analysis**. У вікні, що відкриється, слід встановити необхідні параметри і запустити процес моделювання. В результаті на екрані з'явиться вигляд амплітудно-частотної або фазочастотної характеристики, які можуть бути збільшені на весь екран.

6.4. Порядок виконання роботи

6.4.1. Зібрати електричне коло з послідовно з'єднаних джерел змінної напруги, індуктивності й активного опору з параметрами, що задаються відповідно до варіанту. Заміряти напруги і струм, що показують електронні прилади, а також зняти осцилограми напруги за допомогою осцилографа. Зафіксувати положення осцилограм і визначити фазовий зсув струму по відношенню до напруги, що прикладається.

6.4.2. Повторити попередній дослід, але замінивши котушку індуктивності конденсатором, і провести аналогічні вимірювання.

6.4.3. Провести дослід з послідовним з'єднанням активного опору, котушки індуктивності, конденсатора з джерелом напруги (рис. 6.3).

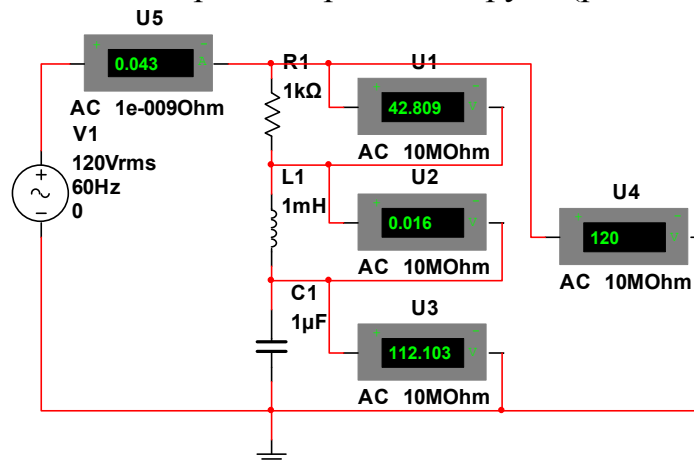


Рис. 6.3

Заміряти і записати значення струму в контурі та напруг на елементах схеми, а також зняти осцилограми. Змінюючи частоту джерела, знайти таке її значення, при якому матиме місце резонанс напруг в електричному колі. Заміряти й записати покази приладів і зняти осцилограми. Резонансну частоту можна визначити за допомогою **Bode-plotter** (рис. 6.4 – рис. 6.5.). Слід зазначити, що резонансна частота може бути практично заміряна лише у тому випадку, коли добротність R-L-C кола є досить високою.

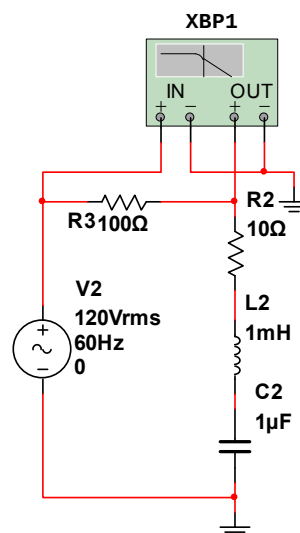


Рис. 6.4

6.4.4. Провести дослід з установлення залежності напруги на реактивних елементах у режимі резонансу від величини активного опору в послідовному

електричному колі. Методологію проведення досліду розробити самостійно та обґрунтувати у звіті.

Один зі способів проведення такого досліду закладено у *Multisim*. Для цього в меню **Simulate** → **Analyses** слід обрати опцію **Parameter sweep**. У вікні, що відкриється, слід обрати один з параметрів, який слід аналізувати при зміні опору, і вказати діапазон зміни опору резистора. Після цього запустити процес моделювання.

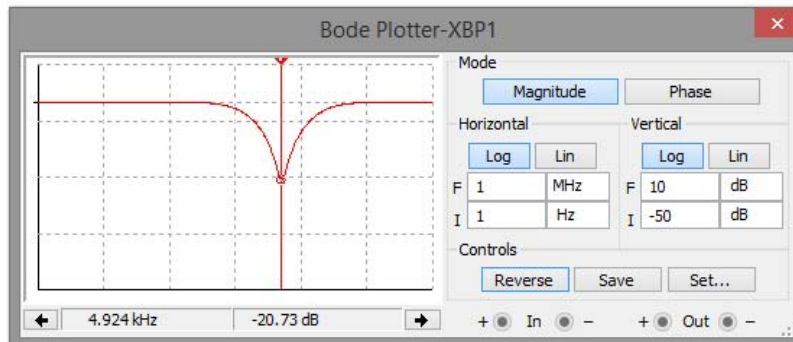


Рис. 6.5

6.4.5. Повторити дослід п. 6.4.4 при тій самій резонансній частоті, але збільшивши величину індуктивності дроселя у 10 разів.

6.4.6. Повторити дослід п. 6.4.3, замінивши в схемі джерело напруги на джерело струму.

6.5. Вимоги до звіту

6.5.1. Виконати розрахунки напруги і струму в електричному колі для кожного з проведених дослідів.

6.5.2. Побудувати векторні та часові діаграми і порівняти результати експериментальних даних із розрахунковими.

6.5.3. Обчислити резонансну частоту і порівняти її з отриманою експериментально.

6.5.4. Навести схему, в якій використовується пристрій **Bode-plotter**. Показати, який вигляд має графік на **Bode-plotter** при резонансі напруг.

6.6. Питання до атестації

6.6.1. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги та струму при послідовному з'єднанні активного опору з індуктивністю (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).

6.6.2. Пояснити, у чому полягає фізична сутність явища резонансу напруг в електричному колі. Якими шляхами можна досягти резонансу напруг в електричному колі?

6.6.3. Пояснити, від чого залежать величини напруги на реактивних елементах електричного кола при резонансі напруги.

6.6.4. Пояснити, чим визначається добротність реактивного елемента й добротність електричного кола.

6.6.5. Навести приклади позитивних і негативних сторін резонансу напруги.

6.7. Задачі

6.7.1. Для електричного кола (рис. 6.6) задано: $i(t) = 10 \sin(314t - 45^\circ)$ А; $R = 4$ Ом; $X_L = 8$ Ом; $X_C = 5$ Ом. Визначити миттєве значення прикладеної напруги.

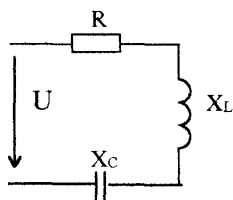


Рис. 6.6

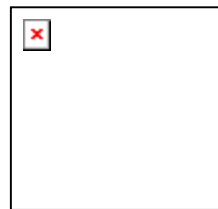


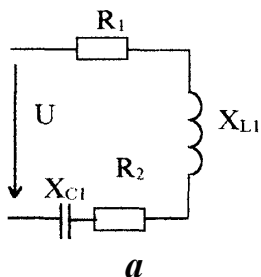
Рис. 6.7

6.7.2. Для електричного кола (рис. 6.6) задано: $R = 3$ Ом; $X_L = 6$ Ом; $X_C = 10$ Ом. Визначити $\cos \varphi$.

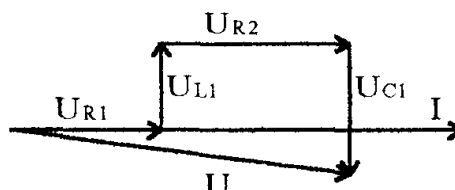
6.7.3. В електричному колі (рис. 6.6) має місце резонанс напруг. При якій умові напруги на реактивних елементах будуть більше від прикладеної напруги U ?

1. $R > X_C$;
2. $R < X_C$;
3. $R = X_L$;
4. $R = X_L + X_C$.

6.7.4. Знайти миттєве значення струму в електричному колі (рис. 6.7), якщо миттєве значення вхідної напруги $u(t) = U_m \sin \omega t$; діюче значення струму 10 А; активна потужність 1 кВт; реактивна потужність 1,73 кВт.



a



б

Рис. 6.8

6.7.5. Для заданої електричної схеми (рис. 6.8, *a*) і відповідної їй векторної діаграми (рис. 6.8, *б*), побудованої в масштабі, вказати менший з опорів.

6.7.6. Для заданої електричної схеми (рис. 6.8, *a*) і відповідної їй векторної діаграми (рис. 6.8, *б*), побудованої в масштабі, вказати опір, величина якого є найбільшою (R_1 , R_2 , X_{L1} , X_{C1} , інше).

6.7.7. До електричного кола з повним опором $Z = 10 \text{ Ом}$; $\varphi = 60^\circ$ прикладається напруга, діюче значення якої 220 В . Обчислити струм у колі.

6.7.8. До електричного кола, що складається з двох паралельно включених гілок з параметрами: $Z_1 = 10 \text{ Ом}$; $\varphi_1 = 60^\circ$; $Z_2 = 10 \text{ Ом}$; $\varphi_2 = -60^\circ$ прикладається напруга, діюче значення якої 220 В . Обчислити струм у гілках кола.

6.7.9. Обчислити струм в електричному колі з послідовно з'єднаними елементами при $U = 200 \text{ В}$; $R = 10 \text{ Ом}$; $X_C = 10 \text{ Ом}$; $X_L = 10 \text{ Ом}$.

6.7.10. Обчислити напругу, яка прикладається до електричного кола з послідовним з'єднанням елементів, якщо $I = 10 \text{ А}$; $Z_1 = 10 \text{ Ом}$; $\varphi_1 = 60^\circ$; $Z_2 = 10 \text{ Ом}$; $\varphi_2 = -60^\circ$; $R_3 = 10 \text{ Ом}$.

6.7.11. Знайти активний опір електричного кола, в якому:

$$i(t) = 22\sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ); \quad u(t) = 220\sqrt{2} \sin \omega t.$$

6.7.12. До послідовного R-L-C кола прикладається напруга, діюче значення якої $U = 50 \text{ В}$. Напруги на елементах кола: $U_C = 20 \text{ В}$; $U_R = 30 \text{ В}$. Визначте напругу U_L .

6.7.13. Визначте величину ємнісного опору X_C у послідовному R-C колі, якщо діюче значення напруги, що прикладається до нього, $U = 200 \text{ В}$; струм, що протікає в колі, $I = 4 \text{ А}$; активна потужність $P = 640 \text{ Вт}$.

6.7.14. Визначте напругу U , що прикладається до R-C кола, якщо напруга на конденсаторі $U_C = 24 \text{ В}$; $R = 16 \text{ Ом}$; $X_C = 12 \text{ Ом}$.

6.7.15. До послідовного R-L-C кола прикладається напруга, діюче значення якої $U = 100 \text{ В}$. Напруги на елементах $U_C = 20 \text{ В}$; $U_L = 80 \text{ В}$. Визначте напругу U_R .

6.7.16. У послідовному R-L-C колі напруга $U_C = U_L = 300 \text{ В}$, співвідношення $X_L / R = 20$. Визначте напругу U_R і опір R .

6.7.17. Визначте напругу U , що прикладається до послідовного R-L-C кола, якщо $R = 60 \text{ Ом}$; $X_L = 100 \text{ Ом}$; $X_C = 20 \text{ Ом}$; $I = 50 \text{ А}$.

6.7.18. Струм у послідовному R-L-C колі змінюється за законом $i(t) = I_m \sin \omega t$. Які з наведених виразів невірні, якщо $U_L > U_C$?

$$1. u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi); \quad 2. u_L(t) = U_{Lm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2});$$

$$3. u_L(t) = U_{Lm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}); \quad 4. u_R(t) = U_{Rm} \sin \omega t;$$

$$5. u_C(t) = U_{Cm} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}); \quad 6. u_C(t) = U_{Cm} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

6.7.19. Знайти активний опір послідовного R-L кола, якщо $X_L = 30 \text{ Ом}$; $I = 4 \text{ А}$; діюче значення напруги, що прикладається, $U = 200 \text{ В}$.

6.7.20. Знайти активну потужність послідовного R-L кола, якщо $X_L = 30 \text{ Ом}$; $I = 4 \text{ А}$; $U = 200 \text{ В}$.

6.7.21. Знайти повний опір Z послідовного R-L кола на частоті $f_2 = 150 \text{ Гц}$, якщо на частоті $f_1 = 50 \text{ Гц}$ повний опір $Z_1 = 5 \text{ Ом}$; $P_1 = 40 \text{ Ом}$.

6.7.22. Знайти повну потужність кола (рис. 6.7) на частоті 50 Гц, якщо $U = 20 \text{ В}$; $X_L = 4 \text{ Ом}$; $R = 30 \text{ Ом}$.

6.7.23. Знайти струм послідовного R-L кола, якщо $u(t) = 25 \sin(\omega t + 30^\circ)$; $X_L = 4 \text{ Ом}$; $R = 3 \text{ Ом}$.

6.7.24. Знайти струм у послідовному R-L-L колі, якщо $X_{L1} = 4 \text{ Ом}$; $X_{L2} = 2 \text{ Ом}$; $R = 8 \text{ Ом}$; $u(t) = 100 \sin(\omega t - 20^\circ)$.

6.7.25. Знайти активну потужність послідовного R-L-C кола, якщо діюче значення напруги, що прикладається до нього, $U = 250 \text{ В}$; $R = 40 \text{ Ом}$; $X_1 = 30 \text{ Ом}$; $X_2 = 30 \text{ Ом}$.

6.7.26. Знайти напругу на резисторі у послідовному R-L-C колі, якщо діюче значення напруги, що прикладається, $U = 12 \text{ В}$; $R = 3 \text{ Ом}$; $X_L = 10 \text{ Ом}$; $X_C = 6 \text{ Ом}$.

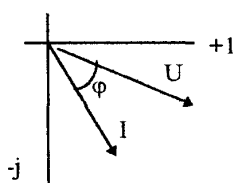


Рис. 6.9

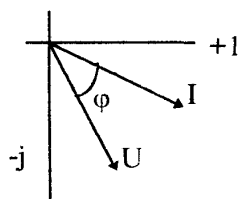


Рис. 6.10

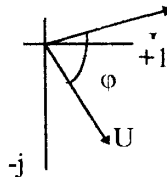


Рис. 6.11

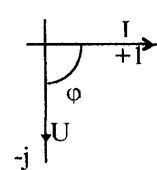


Рис. 6.12

6.7.27. За векторними діаграмами, що наведені на рис. 6.9 – рис. 6.20, визначте характер навантаження послідовного електричного кола (ємнісний, індуктивний, активно-індуктивний, активно-ємнісний).

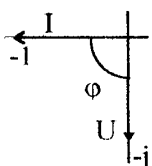


Рис. 6.13

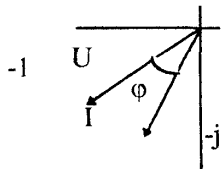


Рис. 6.14

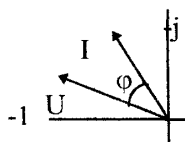


Рис. 6.15

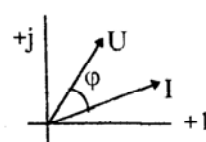


Рис. 6.16

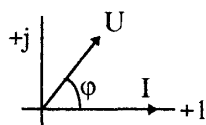


Рис. 6.17

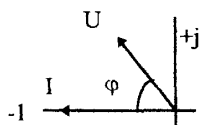


Рис. 6.18

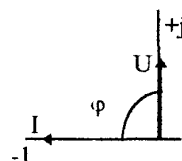


Рис. 6.19

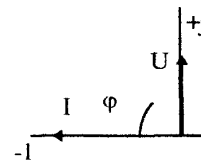


Рис. 6.20

6.7.28. В електричному колі з індуктивною котушкою амперметр показав струм 4 А, вольтметр – напругу 200 В. Визначте активну потужність, якщо $X_L = 30 \text{ Ом}$.

6.7.29. Опір R , індуктивність $L = 0,015 \text{ Гн}$ і ємність C з'єднані послідовно і підключені до джерела живлення 220 В частотою 50 Гц. Струм у колі $I = 11 \text{ А}$, активна потужність $P = 300 \text{ Вт}$. Визначити активний опір і ємність. Побудувати векторну діаграму.

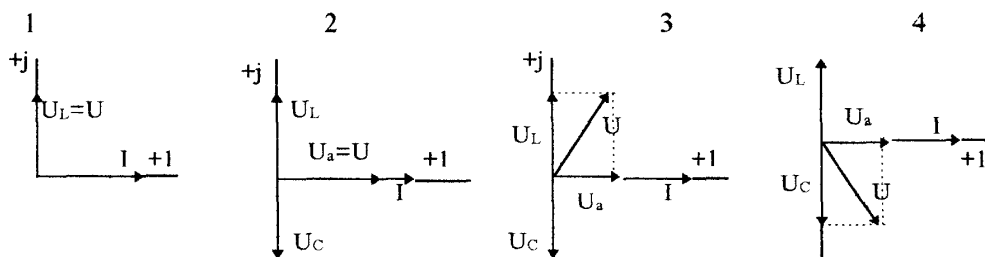


Рис. 6.21

6.7.43. Яка з наведених на рис. 6.21 векторних діаграм відповідає резонансу напруг?

6.7.44. Визначити співвідношення між активною і реактивною потужностями при $\cos \varphi = 0,707$.

6.7.45. На частоті 50 Гц синусоїдального струму повний опір індуктивної котушки дорівнює 41 Ом, а при постійному струмі – 9 Ом. За якої частоти у контурі виникне резонанс напруг, якщо цю котушку з'єднати послідовно з конденсатором 51 мкФ?

6.7.46. Послідовне R-L-C коло працює в режимі резонансу напруг. Чи зміниться режим роботи кола, якщо:

- збільшити частоту джерела у 2 рази;
- зменшити частоту джерела у 2 рази;
- послідовно в коло ввімкнути додатковий резистор;
- збільшити напругу живлення у 2 рази.

6.8. Додаток

Таблиця варіантів до схеми, яка приведена на рис. 6.5.

Номер варіанту	Е, В	F, Гц	φ , гр.	J, А	С, мкФ	R, кОм	L, Гн
1	10	40	90	0,1	1	0,4	0,1
2	20	50	120	0,2	2	0,5	0,2
3	30	60	150	0,3	3	0,6	0,3
4	40	400	180	0,4	4	0,7	0,4
5	45	800	210	0,5	5	0,8	0,5
6	50	1к	240	0,6	6	0,9	0,6
7	55	2к	270	0,7	7	1	0,7
8	60	3к	300	0,8	8	2	0,8
9	65	4к	330	0,9	9	3	0,9
10	70	5к	0	1	10	4	1
11	75	6к	30	1,1	11	5	1,1
12	80	7к	60	1,2	12	6	1,2
13	85	8к	45	1,3	13	7	1,3
14	90	9к	80	1,4	14	8	1,4
15	95	10к	100	1,5	15	9	1,5

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ7

Електричні кола змінного струму з паралельним з'єднанням елементів

7.1. Мета роботи

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл з паралельним з'єднанням елементів. Результатом засвоєння роботи повинно бути вміння будувати часові та векторні діаграми струмів і напруги в електричному колі з паралельним з'єднанням елементів. Необхідно також зрозуміти й навчитися використовувати явище резонансу струмів.

7.2. Основні теоретичні положення

При паралельному з'єднанні елементів струми у гілках обчислюються за формулами:

$$\dot{I}_1 = \dot{U} \underline{Y}_1; \quad \dot{I}_2 = \dot{U} \underline{Y}_2; \quad \dot{I} = \dot{U} \underline{Y} = \dot{U} (\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2).$$

Тут ми використовуємо параметр схеми, який називається **провідністю** $\underline{Y} = \underline{Z}^{-1}$, що має активну G і реактивну B складові, тобто:

$$\underline{Y} = G + jB.$$

Явища резонансу струму в розгалуженому електричному колі синусоїдального струму можливо характеризувати складовими струмів і потужностей. Коли загальні струми та напруги співпадають за фазою, реактивні складові струму індуктивної та ємнісної гілок рівні між собою за величиною та протилежні за фазою:

$$\dot{I}_C = \dot{I}_L; \quad \dot{I} = G \dot{U}; \quad \dot{I}_L = B_L \dot{U}; \quad \dot{I}_C = B_C \dot{U};$$

тобто умовою резонансу струмів буде $B_L = B_C$.

Виконання умов резонансу струмів забезпечується за умовою не тільки $B_L = B_C$, а також $G_1 = G_2$, тобто необхідне забезпечення рівності не тільки модулів реактивних складових, а й активних складових паралельних гілок.

Звідси можна записати:

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

Струми у гілках з реактивними елементами можуть значно перевищувати струм у нерозгалуженій ділянці кола.

Як і при резонансі напруг, при резонансі струмів мають місце співвідношення:

$$\varphi = 0; \quad \cos \varphi = 1; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Якщо активні опори R_1 і R_2 (опори індуктивної та ємнісної гілок) будуть малими, тобто $R_1 = R_2 = 0$, то матимемо:

$$B_L = B_C = \sqrt{C/L} = \gamma.$$

Величина γ , зворотна величині хвильового опору ρ , називається **хвильовою провідністю**.

Відношення I до I_C та I_L при резонансі дорівнюватиме:

$$I / I_L = I / I_C = G U / B_L U = G U / B_C U = G / \gamma = d.$$

Відношення $d = G / \gamma$ називається **згасанням кола**.

7.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи використовуються ті ж самі складові віртуальної лабораторії, які використовувались у попередніх дослідженнях.

7.4. Порядок виконання роботи

7.4.1. Зібрати електричне коло з джерела змінної напруги, активного опору й індуктивної котушки (рис. 7.1) з параметрами, що задаються відповідно до варіанту. Заміряти напруги та струм, що показують електронні прилади, за допомогою осцилографа зняти осцилограми напруги, а також заміряти кут зрушення фаз між напругами в т.23 і т.24.

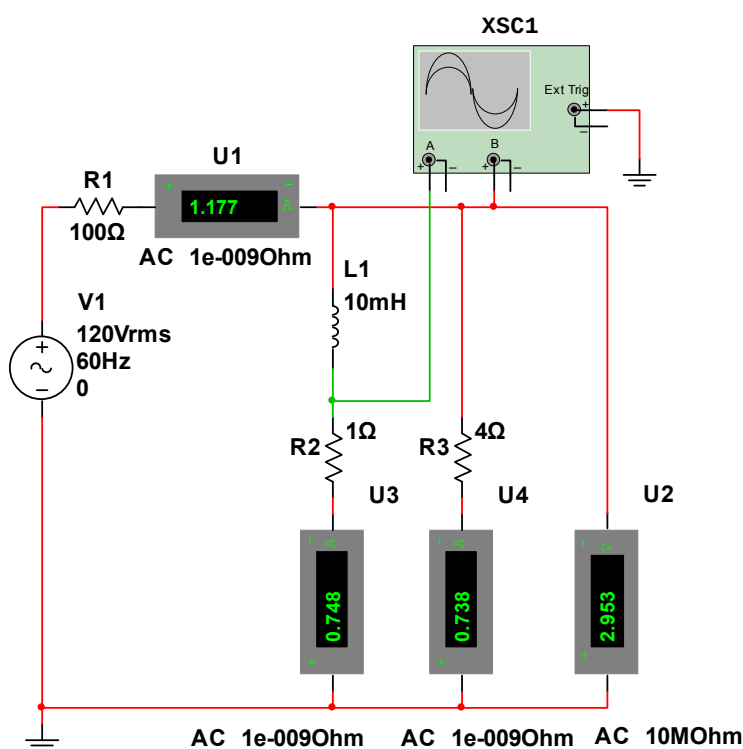


Рис. 7.1

7.4.2. Повторити дослід, але індуктивність замінити конденсатором, і провести аналогічні вимірювання.

7.4.3. Провести дослід з паралельним з'єднанням конденсатора та індуктивної котушки (послідовно з кожним реактивним елементом встановити ак-

тивний опір відповідно до варіанту). Заміряти і записати напруги та струми у гілках схеми, зняти осцилограми напруги. Змінюючи частоту джерела, знайти таке її значення, на якому матиме місце резонанс струмів у паралельному колі. Експеримент із визначення резонансу струмів проводиться за схемою, яку зображено на рис. 7.2. На цьому ж рисунку можна побачити, як виглядає графік резонансу струмів у вікні **Bode-plotter** (рис. 7.3).

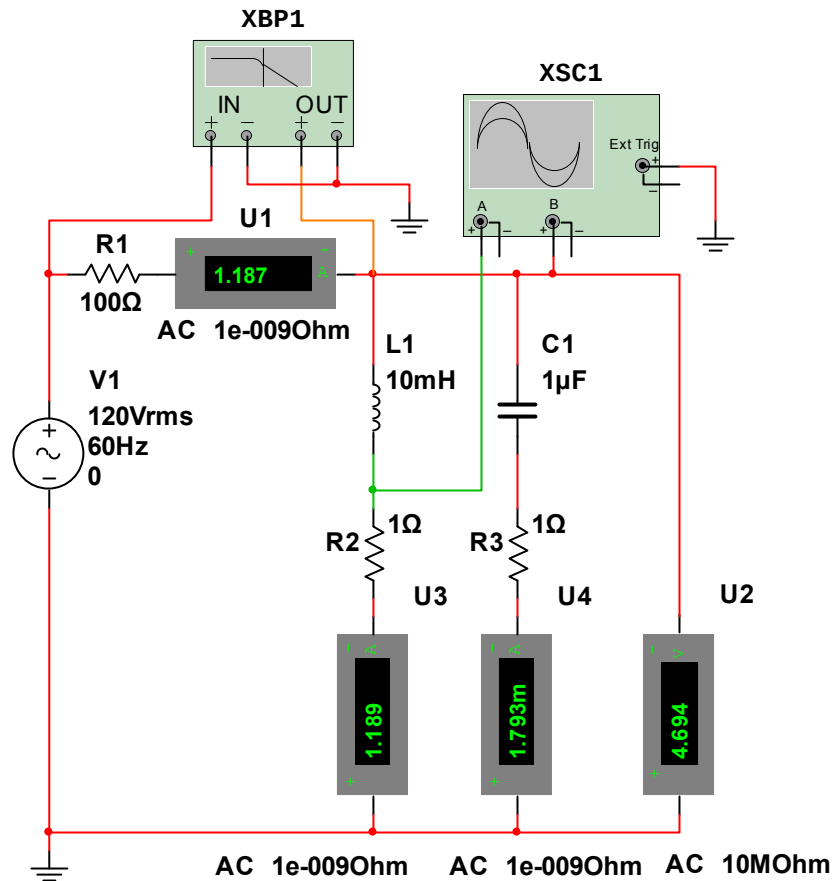


Рис. 7.2

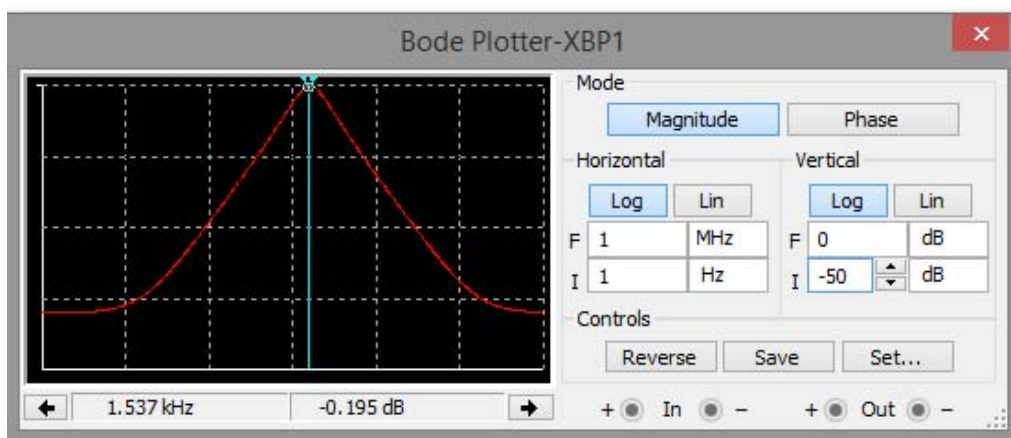


Рис. 7.3

7.4.4. Встановивши однакові активні опори у гілках електричної схеми (рис. 7.2), провести дослід із визначення залежності величини струмів у гілках резонансного контуру від величини активних опорів.

7.4.5. Не змінюючи резонансної частоти і збільшивши величину індуктивності дроселя у 10 разів, повторити дослід 7.4.4.

7.4.6. Повторити дослід 7.4.3, замінивши в схемі джерело напруги джерелом струму.

7.5. Вимоги до звіту

7.5.1. Виконати розрахунки напруги і струмів у гілках електричного кола для кожного з проведених дослідів.

7.5.2. Побудувати векторні діаграми.

7.5.3. Обчислити резонансну частоту і порівняти її з отриманою експериментально. Визначити величину хвильового опору та величину згасання кола. Визначити залежність згасання кола від величин активних опорів, що розміщені послідовно з індуктивністю та конденсатором. Встановити залежність напруги на коливальному контурі від величини згасання.

7.5.4. Побудувати векторні й часові діаграми для режиму резонансу.

7.5.5. Навести схему, в якій використовується **Bode-plotter**. Показати, який вигляд матиме графік на **Bode-plotter** при резонансі струмів.

7.6 . Питання до атестації

7.6.1. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги і струмів у гілках при паралельному з'єднанні активного опору з індуктивністю (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).

7.6.2. Пояснити, в чому полягає фізична сутність резонансу струмів. Якими шляхами можна досягти резонансу струмів в електричному колі?

7.6.3. Пояснить, чим відрізняється резонанс струмів від резонансу напруг.

7.6.4. Назвіть складові провідності електричного кола синусоїдального струму.

7.6.5. Пояснити, від чого залежать величини струмів, які протікають крізь реактивні елементи електричного кола, при резонансі струмів.

7.6.6. Пояснити, чим визначається добротність реактивного елемента й добротність електричного кола при резонансі струмів.

7.6.7. Навести приклади позитивних і негативних сторін резонансу струмів.

7.7. Задачі

7.7.1. Параметри схеми (рис. 7.4) на частоті f становлять: $G = 0,6 \text{ См}$; $B_C = 1,3 \text{ См}$; $B_L = 0,5 \text{ См}$. Обчислити повну провідність кола.

7.7.2. Параметри схеми (рис. 7.4) на деякій частоті f становлять: $G = 0,3 \text{ См}$; $B_C = 1,2 \text{ См}$; $B_L = 0,5 \text{ См}$. Обчислити повну провідність електричного кола на частоті, зменшеній у два рази.

7.7.3. Параметри схеми (рис. 7.4) на деякій частоті f становлять: $G = 0,3 \text{ См}$; $B_C = 1,2 \text{ См}$; $B_L = 0,5 \text{ См}$. Обчислити повну провідність кола на частоті, збільшеній у два рази.

7.7.4. Параметри схеми (рис. 7.4) на деякій частоті f становлять: $G = 0,12 \text{ См}$; $B_C = 0,2 \text{ См}$; $B_L = 0,04 \text{ См}$. Обчислити повну провідність кола.

7.7.5. Параметри схеми (рис. 7.4) на деякій частоті f становлять: $G = 0,12 \text{ См}$; $B_C = 0,2 \text{ См}$; $B_L = 0,04 \text{ См}$. Обчислити повний опір кола.

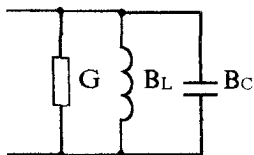


Рис. 7.4.

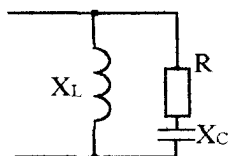


Рис. 7.5.

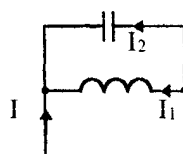


Рис. 7.6.

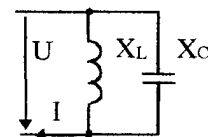


Рис. 7.7.

7.7.6. Для схеми (рис. 7.5) обчислити повну провідність кола, якщо $R = 6 \text{ Ом}$; $X_C = 8 \text{ Ом}$; $X_L = 10 \text{ Ом}$.

7.7.7. Для схеми (рис. 7.5) визначити X_L для випадку резонансу струмів, якщо $X_C = 12,5 \text{ Ом}$; $R = 6 \text{ Ом}$.

7.7.8. Для схеми (рис. 7.6) обчислити струм I , якщо $I_1 = 3 \text{ А}$; $I_2 = 4 \text{ А}$.

7.7.9. Для схеми, що зображена на рис. 7.7, обчислити загальний струм I , якщо $u(t) = 141 \sin \omega t$, а $X_L = X_C$.

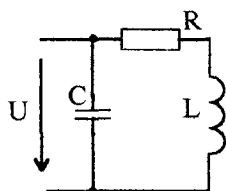


Рис. 7.8.

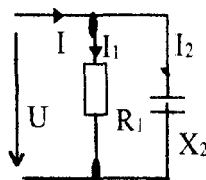


Рис. 7.9.

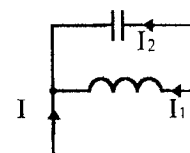


Рис. 7.10.

7.7.10. Чи споживається енергія контуром, що представлений на рис. 7.8, при резонансі струмів, якщо $R = 0$?

7.7.11. Чи споживається енергія контуром, що представлений на рис. 7.8, при резонансі струмів, якщо $R \neq 0$?

7.7.12. Напруга $U = 380 \text{ В}$, струм $I = 24 \text{ А}$, частота $f = 50 \text{ Гц}$, $\cos \varphi = 0,866$. Визначте ємність C батареї конденсаторів, якщо необхідно отримати $\cos \varphi = 1$.

7.7.13. Визначте струм I , якщо $U = 6 \text{ В}$; $R_1 = 55,8 \text{ Ом}$; $X_2 = 48,7 \text{ Ом}$ (рис. 7.9).

7.7.14. Визначте струм I , якщо $I_1 = 4 \text{ А}$; $R = 5 \text{ Ом}$; $C = 300 \text{ мкФ}$; $f = 50 \text{ Гц}$ (рис. 7.9).

7.7.15. Визначте струм I , якщо $U = 20 \text{ В}$; $R = 6 \text{ Ом}$; $X_C = 8 \text{ Ом}$; $f = 50 \text{ Гц}$ (рис. 7.9).

7.7.16. Обчислити I_2 , якщо $I = 2 \text{ А}$; $I_1 = 6 \text{ А}$; $X_L < X_C$ (рис. 7.10).

7.7.17. Якому електричному колу відповідає векторна діаграма, що зображена на рис. 7.11?

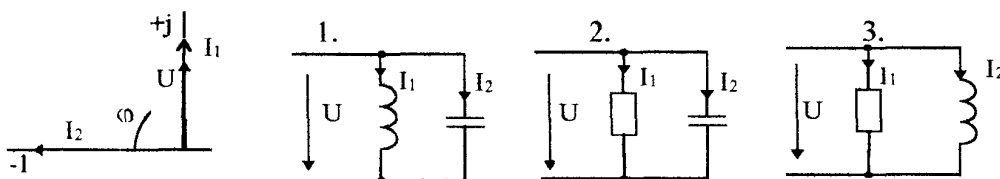


Рис. 7.11

7.7.18. Якому колу відповідає векторна діаграма на рис. 7.12?

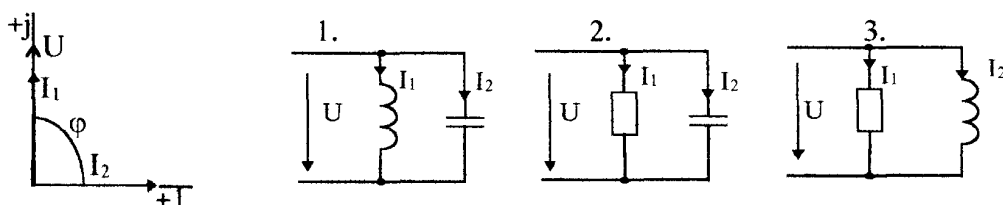


Рис. 7.12

7.7.19. Якому колу відповідає векторна діаграма на рис. 7.13?

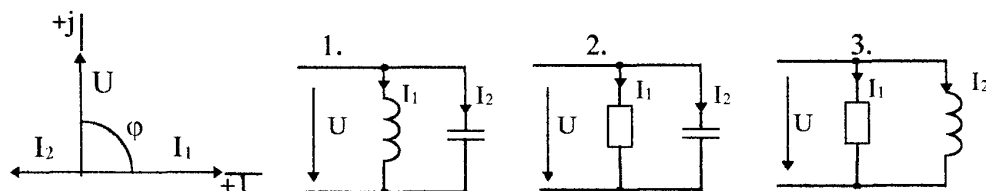


Рис. 7.13

7.7.20. Якому колу відповідає векторна діаграма на рис. 7.14?

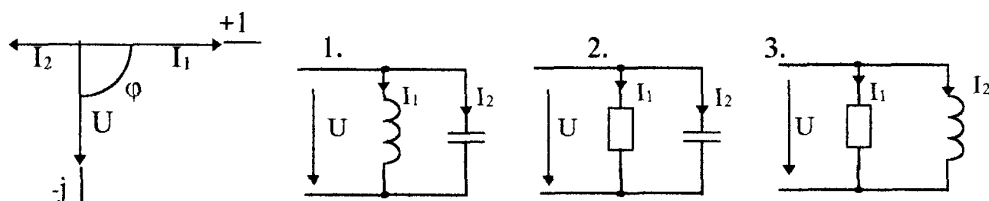


Рис. 7.14

7.7.21. За векторною діаграмою, що зображена на рис. 7.15, визначте, який характер навантаження у гілках схеми заміщення.

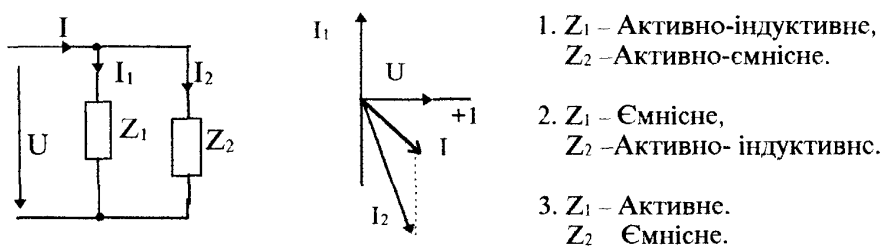


Рис. 7.15

1. Z_1 – Активно-індуктивне,
 Z_2 – Активно-ємнісне.
2. Z_1 – Ємнісне,
 Z_2 – Активно-індуктивне.
3. Z_1 – Активне.
 Z_2 – Ємнісне.

7.7.22. Паралельно котушці з параметрами $R = 4 \text{ Ом}$; $L = 0,01 \text{ Гн}$ приєднано конденсатор, ємність якого $C = 100 \text{ мкФ}$. Визначити резонансну частоту електричного кола.

7.7.23. За векторною діаграмою, що наведена на рис. 7.16, визначте, який характер навантаження у гілках схеми заміщення.

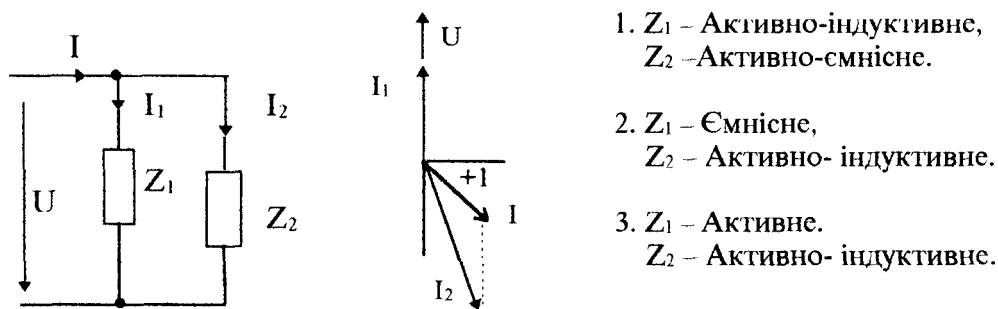


Рис. 7.16

7.7.24. За векторною діаграмою, що наведена на рис. 7.17, визначте, який характер навантаження у гілках схеми заміщення.

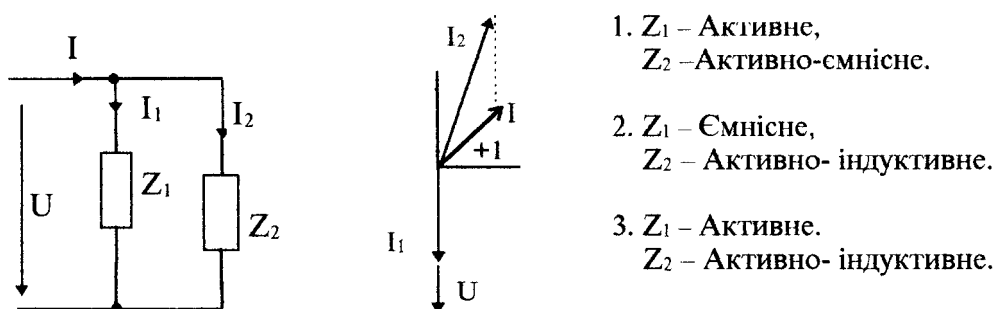


Рис. 7.17

7.7.25. За векторною діаграмою, що наведена на рис. 7.18, визначте, який характер навантаження у гілках схеми заміщення.

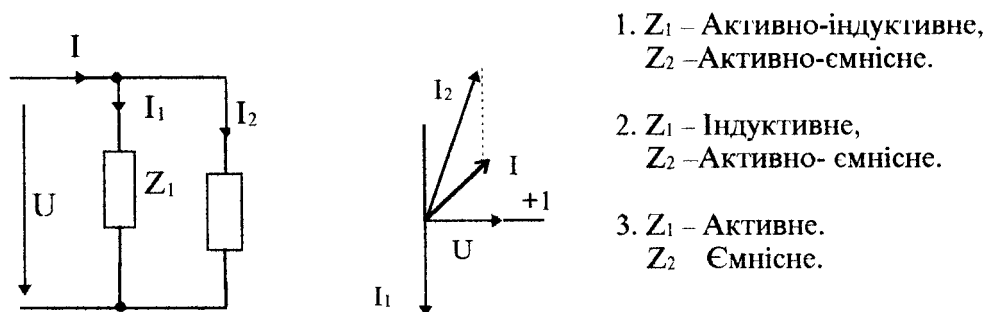


Рис. 7.18.

7.7.26. За векторною діаграмою, що наведена на рис. 7.19, визначте, який характер навантаження у гілках схеми заміщення.

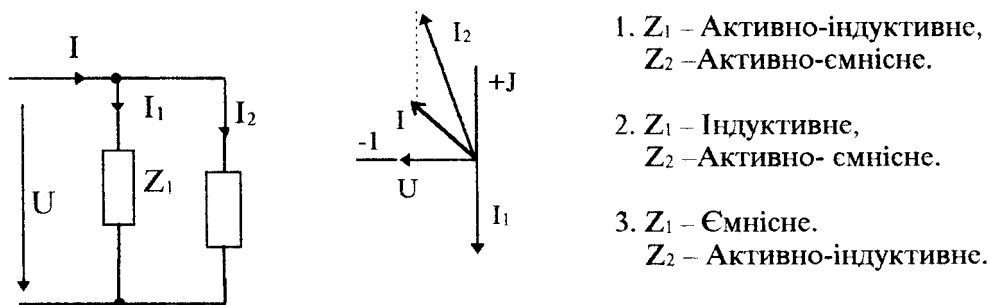


Рис. 7.19

7.7.32. Котушка індуктивністю $L = 120$ мГн і конденсатор ємністю $C = 25$ мкФ з'єднані паралельно та під'єднані до джерела змінної напруги з діючим значенням $U = 75$ В. Знайти резонансну частоту та діючі значення струмів в усіх гілках.

7.7.33. Ідеальна котушка індуктивності L ($R_K = 0$) і конденсатор C з'єднані паралельно та підключені до джерела змінного струму. При деякій частоті f_0 джерела живлення в електричному колі виникне резонанс струмів? Чому дорівнює струм у нерозгалуженій частині кола? Як можна виявити момент резонансу?

7.7.34. Паралельно котушці з параметрами $R = 4$ Ом; $L = 0,01$ Гн приєднано конденсатор, ємність якого 100 мкФ. Визначити резонансну частоту.

7.8. Додаток

Таблиця варіантів до схеми, яка приведена на рис. 7.1.

Номер варіанту	Е, В	F, Гц	φ , гр.	J, А	C, мкФ	R, кОм	L, Гн	r1, Ом	r2, Ом
1	10	40	90	0,1	1	0,4	0,1	1	5
2	20	50	120	0,2	2	0,5	0,2	2	4
3	30	60	150	0,3	3	0,6	0,3	3	6
4	40	400	180	0,4	4	0,7	0,4	4	2
5	45	800	210	0,5	5	0,8	0,5	5	1
6	50	1к	240	0,6	6	0,9	0,6	6	2
7	55	2к	270	0,7	7	1	0,7	7	3
8	60	3к	300	0,8	8	2	0,8	8	4
9	65	4к	330	0,9	9	3	0,9	9	5
10	70	5к	0	1	10	4	1	7	6
11	75	6к	30	1,1	11	5	1,1	5	7
12	80	7к	60	1,2	12	6	1,2	4	8
13	85	8к	45	1,3	13	7	1,3	3	5
14	90	9к	80	1,4	14	8	1,4	2	4
15	95	10к	100	1,5	15	9	1,5	1	8

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ8

Електричні кола змінного струму з послідовним і паралельним з'єднанням елементів

8.1. Мета роботи

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл з послідовним і паралельним з'єднанням елементів. Результатом засвоєння роботи повинно бути вміння будувати часові та векторні діаграми струмів і напруг в електричному колі з послідовним і паралельним з'єднанням пасивних і активних елементів.

8.2. Основні теоретичні положення

Обчислення розгалужених схем виконується шляхом поетапного знаходження комплексних опорів та струмів. Спочатку знаходиться еквівалентний опір паралельно з'єднаних гілок. Одержаний опір шляхом перетворень розділяється на дійсну та уявну складові, тобто:

$$\underline{Z} = R + jX.$$

Повний опір називають **імпедансом** електричного кола, активний опір – **резистансом**, реактивний – **реактансом**.

Наступний крок полягає у знаходженні загального комплексного опору послідовно з'єднаних елементів:

$$\underline{Z}_{\text{екв}} = R_{\text{екв}} + jX_{\text{екв}} = Z_{\text{екв}} e^{j\varphi}.$$

Знаходиться комплексне значення струму в загальній гілці схеми:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}_{\text{екв}}} = I_1 e^{-j\varphi}.$$

Обчислюються величини падіння напруг на послідовній та паралельній гілках схеми:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{I}_1 \underline{Z}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_{\text{екв}}.$$

Обчислюється струм у паралельних гілках схеми:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{23}}{R_2}; \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{23}}{\underline{Z}_3}.$$

Після обчислення струмів і напруг на елементах електричної схеми будується векторна діаграма, яка ілюструє взаємозв'язок між ними.

8.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи використовуються ті ж самі складові віртуальної лабораторії, які використовувались у попередніх дослідженнях.

8.4. Порядок виконання роботи

8.4.1. Обрати свій варіант завдання, у відповідності до якого скласти необхідну робочу схему. Базова робоча схема для будь-якого варіанту наводиться на рис. 8.1.

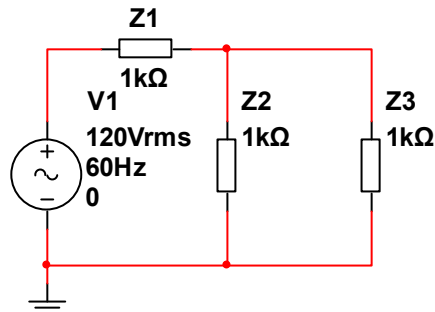


Рис. 8.1

8.4.2. Встановити параметри елементів, що використовуються, і запустити схему в роботу.

8.4.3. За допомогою осцилографа і попередньо встановлених вимірювальних приладів визначити діючі та амплітудні значення напруг і струмів, а також, використовуючи обидва промені осцилографа, знайти кутові співвідношення між напругами у гілках та напругою джерела. Усі заміри записати у відповідну таблицю.

8.5. Вимоги до звіту

8.5.1. Виконати розрахунки напруг на елементах і струмів у гілках електричного кола.

8.5.2. Побудувати векторні і часові діаграми.

8.5.3. Порівняти результати експериментальних даних із розрахунковими.

8.6. Питання до атестації

8.6.1. Вміти виконувати розрахунки електричних кіл змінного струму при змішаному з'єднанні активних і реактивних елементів.

8.6.2. Вміти будувати векторні та часові діаграми, які графічно відображають результати виконаних розрахунків.

8.6.3. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги і струмів у гілках при паралельному з'єднанні активного опору з індуктивністю (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).

8.6.4. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги і струмів у гілках при послідовному з'єднанні активного опору з індуктивністю (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).

8.7. Задачі

8.7.1. Визначте струм I , якщо $U_1 = 6$ В; $R_1 = 55,8$ Ом; $R_2 = 8,2$ Ом; $X_L = 32,2$ Ом (рис. 8.2).

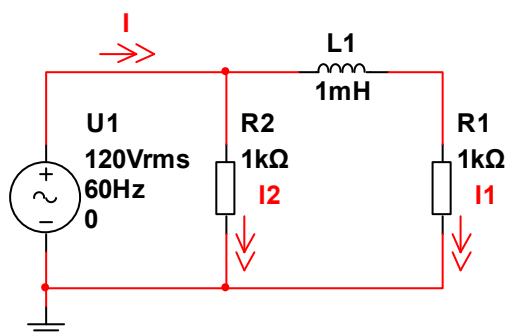


Рис. 8.2

8.7.2. Електричне коло, що наведене на рис. 8.1, має параметри: $Z = R + j\omega L$ ($R = 100 \text{ Ом}$; $L = 0,1 \text{ Гн}$); $Z_1 = R_1 + 1/j\omega C_1$ ($R_1 = 100 \text{ Ом}$; $C_1 = 30 \text{ мкФ}$); $Z_2 = R_2$; $R_2 = 50 \text{ Ом}$; діюче значення напруги, що живить коло, $U = 100 \text{ В}$; частота напруги джерела $f = 100 \text{ Гц}$. Визначити загальний струм, струми у кожній гілці та резонансну частоту.

8.7.3. Електричне коло, що наведене на рис. 8.1, живиться від джерела струму, діюче значення якого $I = 1 \text{ А}$; частота $f = 500 \text{ Гц}$. Визначити загальний струм, струми у кожній гілці та резонансну частоту за умов: $R = 2 \text{ Ом}$; $L = 10 \text{ мГн}$; $R_1 = 5 \text{ Ом}$; $C_1 = 1 \text{ мкФ}$; $R_2 = 1 \text{ Ом}$; $L_2 = 1 \text{ мГн}$.

8.8. Додаток

Таблиця варіантів до схеми, яка наведена на рис. 8.1.

Номер варіанту	G	Z_1	Z_2	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Z_2	Z_3	R_3-X_3	φ_G	A_G
1	U	R	L	10	—	—	3	RC	3-4	30	10
2	I	L	C	—	10	—	5	RL	3-4	45	5
3	U	C	R	—	—	10	6	RL	6-8	60	20
4	I	R	L	8	—	—	8	RC	6-8	90	15
5	U	L	C	—	8	—	2	RC	3-4	120	2
6	I	C	R	—	—	8	4	RL	3-4	150	8
7	U	R	L	6	—	—	7	RC	6-8	180	12
8	I	L	C	—	6	—	3	RL	6-8	30	15
9	U	C	R	—	—	6	5	RL	6-8	45	20
10	I	R	L	4	—	—	7	RC	6-8	60	15
11	U	L	C	—	4	—	8	RC	3-4	90	2
12	I	C	R	—	—	4	2	RL	3-4	120	8
13	U	R	L	2	—	—	4	RC	3-4	30	12
14	I	L	C	—	2	—	6	RL	3-4	45	15
15	U	C	R	—	—	2	5	RL	6-8	60	20

Пояснення до вибору варіантів:

Z_1 – опір послідовного елемента; Z_2, Z_3 – опори паралельних гілок; G – джерело живлення схеми (напруги/струму); A_G – амплітуда вихідного параметра джерела; φ_G – кут зміщення по відношенню до вертикальної осі.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ9

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл змінного струму з декількома джерелами живлення

9.1. Мета роботи

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл з двома джерелами змінного струму. Результатом засвоєння роботи повинно бути вміння будувати часові та векторні діаграми струмів і напруг в електричному колі з кількома джерелами змінного струму.

9.2. Основні теоретичні положення

При обчисленні струмів і напруг у розгалужених схемах використовуються закони Ома і Кірхгофа в комплексній формі зображення.

Для розв'язання задач з обчислення струмів і напруг у схемах змінного струму з кількома джерелами живлення можуть бути використані всі ті методи, які справедливі для кіл постійного струму (з урахуванням комплексного характеру змінних).

9.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи використовуються ті ж самі складові віртуальної лабораторії, які використовувались у попередніх дослідженнях.

9.4. Порядок виконання роботи

9.4.1. Відповідно до варіанта роботи, яка виконується, встановити параметри пасивних компонентів і джерел живлення, використовуючи схему на рис. 9.1.

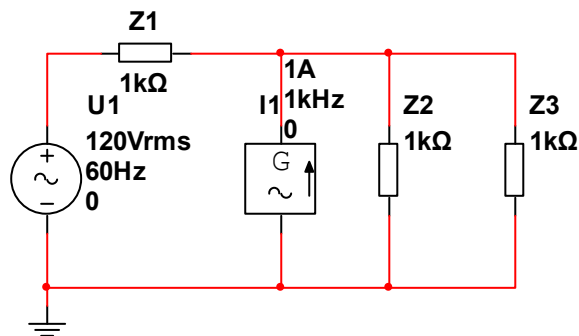


Рис. 9.1

9.4.2. Встановивши джерело напруги в нуль, виконати вимірювання амплітудних та діючих значень напруг і струмів у гілках схеми та їх фазових співвідношень по відношенню до джерела струму.

9.4.3. Встановивши джерело струму в нуль, виконати заміри напруг і струмів у гілках схеми та їх фазові співвідношення по відношенню до напруги джерела.

9.4.4. Для обох джерел живлення встановити параметри у відповідності до варіанту і заміряти напруги та струми у гілках схеми та їх фазові співвідношення по відношенню до джерела напруги.

9.4.5. Обчислити параметри схеми двома способами.

9.5. Вимоги до звіту

9.5.1. Навести порівняння розрахункових даних, виконаних із використанням методу суперпозиції, та експериментальних даних, виконаних на основі замірів струмів і напруг.

9.5.2. Навести часові та векторні діаграми для кожного з режимів проведених вимірювань.

9.5.3. Навести кінцеві результати, які були отримані з використанням методу суперпозиції.

9.5.4. Зробити власні висновки за результатами роботи.

9.6. Питання до атестації

9.6.1. Пояснити суть методу суперпозиції.

9.6.2. Пояснити особливості побудови векторних діаграм при використанні методу суперпозиції.

9.6.3. Пояснити особливості побудови векторних діаграм при паралельному і послідовному з'єднанні активних і реактивних елементів схеми.

9.7. Задачі

9.7.1. Визначити струми, які протікають у гілках електричного кола, зображеного на рис. 9.1, при $i(t) = 4 \sin(\omega t + 60^\circ)$; $u(t) = 10 \sin(\omega t - 30^\circ)$. Параметри схеми такі: $Z_1 = \omega L = 3 \text{ Ом}$; $Z_2 = R = 5 \text{ Ом}$; $Z_3 = 1/\omega C = 4 \text{ Ом}$.

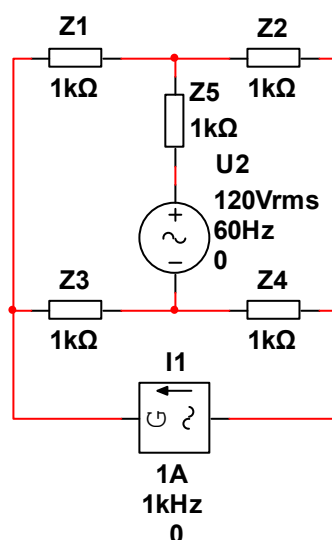


Рис. 9.2

9.7.2. Визначити струми в гілках електричного кола, що зображене на рис. 9.1, при $i(t) = 8 \sin(\omega t - 30^\circ)$; $u(t) = 15 \sin(\omega t + 30^\circ)$. Параметри схеми: $Z_1 = \omega L = 6 \text{ Ом}$; $Z_2 = R = 3 \text{ Ом}$; $Z_3 = 1/\omega C = 3 \text{ Ом}$.

9.7.3. Визначити струми в опорах $Z_1 - Z_5$ електричного кола, що зображене на рис. 9.2, при $i(t) = 4 \sin(\omega t + 60^\circ)$; $u(t) = 10 \sin(\omega t - 30^\circ)$. Параметри схеми: $Z_1 = \omega L = 3 \text{ Ом}$; $Z_2 = R = 5 \text{ Ом}$; $Z_3 = 1/\omega C = 4 \text{ Ом}$; $Z_4 = (3 + j5) \text{ Ом}$; $Z_5 = (5 - j4) \text{ Ом}$.

9.7.4. Визначити струми в опорах $Z_1 - Z_5$ електричного кола, що зображене на рис. 9.2, при $i(t) = 10 \sin(\omega t - 60^\circ)$; $u(t) = 20 \sin(\omega t + 30^\circ)$. Параметри схеми: $Z_1 = (5 + j3) \text{ Ом}$; $Z_2 = R = 5 \text{ Ом}$; $Z_3 = 1/\omega C = 6 \text{ Ом}$; $Z_4 = (3 + j5) \text{ Ом}$; $Z_5 = (5 - j4) \text{ Ом}$.

9.7.5. Визначити струми в опорах $Z_1 - Z_5$ електричного кола, що зображене на рис. 9.2, при $i(t) = 15 \sin(\omega t - 60^\circ)$; $u(t) = 15 \sin(\omega t + 30^\circ)$. Параметри схеми: $Z_1 = (5 - j3) \text{ Ом}$; $Z_2 = (5 - j6) \text{ Ом}$; $Z_3 = R = 6 \text{ Ом}$; $Z_4 = (5 + j5) \text{ Ом}$; $Z_5 = (3 - j4) \text{ Ом}$.

9.8. Додаток

Таблиця варіантів до схеми, яка приведена на рис. 9.1.

Номер варіанту	E, В	J, А	φ , гр.	f, Гц	R, кОм	Z ₁		Z ₂	
						R, Ом	L, Гн	R, кОм	C, мкФ
1	10	0,1	90	40	0,4	4	0,1	1	4
2	15	0,2	120	20	0,5	6	0,2	2	3
3	20	0,3	150	50	0,6	8	0,3	3	2
4	25	0,4	150	60	0,7	7	0,4	4	1
5	30	0,5	180	90	0,8	4	0,5	5	5
6	35	0,6	210	20	0,9	2	0,6	6	6
7	40	0,7	240	30	1	9	0,7	7	7
8	45	0,8	270	40	1,1	10	0,8	8	8
9	50	0,9	300	60	1,2	12	0,9	9	9
10	55	1	330	70	1,3	5	1,0	6	10
11	60	1,1	0	50	1,4	8	1,1	10	11
12	65	1,2	30	30	1,5	4	1,2	1	12
13	70	1,3	60	40	1,6	10	1,3	2	13
14	75	1,4	80	60	1,7	3	1,4	3	14
15	80	1,5	100	80	1,8	7	1,5	4	15

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ10

Дослідження характеристик трансформатора

10.1. Мета роботи

Вивчення особливостей роботи трансформатора як елемента електричного кола. Вивчення режимів роботи трансформатора. Результатом засвоєння роботи повинно бути вміння будувати часові та векторні діаграми струмів і напруг трансформатора, а також використовувати трансформатори для узгодження напруг, струмів, опорів електричних кіл.

10.2. Основні теоретичні положення

Трансформатор – це статичний електромагнітний апарат, що перетворює електричну енергію змінного струму з одними параметрами на електричну енергію з іншими параметрами. За допомогою трансформатора перетворюється напруга, струм та початкова фаза.

Для спрощених досліджень процесів, що відбуваються у трансформаторі, використовують таке поняття, як **ідеальний трансформатор**. Це трансформатор, у якого відсутні магнітні потоки розсіювання, а активні опори обмоток дорівнюють нулю. У реальному трансформаторі обмотки мають як активний опір, так і опір розсіювання, тобто, крім основного магнітного потоку, що перетинає обидві обмотки, є потоки розсіювання первинної та вторинної обмоток.

У теоретичних дослідженнях і при побудові схеми заміщення трансформатора користуються таким поняттям, як **зведений трансформатор**. Це еквівалентний реальному трансформатор, у якого коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці. Для заміни реального трансформатора зведеним треба витримати принципи еквівалентності енергетичного стану. Рівняння балансу енергії для реального і зведеного трансформатора виглядає так:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2.$$

Важливою характеристикою трансформатора є **коефіцієнт трансформації**, який визначається як відношення вхідної напруги до вихідної в режимі холостого ходу. Коефіцієнт трансформації визначається за формулою:

$$K_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

де w_1 та w_2 – кількість витків первинної та вторинної обмоток.

З цієї формули випливає, що трансформатор знижує напругу і разом з тим підвищує струм (та навпаки).

Первинне та вторинне кола трансформатора зв'язані тільки магнітним зв'язком, тобто кола електрично роз'єднані. Ця властивість трансформаторів використовується у **роздільних трансформаторах**, що мають $K_T = 1$.

Трансформатор може працювати у режимі холостого ходу, коли вторинне коло розімкнене (навантаження відсутнє), тобто:

$$Z_H = \infty; \quad I_2 = 0.$$

Режим навантаження здійснюється, коли на вторинну обмотку трансформатора увімкнено навантаження Z_H , а у вторинному колі протікає струм I_2 .

Режим короткого замикання – це аварійний режим роботи трансформатора. У режимі короткого замикання опір навантаження $Z_H = 0$. У цьому режимі встановлюються великі струми короткого замикання в обмотках. Значення цих струмів настільки великі, що призводять до виходу з ладу обмоток трансформатора. Струм короткого замикання зазвичай у 20-30 разів більший від номінального, і тому треба відрізнити режим короткого замикання від досліду короткого замикання. Дослід проводять при напрузі U_1 , пониженій настільки, щоб у вторинному колі протікав струм, який дорівнював би номінальному.

10.3. Використання віртуальної лабораторії *Multisim* для виконання роботи

Для виконання лабораторної роботи використовуються ті самі складові віртуальної лабораторії, які використовувались у попередніх дослідженнях.

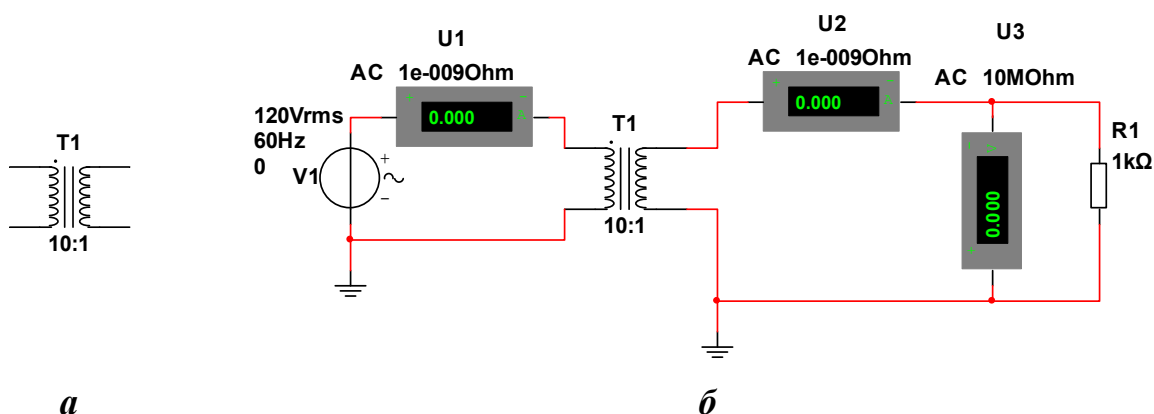


Рис. 10.1

Трансформатор обирається з бібліотеки базових компонентів. Серед трансформаторів, які використовуються в *Multisim* (рис. 10.1) для проведення досліджень, необхідно обирати найпростіший (рис. 10.1, *a*), оскільки трансформатори з більшою кількістю первинних або вторинних обмоток мають велику кількість параметрів і детально вивчаються у спеціальних курсах.

Після вибору трансформатора необхідно задатись його робочими параметрами.

Подвійне натискання лівої кнопки миші викликає появу вікна **Transformer Properties**, яке зображене на рис. 10.2 у режимі установки кількості витків первинної та вторинної обмоток.

При виборі параметрів магнітної системи обирається опція **Core** (рис. 10.3).

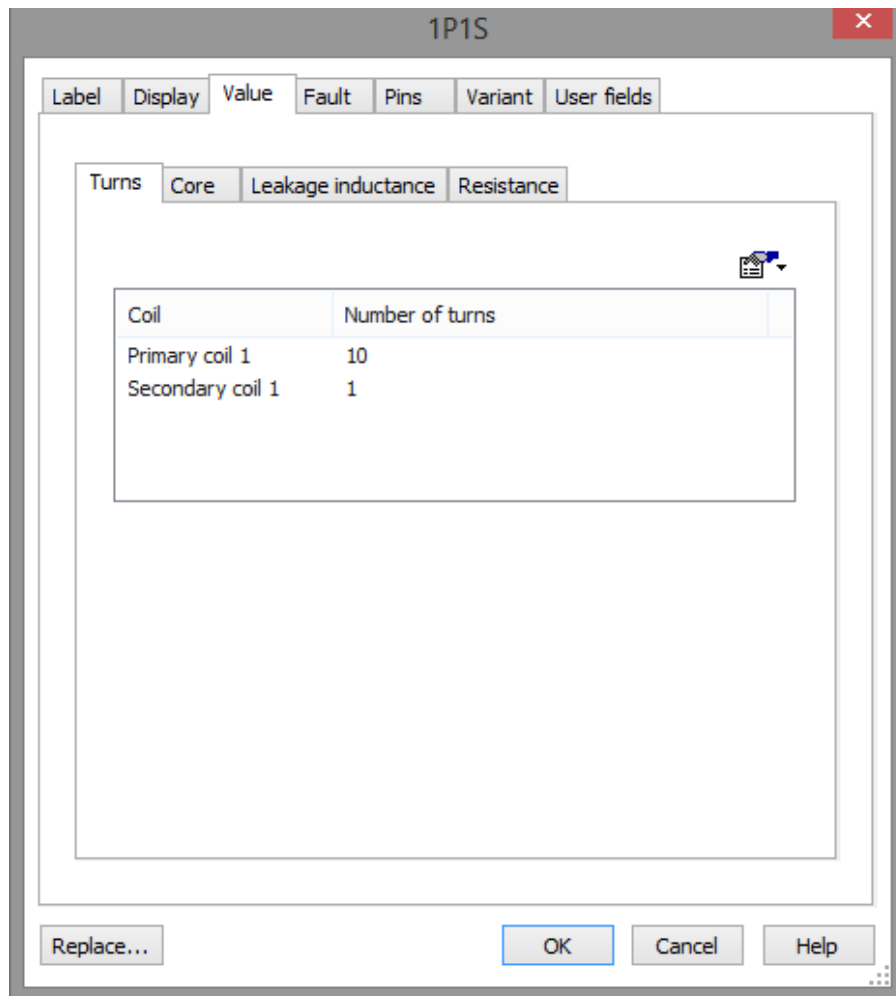


Рис. 10.2

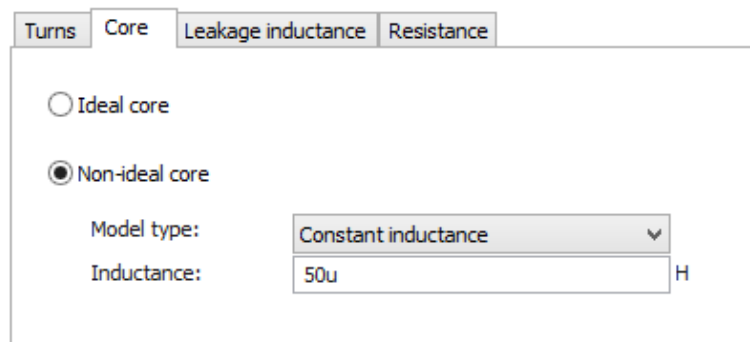


Рис. 10.3

Обираємо лінійні параметри трансформатора (**Constant inductance**), а величину індуктивності залишаємо за замовчуванням.

Вибір індуктивності розсіювання (**Leakage inductance**) виконується у вікні, що наведено на рис. 10.4.

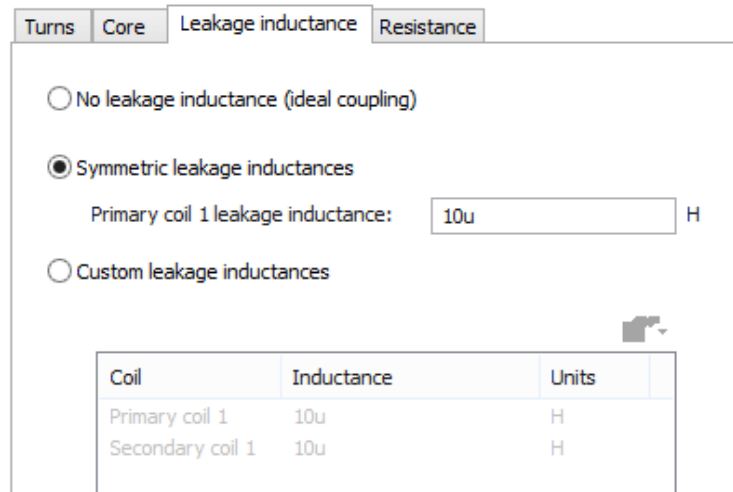


Рис. 10.4

У вікні можна обрати симетричні індуктивності розсіювання для первинної та вторинної обмоток (**Symmetric leakage inductance**) або встановити їх самостійно (**Custom leakage inductance**).

Аналогічно обираються і активні опори обмоток.

Усі параметри задаються у відповідності до варіантів виконання роботи.

10.4. Порядок виконання роботи

10.4.1. Встановити параметри трансформатора у відповідності до заданого варіанту.

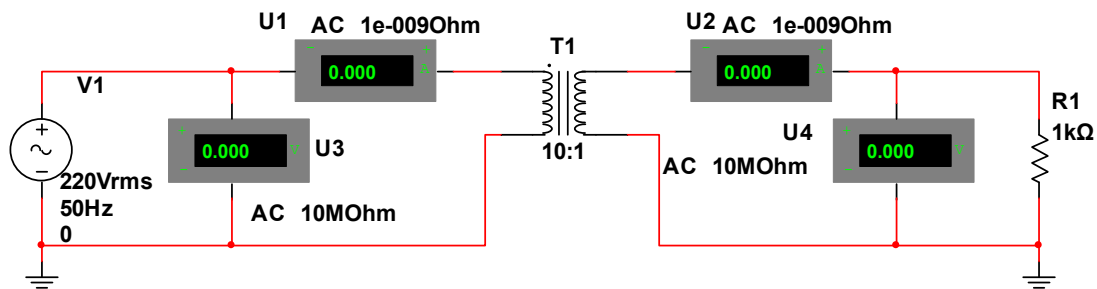


Рис. 10.5

10.4.2. Зібрати електричну схему відповідно до рис. 10.5. Не слід забувати, що вимірювальні прилади після установки в схему необхідно переналагодити для роботи в колах змінного струму, оскільки за замовчуванням вони встановлені для проведення вимірювань у колах постійного струму.

10.4.3. Дослідити трансформатор у режимі холостого ходу. Вторинну обмотку трансформатора залишити розімкнутою. Включити схему і провести заміри струму і напруги первинної обмотки трансформатора та напруги на вторинній обмотці трансформатора. Отримані результати використати для обчис-

лення коефіцієнта трансформації по напрузі, а також обчислення величини індуктивності намагнічування.

Провести зворотний дослід. До вторинної обмотки трансформатора приєднати джерело напруги, а первинну обмотку залишити розімкнутою. Напругу джерела, що приєднане до вторинної обмотки, встановити рівним напрузі, яка була заміряна у попередньому досліді. Результати замірів струму вторинної обмотки й напруги первинної обмотки використати для обчислення коефіцієнта трансформації, як відношення напруг первинної й вторинної обмоток.

10.4.4. Дослідити трансформатор при навантаженні з боку вторинної обмотки трансформатора. Для заданої величини опору навантаження заміряти покази амперметрів і вольтметрів, приєднаних до первинної й вторинної обмоток трансформатора. Зменшуючи опір навантаження, виконати заміри струмів первинної й вторинної обмоток трансформатора і напруги на навантаженні. Отримані результати використати для побудови зовнішньої характеристики трансформатора (ВАХ).

10.4.5. Збільшити в установках параметрів трансформатора активні опори його обмоток (на 30%) і провести повторні заміри для побудови ВАХ. Повторити дослід із попередніми активними опорами і збільшеним значенням індуктивності розсіювання обмоток трансформатора. Побудувати ВАХ трансформатора для кожного з проведених дослідів і зробити висновки щодо впливу активних та індуктивних опорів на вигляд зовнішньої характеристики. Параметри взяти з таблиці в додатку.

10.4.6. Провести дослід короткого замикання. Для проведення цього досліді необхідно, щоб у налаштуваннях трансформатора були встановлені або активні опори обмоток, або індуктивності розсіювання обмоток, або перші й другі параметри. У схемі, що досліджується, вторинну обмотку закоротити через амперметр, а напругу джерела живлення встановити в нуль.

Дослід проводиться в наступній послідовності:

1. Встановити напругу джерела живлення первинної обмотки на рівні одного відсотка від номінального значення й перевірити величину струму вторинної обмотки. Якщо величина струму менша, ніж струм при навантаженні, у відповідності до досліді 10.4.4, то напругу джерела живлення необхідно збільшити.

2. Збільшення напруги джерела проводиться до того часу, поки величина струму вторинної обмотки не досягне величини струму в досліді 10.4.4 при навантаженні. Заміряна напруга при вказаному значенні струму називається напругою короткого замикання. Вона використовується для обчислення індуктивних опорів розсіювання обмоток трансформатора.

10.5. Вимоги до звіту

10.5.1. Навести результати обчислень потужності, заміряні на стороні первинної і вторинної обмоток трансформатора.

10.5.2. Пояснити зв'язок між коефіцієнтами трансформації трансформатора по напрузі й по струму.

10.5.3. Навести еквівалентні опори, обчислені для первинної і вторинної обмоток, та пояснити їх взаємозв'язок із коефіцієнтами трансформації.

10.5.4. Для кожного з проведених дослідів виконати розрахунки напруг і струму навантаження вторинної обмотки.

10.5.5. Побудувати Т-подібну схему трансформатора для заданого режиму.

10.6. Питання до атестації

10.6.1. Пояснити взаємозв'язок між струмами і напругою первинної й вторинної обмоток трансформатора.

10.6.2. Пояснити основні режими роботи трансформатора.

10.6.3. Пояснити, від чого залежить величина напруги на вторинній обмотці трансформатора.

10.6.4. Пояснити фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі.

10.6.5. Привести приклади використання трансформаторів.

10.6.6. Який пристрій називається трансформатором? Які параметри електричного кола він перетворює?

10.7.7. На якому струмі можлива робота трансформатора?

10.7.8. Пояснити термін «коефіцієнт трансформації».

10.7. Задачі

10.7.1. Визначити коефіцієнт трансформації однофазного знижувального трансформатора, якщо кількості витків його первинної та вторинної обмоток відповідно дорівнює 300 та 60.

10.7.2. Визначити коефіцієнт трансформації однофазного двохобмоткового знижувального трансформатора, якщо ЕРС, індуковані у первинній та вторинній обмотках, відповідно дорівнюють 500 В і 127 В.

10.7.3. Є однофазний двохобмотковий трансформатор, розрахований на номінальну первинну напругу 500 В, з кількістю витків первинної обмотки 2000. Визначити кількість витків вторинної обмотки цього ж трансформатора, яка потрібна для одержання на її затискачах при холостому ході напруги 250 В.

10.7.4. Є однофазний двохобмотковий трансформатор, розрахований на номінальну напругу в первинній обмотці 500 В, з кількістю витків первинної обмотки 2000. Яка напруга буде на вторинній обмотці при холостому ході цього ж трансформатора, якщо кількість витків вторинної обмотки – 400?

10.7.5. Вказати вираз для визначення діючого значення ЕРС, що індукована у первинній обмотці трансформатора основним магнітним полем:

$$\begin{aligned} 1. \quad e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; & 2. \quad e_1 &= -L_1 \frac{di_1}{dt}; & 3. \quad E_1 &= 4,44 f w_1 \Phi_m; \\ 4. \quad E_1 &= f w_1 \Phi_m; & 5. \quad e_1 &= \sqrt{2} E_1 \sin(\omega t - 90^\circ). \end{aligned}$$

10.7.6. Визначити ЕРС первинної обмотки трансформатора, яка має 450 витків, якщо трансформатор підключили до мережі змінного струму частотою 50 Гц, а магнітний потік у сердечнику $\Phi = 2,17 \cdot 10^{-3}$ Вб.

10.7.7. Вказати вираз для визначення діючого значення ЕРС, що індукована у вторинній обмотці трансформатора основним магнітним полем:

$$\begin{aligned} 1. e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi}{dt}; & 2. e_2 &= -L_2 \frac{di_2}{dt}; & 3. E_2 &= 4,44 f w_2 \Phi_m; \\ 4. E_2 &= f w_2 \Phi_m; & 5. e_2 &= \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t - 90^\circ). \end{aligned}$$

10.7.8. Вказати рівняння рівноваги миттєвих значень напруг для первинної обмотки трансформатора при холостому ході:

$$\begin{aligned} 1. \dot{U}_{10} &= -\dot{E}_{10} + \underline{Z}_1 \dot{I}_{10}; & 2. e_{10} &= u_{10} + Z_1 i_{10}; & 3. u_{10} &= -e_{10}; \\ 4. \dot{U}_{10} &= R_1 \dot{I}_{10} + j X_1 \dot{I}_{10}; & 5. u_{10} &= -e_{10} + R_1 i_{10} + L_1 \frac{di_{10}}{dt}. \end{aligned}$$

10.7.9. Вказати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для первинної обмотки трансформатора при холостому ході:

$$\begin{aligned} 1. \dot{U}_{10} &= -\dot{E}_{10} - Z_1 \dot{I}_{10}. & 2. \dot{E}_{10} &= \dot{U}_{10} + Z_1 \dot{I}_{10}. & 3. \dot{U}_{10} &= (R_1 + jX_1) \dot{I}_{10}. \\ 4. \dot{U}_{10} &= -\dot{E}_{10} + (R_1 + jX_1) \dot{I}_{10}. & 5. u_{10} &= -e_{10} + (R_1 + jX_1) i_{10}. \end{aligned}$$

10.7.10. Вказати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для первинної обмотки навантаженого трансформатора:

$$\begin{aligned} 1. \dot{E}_1 &= \dot{U}_1 + \underline{Z}_1 \dot{I}_1. & 2. \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + Z_1 \dot{I}_1. & 3. \dot{U}_1 &= (R_1 + jX_1) \dot{I}_1. \\ 4. e_1 &= -u_1 + Z_1 i_1. & 5. u_1 &= -e_1 + Z_1 i_1. \end{aligned}$$

10.7.11. Вказати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для вторинної обмотки навантаженого трансформатора:

$$\begin{aligned} 1. e_2 &= u_2 - Z_2 i_2. & 2. e_2 &= u_2 + Z_2 i_2. & 3. \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + R_2 \dot{I}_2. \\ 4. \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 + Z_2 \dot{I}_2. & 5. \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + Z_2 \dot{I}_2. \end{aligned}$$

10.7.12. Вказати рівняння рівноваги миттєвих значень напруг для вторинної обмотки трансформатора при короткому замиканні:

$$\begin{aligned} 1. e_{2K} &= R_2 i_{2K} + L_2 \frac{di_{2K}}{dt}. & 2. e_{2K} &= u_{2K} + Z_2 i_{2K}. & 3. e_{2K} &= R_K i_{2K}. \\ 4. \dot{E}_{2K} &= Z_2 \dot{I}_{2K}. & 5. \dot{U}_{2K} &= R_K \dot{I}_{2K}. \end{aligned}$$

10.7.13. Вказати рівняння рівноваги комплексних діючих значень напруг для вторинної обмотки трансформатора при короткому замиканні:

$$\begin{aligned} 1. \dot{E}_{2K} &= Z_K \dot{I}_{2K}. & 2. \dot{E}_{2K} &= Z_2 \dot{I}_{2K}. & 3. \dot{U}_{2K} &= R_K \dot{I}_{2K}. \\ 4. e_{2K} &= Z_2 i_{2K}. & 5. u_{2K} &= Z_2 i_{2K}. \end{aligned}$$

10.7.14. Визначити ЕРС вторинної обмотки трансформатора E_2' , зведену до кількості витків первинної обмотки, якщо дійсне значення ЕРС вторинної обмотки 100 В, а коефіцієнт трансформації 2.

10.7.15. Вказати правильну залежність між дійсним E_2 та зведеним E_2' значеннями ЕДС вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації K :

$$1. E_2' = \frac{E_2}{K}. \quad 2. E_2' = \frac{E_2}{K^2}. \quad 3. E_2' = KE_2. \quad 4. E_2' = K^2 E_2. \\ 5. E_2' = E_2.$$

10.7.16. Вказати правильну залежність між дійсним I та зведеним I' значеннями струмів вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації K :

$$1. I_2' = \frac{I_2}{K}. \quad 2. I_2' = \frac{I_2}{K^2}. \quad 3. I_2' = KI_2. \quad 4. I_2' = K^2 I_2. \quad 5. I_2' = I_2$$

10.7.17. Визначити струм вторинної обмотки трансформатора, зведений до кількості витків первинної обмотки, якщо дійсне значення струму вторинної обмотки 100 А, а коефіцієнт трансформації 10.

10.7.18. Вказати правильну залежність між дійсним R_2 та зведеним R_2' значеннями активних опорів вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації K :

$$1. R_2' = R_2. \quad 2. R_2' = KR_2. \quad 3. R_2' = \frac{R_2}{K}. \quad 4. R_2' = \frac{R_2}{K^2}. \quad 5. R_2' = K^2 R_2.$$

10.7.19. Визначити активний опір вторинної обмотки трансформатора, зведений до кількості витків первинної обмотки, якщо дійсне значення активного опору 0,5 Ом, а коефіцієнт трансформації 4.

10.7.20. Вказати правильну залежність між дійсним X_2 та зведеним X_2' значеннями індуктивних опорів розсіяння вторинної обмотки трансформатора з коефіцієнтом трансформації K :

$$1. X_2 = KX_2'. \quad 2. X_2 = \frac{X_2'}{K^2}. \quad 3. X_2 = \frac{X_2'}{K}. \quad 4. X_2 = X_2'. \quad 5. X_2 = K^2 X_2'.$$

10.7.21. Визначити індуктивний опір розсіяння вторинної обмотки трансформатора X_2' , зведений до кількості витків первинної обмотки, якщо дійсне значення опору вторинної обмотки 0,8 Ом, а коефіцієнт трансформації 2.

10.7.22. Серед зображених на рис. 10.5 зовнішніх характеристик трансформатора для активного, індуктивного, ємнісного та активно-індуктивного навантаження вказати характеристику:

- а) для активного навантаження;
- б) для індуктивного навантаження;
- в) для ємнісного навантаження;
- г) для активно-індуктивного навантаження.

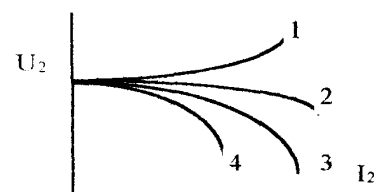


Рис. 10.5.

10.7.23. Як зміниться магнітний потік у магнітопроводі трансформатора, якщо збільшити струм навантаження у 2 рази.

10.7.24. Трансформатор потужністю 10 кВА підключено до мережі 220 В. Напруга на вторинній обмотці трансформатора при холостому ході дорівнює $U_{2XX} = 130$ В. Кількість витків вторинної обмотки $w_2 = 80$. Визначити коефіцієнт трансформації K_T , кількість витків первинної обмотки w_1 , а також струми I_{1H} та I_{2H} .

10.7.25. Первинна обмотка трансформатора підключена до мережі змінного струму напругою $U = 220$ В. До трьох вторинних обмоток трансформатора w_1 , w_2 , w_3 підключені резистори з опором $R_1 = R_2 = R_3 = 20$ Ом, у яких проходять струми $I_1 = 0,25$ А; $I_2 = 0,315$ А; $I_3 = 0,6$ А. Визначити коефіцієнти трансформації для трьох вторинних обмоток.

10.7.26. У режимі холостого ходу струм у первинній обмотці трансформатора з активним опором $R = 15$ Ом та індуктивністю $L = 0,16$ Гн дорівнює $I_1 = 2,5$ А. Знайти діюче значення напруги на первинній і вторинній обмотках та коефіцієнт потужності, якщо коефіцієнт трансформації дорівнює 60.

10.7.27. Трансформатор підключили до мережі змінного струму з напругою $U = 660$ В. До вторинної обмотки під'єднана освітлювальна мережа з $\cos \varphi = 1$, яка розрахована на напругу $U = 220$ В. Чому дорівнює струм вторинної обмотки, якщо струм у первинній обмотці дорівнює 2 А?

10.7.28. Втрати при холостому ході трансформатора дорівнюють $P_X = 500$ Вт, при короткому замиканні $P_K = 1400$ Вт. Визначити ККД трансформатора, якщо його номінальна потужність $P_{ном} = 25$ кВт.

10.7.29. Однофазний трансформатор з номінальною потужністю $S_{ном} = 1600$ кВА підключили до мережі змінного струму з напругою $U = 10000$ В. При холостому ході трансформатора напруга на затискачах вторинної обмотки $U = 400$ В. Визначити коефіцієнт трансформації та кількість витків первинної обмотки, якщо кількість витків вторинної обмотки $w_2 = 32$.

10.7.30. Трансформатор під'єднали до мережі електропередачі напругою $U = 600$ В. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора і кількість витків первинної обмотки, якщо кількість витків вторинної обмотки $w_2 = 250$, а напруга в режимі холостого ходу на вторинній обмотці $U_2 = 200$ В.

10.7.31. Кількість витків первинної обмотки трансформатора $w_1 = 900$, вторинної $w_2 = 350$. Визначити напругу холостого ходу на вторинній обмотці, якщо трансформатор під'єднаний до мережі змінного струму з напругою $U = 600$ В.

10.7.32. Трансформатор напруги має первинну і вторинну обмотки з кількістю витків $w_1 = 2000$, $w_2 = 200$. Визначити коефіцієнт трансформації.

10.7.33. Первинна обмотка автотрансформатора має $w_1 = 600$, коефіцієнт трансформації $n = 20$. Визначити кількість витків вторинної обмотки.

10.8. Додаток

Таблиця варіантів до схеми, яка наведена на рис. 10.4.

Номер варіанту	E_1 , В	L_E , Гн	R , Ом	K_{TP}	L_M , Гн	R_P	R_S
1	10	0,001	50	0,5	1	0,1	0,1
2	20	0,002	60	2	2	0,1	0,1
3	30	0,003	70	3	3	0,2	0,2
4	40	0,004	80	4	4	0,2	0,2
5	50	0,005	90	5	5	0,3	0,3
6	55	0,006	95	3	6	0,3	0,3
7	60	0,007	100	4	7	0,1	0,1
8	65	0,008	200	2	8	0,1	0,1
9	70	0,009	300	0,5	9	0,2	0,2
10	75	0,001	400	4	1,5	0,2	0,2
11	80	0,002	500	3	1,2	0,3	0,3
12	85	0,003	600	2	1,4	0,3	0,3
13	90	0,004	700	0,5	1,6	0,1	0,1
14	95	0,005	800	5	1,8	0,2	0,2
15	10	0,002	60	1,5	1	0,1	0,1

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ11

Дослідження трансформатора як пасивного чотириполюсника

11.1. Мета роботи

Метою роботи є вивчення методології визначення конфігурації схеми заміщення трансформатора як пасивного чотириполюсника на основі h - та Z -параметрів. Результатом засвоєння роботи повинно бути вміння створювати математичні моделі чотириполюсників на основі експериментальних досліджень та використовувати їх для розрахунку електричних кіл.

11.2. Основні теоретичні положення

При вивченні складних електричних кіл, якщо треба визначити струм або напругу лише на обмеженій ділянці схеми або встановити їх параметри в залежності від вхідного джерела, треба всю електричну схему виділити по відношенню до джерела і до навантаження. Виділену частину схеми називають **чотириполюсником**. В реальних електричних схемах у вигляді чотириполюсника корисно представляти трансформатори, підсилювачі, фільтри та ряд інших електричних та електронних пристроїв.

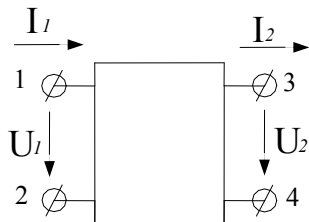


Рис. 11.1

Чотириполюсники, як і двополюсники, можуть бути лінійними і нелінійними, активними і пасивними. Здебільшого ми розглядатимемо пасивні чотириполюсники. Клеми $1 - 2$, до яких підключається джерело електричного сигналу, називаються **вхідними**, а клеми $3 - 4$, що приєднуються до приймача, є **вихідними** (рис. 11.1).

Чотириполюсники характеризуються такими параметрами, як комплексний коефіцієнт передачі напруги:

$$K_u = \dot{U}_2 / \dot{U}_1,$$

і коефіцієнт передачі струму:

$$K_I = \dot{I}_2 / \dot{I}_1.$$

Задача аналізу чотириполюсника полягає у тому, щоб встановити взаємозв'язок між його вхідними та вихідними параметрами. Для лінійного чотириполюсника такий взаємозв'язок встановлюється двома лінійними рівняннями.

У задачах електроніки в якості незалежних змінних обираються h -параметри, з використанням яких записуються рівняння, що зв'язують вхідні та вихідні параметри:

$$\dot{U} = h_{11} \dot{I}_1 + h_{12} \dot{U}_2; \quad (11.1)$$

$$\dot{I}_2 = h_{21} \dot{I}_1 + h_{22} \dot{U}_2. \quad (11.2)$$

Наведені рівняння називаються **рівняннями чотириполюсника в h -параметрах**.

Комплексні h - параметри можуть бути визначені аналітично або експериментально.

При експериментальних дослідженнях використовується режим короткого замикання і холостого ходу.

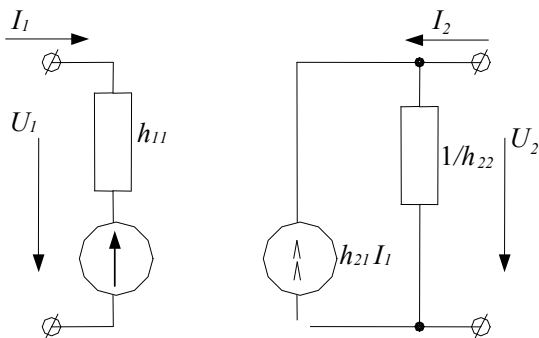
У першому випадку приймається $U_2 = 0$, що дає можливість визначити коефіцієнти:

$$h_{11} = (\dot{U}_1 / \dot{I}_1) | \dot{U}_2 = 0; \quad h_{21} = (\dot{I}_2 / \dot{I}_1) | \dot{U}_2 = 0.$$

Перший з них називається **вхідним опором**, а другий – **коефіцієнтом передачі струму**.

У режимі холостого ходу $\dot{I}_2 = 0$ і визначаються параметри:

$$h_{12} = (\dot{U}_1 / \dot{U}_2) | \dot{I}_2 = 0; \quad h_{22} = (\dot{I}_2 / \dot{U}_1) | \dot{I}_2 = 0.$$



Перший з них є зворотним до K_U і визначає рівень впливу вихідної напруги чотириполюсника на вхідні параметри, а другий представляє вихідну провідність чотириполюсника.

На основі наведених рівнянь на рис. 11.2 зображена схема заміщення чотириполюсника.

Відносно вхідних клем чотириполюсник зображується у вигляді послідовно

з'єднаних комплексного опору h_{11} і залежного джерела напруги – $h_{12} \cdot \dot{U}_2$. Відносно вихідних клем він розглядається у вигляді залежного джерела струму $h_{21} \cdot \dot{I}_1$, який зашунтований комплексним опором h_{22}^{-1} . Наведена схема заміщення може використовуватись для лінійних чотириполюсників.

11.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

У роботі використовуються дослідження трансформатора з тими установочними параметрами, які використовувались у попередній роботі (ТЕ10). Методологія проведення дослідів теж залишається без змін – використання режимів короткого замикання і холостого ходу.

11.4. Порядок виконання роботи

11.4.1. Провести досліди з визначення h-параметрів у відповідності до системи рівнянь:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= h_{11}\dot{I}_1 + h_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= h_{21}\dot{I}_1 + h_{22}\dot{U}_2.\end{aligned}$$

- Дослід короткого замикання вторинної обмотки ($U_2 = 0$). Для проведення досліду необхідно, щоб струм I_1 дорівнював значенню струму при номінальному навантаженні. Дослід дає можливість визначити параметр h_{11} .
- Дослід холостого ходу по входу трансформатора. Джерело живлення приєднується до вторинної обмотки. Напруга джерела повинна відповідати напрузі холостого ходу вторинної обмотки у відповідності до роботи TE10. Струм первинної обмотки близький до нуля. Дослід дає можливість визначити параметр h_{12} .
- Повторити перший дослід, але з тією різницею, що заміряється струм I_1 при номінальному значенні струму I_2 . Дослід дає можливість визначити параметр h_{21} .
- Повторити другий дослід, але заміряти струм вторинної обмотки. Дослід дає можливість обчислити параметр h_{22} .

11.4.2. Вивчення чотириполюсників проводиться на найпростіших схемах, що наведені на рис. 11.3.

Обраний за варіантом чотириполюсник встановлюється у схему, що зображена на рис. 10.5. За варіантом також встановлюються Z-параметри чотириполюсника (Z_1 , Z_2) і параметри джерела живлення. Варіанти наведені у Додатку 1.

Проводяться досліди щодо визначення Z-параметрів у відповідності до системи рівнянь:

$$\begin{aligned}U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2; \\ U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2.\end{aligned}$$

- Дослід холостого ходу при розімкнутій вторинній обмотці ($I_2 = 0$), який дозволяє обчислити параметр Z_{11} .
- Дослід короткого замикання при замкненій вторинній обмотці. Напруга живлення приєднується до первинної обмотки. Визначається при номінальному струмі вторинної обмотки. Дозволяє обчислити Z_{12} .
- Дослід, який повторяє другий дослід, але заміряються струм первинної обмотки й напруга вторинної. Дозволяє обчислити Z_{21} .
- Дослід, що повторює перший дослід. Заміряється струм I_2 і напруга U_2 . Дозволяє обчислити Z_{22} . До вторинної обмотки підводиться напруга, номінальна для даної обмотки.

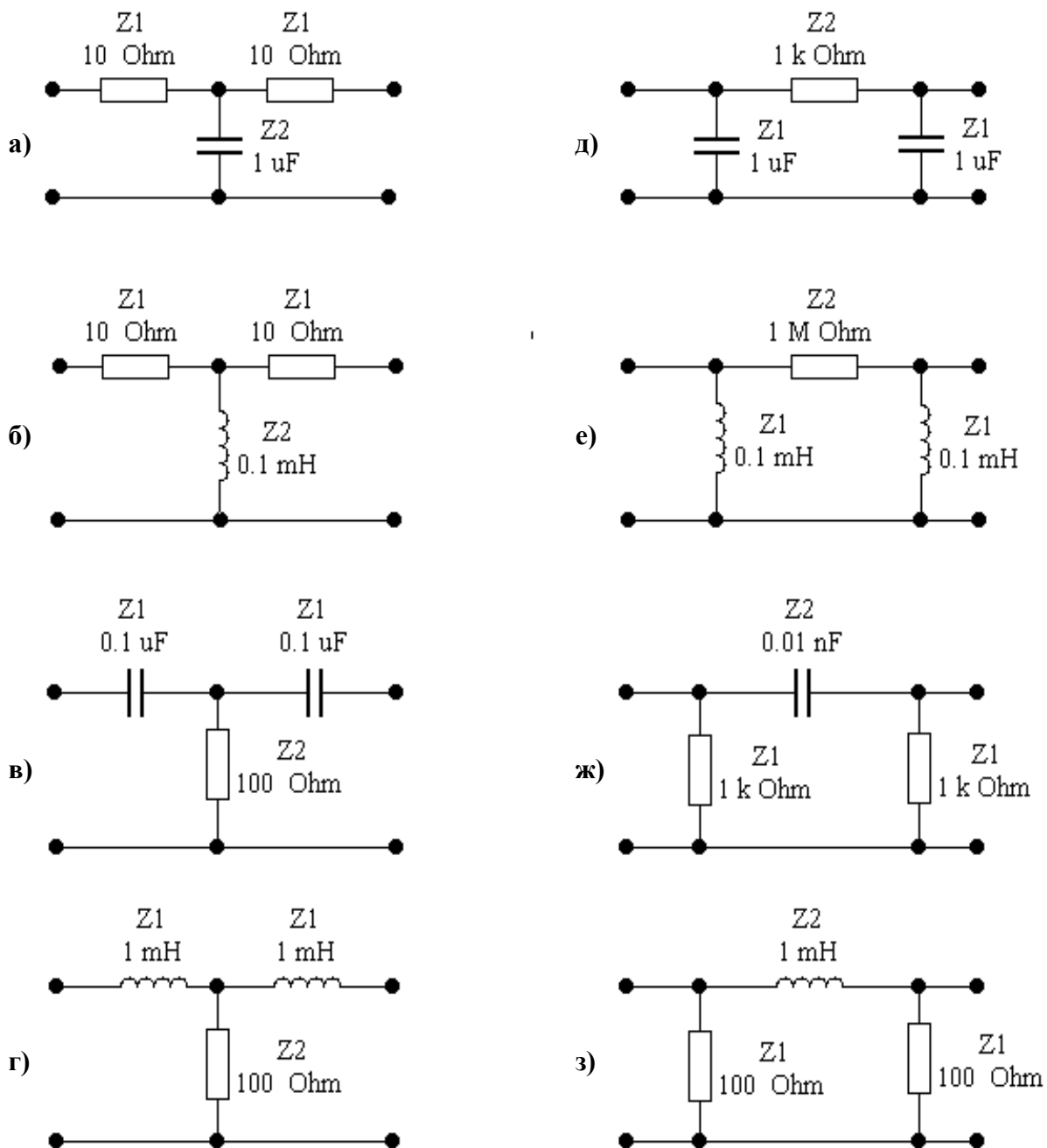


Рис. 11.3

11.5. Вимоги до звіту

11.5.1. Виконавши описані вище досліди щодо визначення Z-параметрів чотириполюсника, необхідно обчислити такі параметри:

- опори холостого ходу і короткого замикання – Z_{1X} , Z_{2X} , Z_{1K} , Z_{2K} ;
- входні опори чотириполюсника по обох входах;
- характеристичні параметри чотириполюсника – Z_{1C} , Z_{2C} , chg , shg .

11.5.2. Обчислити h- та Z- параметри зі схеми заміщення трансформатора.

11.5.3. Порівняти обчислені дані з експериментальними.

11.6. Питання до атестації

- 11.6.1. Пояснити, що таке чотириполіусник. Для розробки яких задач вводиться поняття чотириполіусника?
- 11.6.2. Які типи чотириполіусників Ви знаєте? Розкажіть про ці типи.
- 11.6.3. Пояснити, як визначаються h-параметри і Z-параметри.
- 11.6.4. Дати фізичну інтерпретацію кожному з h-параметрів.
- 11.6.5. Дати фізичну інтерпретацію характеристичним опорам.
- 11.6.6. Дати пояснення складовим затухання чотириполіусника.

11.7. Приклади розв'язання задач

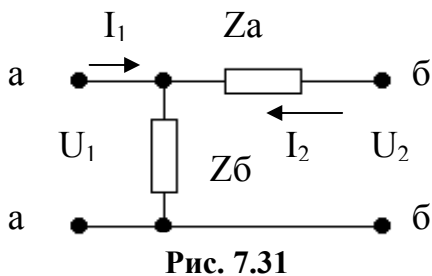


Рис. 7.31

Приклад 1. Для чотириполіусника, схема якого наведена на рис. 7.31, визначити Z-параметри.

Розв'язання. Запишемо основні рівняння, що поєднують вхідні і вихідні струми та напруги:

$$U_1 = U_2 - I_2 Z_a;$$

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_б} - I_2 = \frac{U_2}{Z_б} - I_2 \frac{Z_a}{Z_б} - I_a = \frac{U_2}{Z_б} - I_2 \left(1 + \frac{Z_a}{Z_б} \right).$$

Знаходимо Z-параметри чотириполіусника:

$$U_1 = Z_б I_1 + Z_б I_2;$$

$$U_2 = Z_б I_1 + (Z_a + Z_б) I_2.$$

Приклад 2. Використовуючи досліди холостого ходу та короткого замикання виводів a-a та б-б, визначити Z-параметри чотириполіусника, схема якого наведена на рис. 7.31.

Розв'язання.

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{I_2 = 0} = Z_б; \quad \text{оскільки} \quad U_1 = I_1 \cdot Z_б.$$

$$Z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \Big|_{I_1 = 0} = Z_б; \quad \text{оскільки} \quad U_1 = I_2 \cdot Z_б.$$

$$Z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \Big|_{I_2 = 0} = Z_б; \quad \text{оскільки} \quad U_2 = I_1 \cdot Z_б.$$

$$Z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \Big|_{I_1 = 0} = (Z_a + Z_б); \quad \text{оскільки} \quad U_2 = (Z_a + Z_б) \cdot I_2.$$

Приклад 3. Використовуючи дослід холостого ходу та короткого замикання виводів *a-a* та *б-б*, визначити *h*-параметри чотириполюсника, схема якого наведена на рис. 7.31.

Розв'язання.

$$h_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{U_2 = 0} = \frac{Z_a \cdot Z_б}{Z_a + Z_б}, \text{ оскільки виводи } б-б \text{ закорочені.}$$

$$h_{12} = \left. \frac{U_1}{U_2} \right|_{I_1 = 0} = \frac{Z_б}{Z_a + Z_б}, U_1 \text{ визначається як частина напруги } U_2.$$

$$h_{21} = \left. \frac{I_2}{I_1} \right|_{U_2 = 0} = -\frac{Z_б}{Z_a + Z_б}, I_2 \text{ визначається як частина вихідного струму.}$$

$$h_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1 = 0} = \frac{1}{Z_a + Z_б}.$$

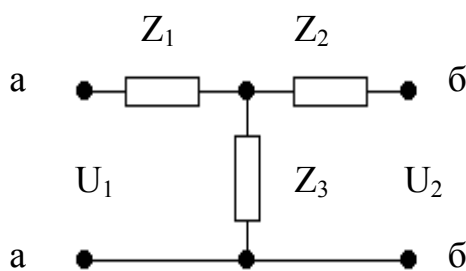


Рис. 7.32

Приклад 4. Визначити на основі дослідів холостого ходу та короткого замикання *Z*-параметри Т-подібного чотириполюсника, схема якого наведена на рис. 7.32.

Розв'язання.

Використовуючи результати розв'язання задачі з прикладу 2, знаходимо:

$$Z_{11} = \left. \frac{U_1}{I_1} \right|_{I_2 = 0} = (Z_1 + Z_3)$$

$$Z_{12} = \left. \frac{U_1}{I_2} \right|_{I_1 = 0} = Z_3$$

$$Z_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2 = 0} = Z_3$$

$$Z_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1 = 0} = Z_2 + Z_3$$

Рівняння чотириполюсника в *Z*-параметрах матиме вигляд:

$$U_1 = I_1 \cdot (Z_1 + Z_3) + I_2 \cdot Z_3 ;$$

$$U_2 = I_1 \cdot Z_3 + I_2 \cdot (Z_2 + Z_3)$$

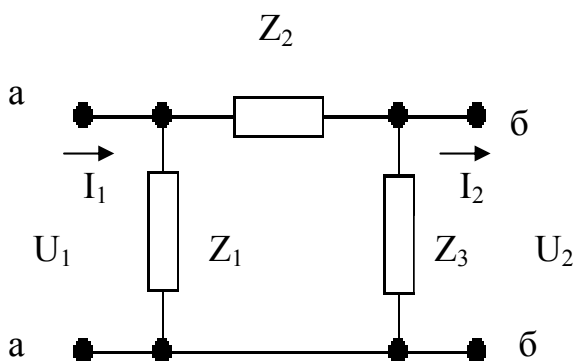


Рис. 7.33

Приклад 5. Визначити на основі дослідів холостого ходу та короткого замикання *Z*-параметри П-подібного чотириполюсника, схема якого наведена на рис. 7.33.

Розв'язання.

$$Z_{11} = \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$Z_{12} = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$Z_{21} = \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$Z_{22} = \frac{(Z_1 + Z_2) \cdot Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 \cdot (Z_1 + Z_2 + Z_3)}$$

Приклад 6. Визначити вхідні опори холостого ходу та короткого замикання для Т- і П-подібних чотиріполюсників.

Розв'язання. Опір холостого ходу визначається при розімкнутих вихідних клеммах ($I_2 = 0$) і для обох типів чотиріполюсників: $Z_{1xx} = Z_{11}$. Тому для Т-подібної схеми:

$$Z_{1xx} = Z_1 + Z_3,$$

а для П-подібної:

$$Z_{11} = \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_3)}{Z_1 + Z_2 + Z_3}.$$

Вхідний опір короткого замикання визначається при закорочених вихідних клеммах чотиріполюсника, тому для Т-подібної схеми:

$$Z_{1K} = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3},$$

а для П-подібної:

$$Z_{1K} = Z_1 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Приклад 7. Використовуючи результати попередньої задачі, знайти вираз для визначення величини характеристичного опору для симетричного Т-подібного чотиріполюсника.

Розв'язання. Величини характеристичних опорів обчислюються за формулами:

$$Z_{1C} = \sqrt{Z_{1xx} \cdot Z_{1K}}; \quad Z_{2C} = \sqrt{Z_{2xx} \cdot Z_{2K}}.$$

Якщо підставити значення опорів в Z_{xx} та Z_K , можна знайти

$$Z_C = Z_1 \sqrt{\frac{2 \cdot Z_2}{Z_1}}.$$

Приклад 8. Були проведені досліді холостого ходу і короткого замикання для несимметричного чотириполіусника. Визначити параметри холостого ходу і короткого замикання, якщо виміри показали наступні результати:

$$U_{1x} = 100 \text{ В}, \quad I_{1x} = 3,15 \text{ А}, \quad P_{1x} = 300 \text{ Вт}, \quad U_{1k} = 50 \text{ В},$$

$$I_{1k} = 1,4 \text{ А}, \quad P_{1k} = 57,6 \text{ Вт}, \quad U_{2k} = 60 \text{ В}, \quad I_{2k} = 6 \text{ А}, \quad P_{2k} = 0.$$

Розв'язання. Визначимо комплексні вхідні опори чотириполіусника:

$$Z_{1x} = \frac{U_{1x}}{\dot{I}_{1x}} = \frac{100}{3,15} = 31,6 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi_{1x} = \frac{P_{1x}}{U_{1x} \cdot \dot{I}_{1x}} = \frac{300}{100 \cdot 3,15} = 0,95; \quad \varphi_{1x} = 18,4^\circ;$$

$$\underline{Z}_{1x} = Z_{1x} e^{j18,4} = 31,6 e^{j18,4} = (30 + j10) \text{ Ом};$$

$$Z_{1k} = \frac{U_{1k}}{\dot{I}_{1k}} = \frac{50}{1,4} = 36 \text{ Ом};$$

$$\cos \varphi_{1k} = \frac{P_{1k}}{U_{1k} \cdot \dot{I}_{1k}} = \frac{57,6}{50 \cdot 1,4} = 0,83; \quad \varphi_{1k} = 33,8^\circ;$$

$$\underline{Z}_{1k} = Z_{1k} e^{j33,8} = 36 e^{j33,8} = (30 + j20) \text{ Ом};$$

$$Z_{2x} = \frac{U_{2x}}{\dot{I}_{2x}} = \frac{60}{6} = 10 \text{ Ом};$$

Оскільки $P_{2k} = 0$, то Z_{2x} має реактивний (ємнісний) характер, тобто:

$$\varphi_{2k} = -90^\circ,$$

у такому випадку:

$$\underline{Z}_{2x} = Z_{2x} \cdot e^{j90} = 10 \cdot e^{j90} = -j10 \text{ Ом}.$$

11.8. Задачі

11.7.1. Визначити Z -параметри ідеального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $K_{тр} = w_2 / w_1 = 1$. Трансформатор працює в режимі холостого ходу.

11.7.2. Визначити Z -параметри ідеального трансформатора з коефіцієнтом трансформації $K_{тр} = w_2 / w_1 = 1$. Трансформатор працює на навантаження $R = 1 \text{ Ом}$.

11.7.3. При приєднанні первинної обмотки трансформатора w_1 до мережі з напругою 100 В з'явився струм $I = 0,1 \text{ А}$. Коефіцієнт трансформації $K_{тр} = 1$; $R_H = \infty$. Визначити h -параметри і Z -параметри.

11.7.4. При приєднанні первинної обмотки трансформатора w_1 до мережі з напругою 100 В з'явився струм $I = 0,1 \text{ А}$. Коефіцієнт трансформації $K_{тр} = 1$; $R_H = 10 \text{ Ом}$. Визначити h -параметри і Z -параметри.

11.7.5. Реальний трансформатор з потужністю $P = 1$ кВт; номінальною напругою первинної обмотки $U_{1H} = 100$ В; коефіцієнтом трансформації $K_{тр} = 0,1$ має ЕРС короткого замикання $E_{кз} =$. Визначити h-параметри і Z-параметри.

11.7.6. Трансформатор з двома обмотками має схему заміщення, що наведена на рис. 11.3. Параметри схеми наступні: $R_1 = 0,1$ Ом; $R_2' = 0,1$ Ом; $L_1 = L_2' = 10$ мкГн; $L_m = 5$ Гн. Визначити h-параметри і Z-параметри.

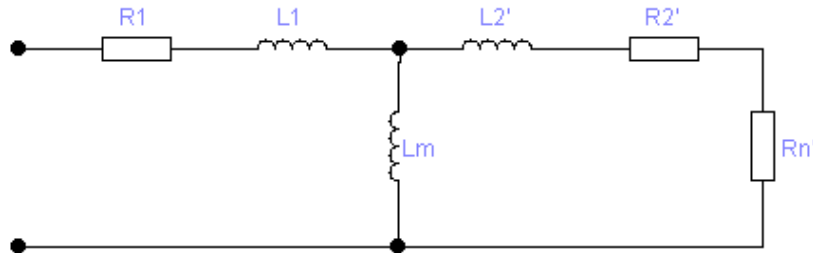


Рис. 11.3

11.8. Додатки

Додаток 1. Таблиця варіантів до дослідів щодо вивчення основних параметрів чотириполісників.

№ варіанта	Типи опорів		Тип схеми	$E_{Г}, В$	$f_{Г}, кГц$	$Z_{Г}, Ом$	$Z_{Н}, Ом$
	Z_1	Z_2					
1	R	C	Т	5	40	70	∞
2	C	R	П	10	50	80	∞
3	R	L	Т	15	60	90	∞
4	L	R	П	20	70	100	∞
5	C	R	Т	5	80	110	∞
6	R	C	П	10	90	120	∞
7	L	R	Т	15	100	130	∞
8	R	L	П	20	110	140	∞
9	R	C	Т	5	120	150	∞
10	C	R	П	10	130	160	∞
11	R	L	Т	15	140	170	∞
12	L	R	П	20	160	180	∞
13	C	R	Т	5	170	190	∞
14	R	C	П	10	180	200	∞
15	L	R	Т	15	190	210	∞

Додаток 2. Таблиця варіантів до схеми, наведеної на рис. 10.4.

Номер варіанту	$E_1, В$	$LE, Гн$	$R, Ом$	K_{TP}	$LM, Гн$	RP	RS
1	10	0,001	50	0,5	1	0,1	0,1
2	20	0,002	60	2	2	0,1	0,1
3	30	0,003	70	3	3	0,2	0,2
4	40	0,004	80	4	4	0,2	0,2
5	50	0,005	90	5	5	0,3	0,3
6	55	0,006	95	3	6	0,3	0,3
7	60	0,007	100	4	7	0,1	0,1
8	65	0,008	200	2	8	0,1	0,1
9	70	0,009	300	0,5	9	0,2	0,2
10	75	0,001	400	4	1,5	0,2	0,2
11	80	0,002	500	3	1,2	0,3	0,3
12	85	0,003	600	2	1,4	0,3	0,3
13	90	0,004	700	0,5	1,6	0,1	0,1
14	95	0,005	800	5	1,8	0,2	0,2
15	10	0,002	60	1,5	1	0,1	0,1

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ12

Дослідження частотних властивостей пасивних чотириполіусників

12.1. Мета роботи

Аналіз частотних властивостей пасивних чотириполіусників, виходячи з їх схеми та постійних часу.

12.2. Основні теоретичні положення

12.2.1. Електричні фільтри.

Частотні властивості двополіусників

Пасивні чотириполіусники, які будуються з метою забезпечення тих чи інших частотних властивостей вихідного сигналу, називаються **електричними фільтрами**. Смуга частот вхідного сигналу розділяється фільтром на діапазон із слабким затуханням, який називається **смугою пропускання фільтра**, і діапазон зі значним затуханням, який називається **смугою затухання фільтра**.

У зв'язку з тим, що чотириполіусники будуються на базі комплексних опорів, розглянемо частотні властивості останніх як комплексних двополіусників.

Основною характеристикою двополіусників є **комплексний опір**, частотні характеристики якого представляються у вигляді полінома:

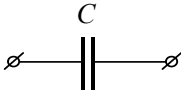
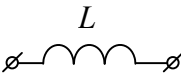
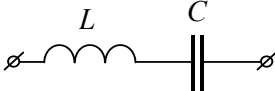
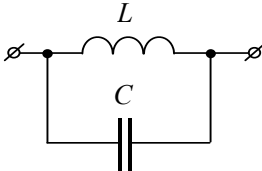
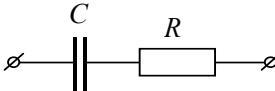
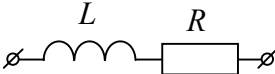
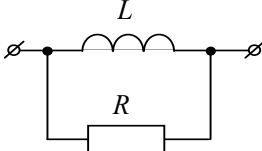
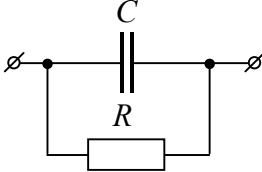
$$Z(j\omega) = \frac{N(j\omega)}{M(j\omega)} = \frac{a_n(j\omega)^n + a_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + a_0}{b_m(j\omega)^m + b_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + b_0}.$$

Для двополіусників, що піддаються фізичній реалізації, повинні забезпечуватись такі властивості полінома:

- усі коефіцієнти a і b повинні бути додатніми;
- різниця між поліномами $(m - n)$ не повинна перевищувати 1;
- нулі та полюси полінома повинні знаходитись у лівій площині на комплексній системі координат;
- нулі, що розміщені на уявній осі, не повинні бути кратними;
- дійсна частина комплексного опору повинна бути більшою за 0.

У Таблиці 12.1 приведені приклади найпростіших двополіусників і їх комплексні опори, зображені у вигляді простих поліномів.

Таблиця 12.1.

№ п/п	Зображення	$Z(j\omega)$
1.		$\frac{1/C}{j\omega}$
2.		$j\omega L$
3.		$\frac{j\omega \frac{1}{L}}{(j\omega)^2 + \frac{1}{LC}}$
4.		$\frac{j\omega \frac{1}{C}}{(j\omega)^2 + \frac{1}{LC}}$
5.		$\frac{j\omega + \frac{1}{RC}}{j\omega \frac{1}{R}} = \frac{R(1 + j\omega RC)}{j\omega RC}$
6.		$R + j\omega L = R \left(1 + j\omega \frac{L}{R} \right)$
7.		$\frac{j\omega R}{j\omega + \frac{L}{R}} = \frac{j\omega L}{1 + j\omega \frac{L}{R}}$
8.		$\frac{1/C}{j\omega + \frac{1}{RC}} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$

З Таблиці 12.1 витікає, що кожен двополюсник характеризується своєю частотною характеристикою.

На рис. 12.1 наведені частотні характеристики для опорів (рис. 12.1, *a*) і провідностей (рис. 12.1, *б*) двополюсників, що не мають активних опорів (поз. 1 – 4 у Таблиці 12.1).

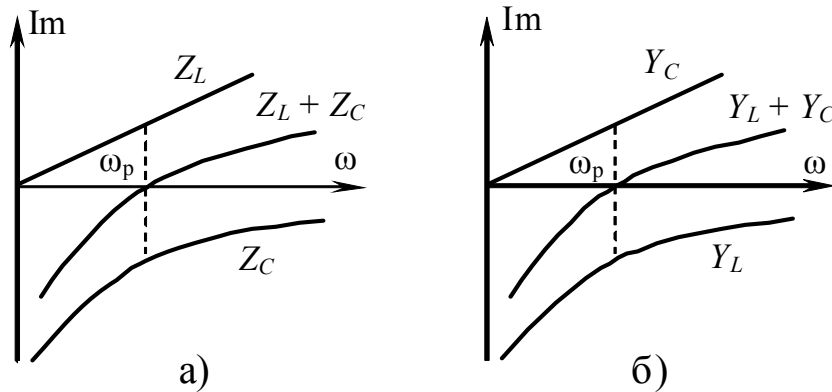


Рис. 12.1

З рис. 12.1, *a* витікає, що частотна характеристика послідовно з'єднаних елементів характеризується двома ділянками. Перша з них (діапазон $0 < \omega < \omega_p$) характеризується тим, що опір конденсатора набагато більший, ніж опір індуктивності, і результуючий опір носить ємнісний характер. Ця особливість може бути проаналізована лише за допомогою векторних діаграм. Дійсно, струм через індуктивність та ємність при їх послідовному з'єднанні однаковий, а напруги відповідно випереджають і відстають від нього на кут $\frac{\pi}{2}$, тобто направлені зустрічно. Результуюча напруга в указаному діапазоні частот матиме ємнісний характер.

При резонансі напруг $U_L = U_C$ двополюсник має нульовий опір.

У другому діапазоні частот ($\omega_p < \omega < \infty$) результуючий опір носить індуктивний характер.

Аналогічне пояснення, але вже для провідностей та струмів, можна зробити відносно паралельно з'єднаних L і C елементів (Таблиця 12.1, поз. 4).

Розглянемо частотні властивості двополюсників з активними опорами на прикладі послідовно з'єднаних R і C елементів:

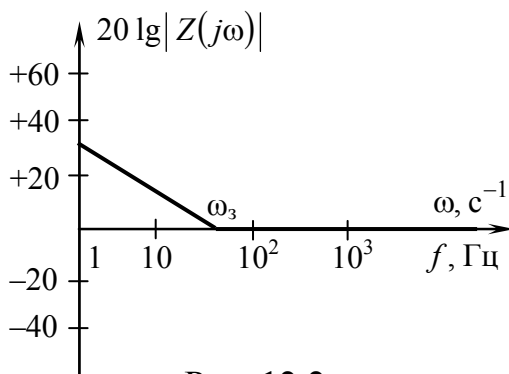


Рис. 12.2

$$Z(j\omega) = \frac{R(1 + j\omega RC)}{j\omega RC}$$

Перш ніж виконувати аналіз, необхідно нагадати, що електронні прилади працюють у широкому діапазоні частот – від десятків герц до сотень мегагерц. Наприклад, підсилювачі звукової частоти повинні забезпечу-

вати необхідні частотні характеристики у діапазоні від 20 Гц до 20 кГц. У такому частотному діапазоні більшу наочність дає логарифмічний частотний масштаб (рис. 12.2). Частотна вісь у такому масштабі стає нелінійною в цілому, але кожна декада повторюється через однакові проміжки часу. Інтервал між декадними значеннями на графіку представляється логарифмічною шкалою. На осі ординат відкладаються значення $20 \lg |Z(j\omega)|$, які вимірюються у децибелах.

Для комплексного опору, що розглядається, маємо:

$$20 \lg |Z(j\omega)| = 20 \lg \left| \frac{R(1 + j\omega RC)}{j\omega RC} \right|.$$

Побудова частотної залежності виконується у наступній послідовності.

Прийmemo, що ми маємо справу з електричним колом, у якому величина опору $R = 1$ Ом. Обираємо на частотній осі точку, що відповідає частоті $\omega_3 = (RC)^{-1}$. По відношенню до обраної точки, частотну вісь можемо розділити на два відрізки. На першому (при $\omega \gg \omega_3$) добуток $\omega RC \gg 1$, тому можемо прийняти, що:

$$1 + j\omega RC \approx j\omega RC; \quad \left| \frac{1 + j\omega RC}{j\omega RC} \right| \approx 1.$$

Це, в обраних нами координатах, відповідає прямій лінії на осі ω .

Для низькочастотного діапазону (при $\omega \ll \omega_3$) можемо прийняти, що:

$$1 + j\omega RC \approx 1; \quad \left| \frac{1 + j\omega RC}{j\omega RC} \right| \approx \frac{1}{\omega RC}.$$

У логарифмічному масштабі:

$$20 \lg \left| \frac{1}{\omega RC} \right| = 20 \lg 1 - 20 \lg \omega RC = -20 \lg \omega RC,$$

тобто при зростанні частоти ω у 10 разів величина опору зменшиться на 20 дБ. Реально маємо нахил частотної залежності величиною 20 дБ/дек.

Якщо тепер враховувати реальний опір як величину, збільшену по відношенню до 1 Ома в R разів, то відповідна частотна залежність піднімається по відношенню до наведеної на величину $20 \lg R$ дБ.

У точці $\omega_3 = (RC)^{-1}$ з'єднаємо дві проведені прямі. При цьому похибка, що матиме місце у точці $\omega_3 = (RC)^{-1}$, порівняно з точними розрахунками не перевищить 3 дБ.

Справедливість отриманої частотної залежності також можна підтвердити, виходячи з фізичних властивостей двополюсника.

Дійсно, починаючи з наднизьких частот, величина його опору визначатиметься конденсатором і, відповідно, зменшуватиметься з ростом частоти. Таке зменшення матиме місце до $\omega = \omega_3$. Починаючи з величини ω_3 , опір конденсатора визначатиметься лише величиною активного опору схеми заміщення, тому його зменшення не призводить до реального зменшення опору двополюсника.

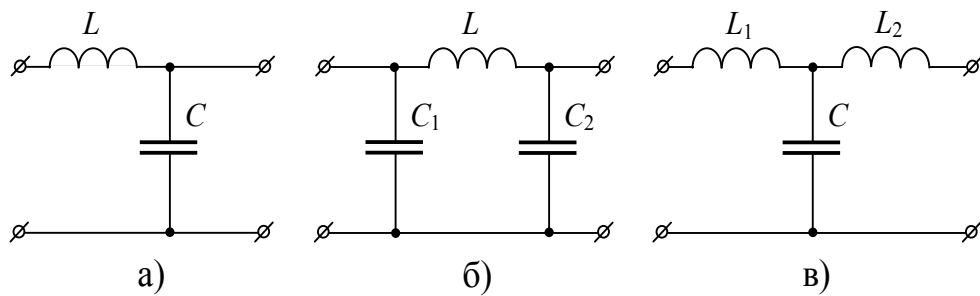


Рис. 12.3

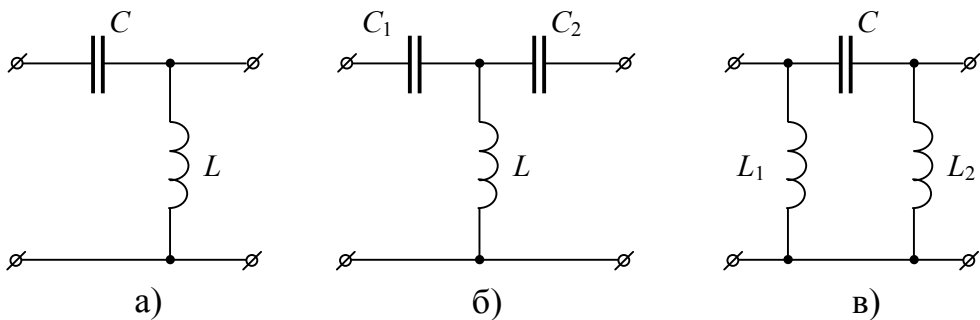


Рис. 12.4

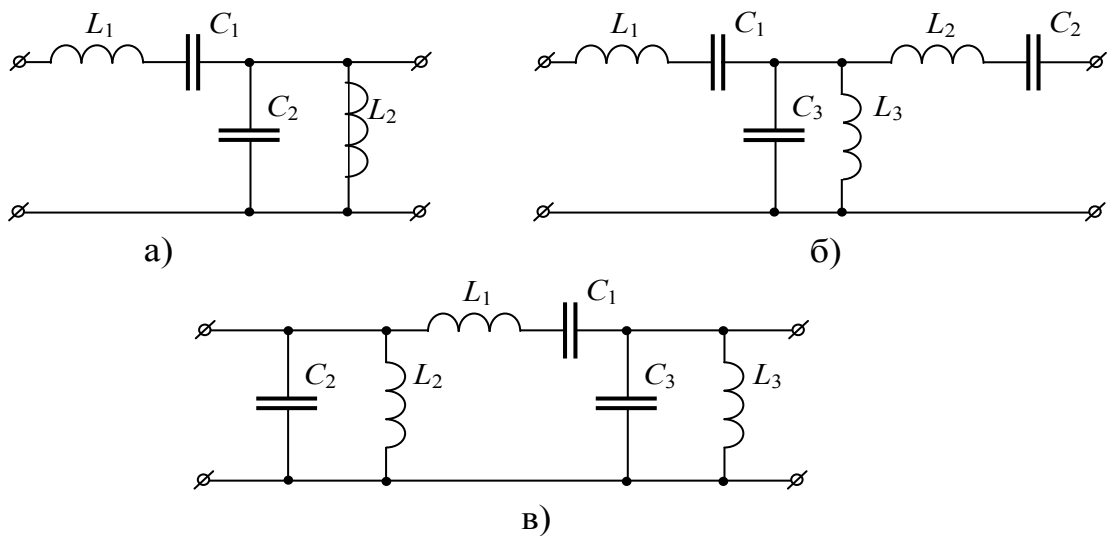


Рис. 12.5

На рис. 12.3 – рис. 12.5 наводяться схеми різних фільтрів.

Фільтри нижніх частот (рис. 12.3) характерні тим, що індуктивність, яка стоїть у подовжній ланці, на нижніх частотах має малий опір, а конденсатори, що встановлюються у поперечній ланці, – високий.

Фільтри верхніх частот (рис. 12.4), навпаки, у подовжній гілці мають конденсатор, який на верхніх частотах має низький опір, а індуктивність поперечної гілки на верхніх частотах має високий опір.

Смугові фільтри (рис. 12.5) у подовжній гілці мають послідовний резонансний контур, який на резонансній частоті має нульовий реактивний опір, а у поперечній – паралельний резонансний контур з нескінченно великим реактивним опором.

Загороджуючі фільтри (рис. 12.6) мають зворотнє включення резонансних кіл.

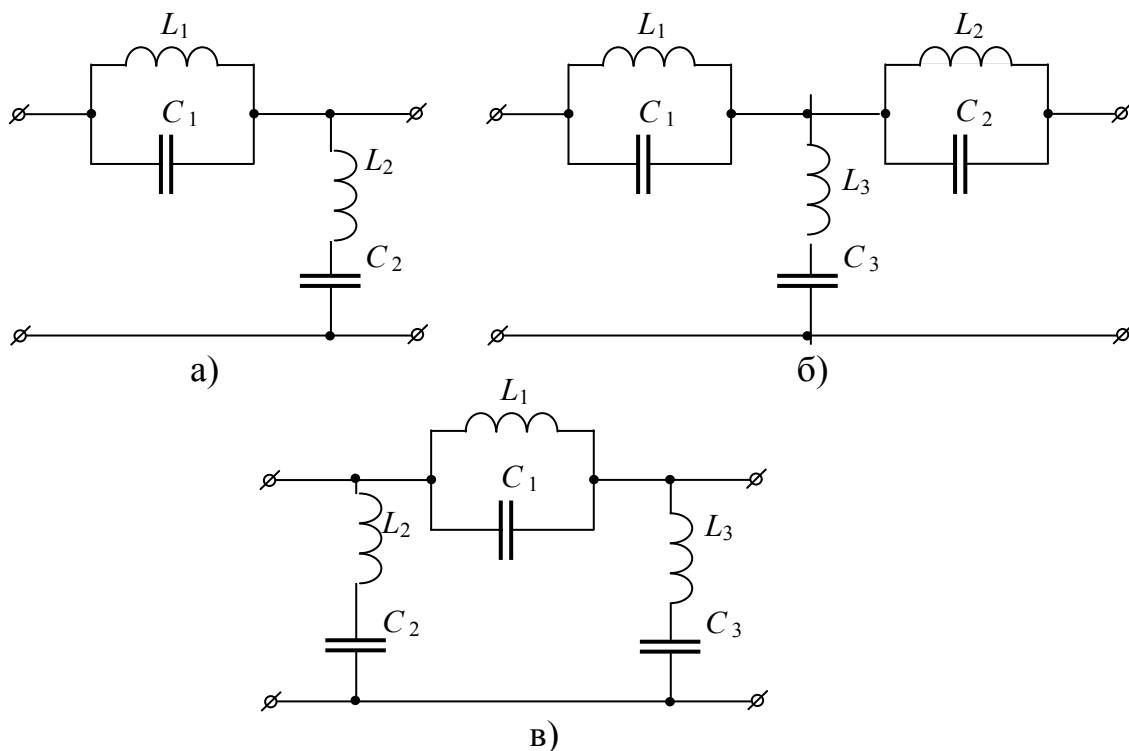


Рис. 12.6

Особливість наведених схем електричних фільтрів полягає у тому, що двополюсники подовжньої та поперечної гілок є взаємозворотними. Це означає, що добуток їх комплексних опорів в усьому частотному діапазоні дорівнює:

$$\frac{1}{2} Z_1 2 Z_2 = Z_1 Z_2 = K^2,$$

де K – дійсне число, є величиною постійною і не залежить від частоти. Такі фільтри називаються фільтрами типу K .

12.2.2. Безіндукційні фільтри

Безіндукційні фільтри використовуються при побудові фільтрів, які працюють на нижніх частотах. Для таких частот індуктивність є занадто громіздкою і замінюється активним опором. Тому такі схеми називаються **RC-фільтрами нижніх частот** (рис. 12.7).

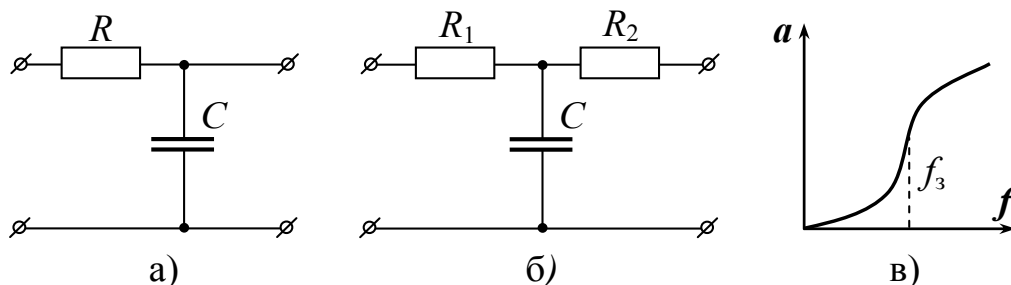


Рис. 12.7

Особливість таких фільтрів полягає у низькій крутизні затухання, а також у тому, що, на відміну від реактивних фільтрів, RC-фільтри не мають області частот, у межах яких власне затухання $a = 0$.

Частотні характеристики RC-фільтрів зручніше визначати у логарифмічному масштабі через комплексний коефіцієнт передачі.

12.2.3. Фільтри нижніх частот

Фільтр нижніх частот (low-pass filter) представляє собою електричний пристрій, що видаляє з сигналу середні та високі частоти. Його частотні характеристики мають високу наочність і простоту зображення при представленні їх у логарифмічному масштабі як по осі частот, так і по осі амплітуд.

Для використання логарифмічного масштабу по осі амплітуд спочатку знаходиться модуль і аргумент $K(j\omega)$:

$$|K(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 RC + 1}}; \quad (12.1)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \omega RC. \quad (12.2)$$

Потім розраховується логарифм модуля:

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20 \lg |K(\omega)| = 20 \lg 1 - 20 \lg \sqrt{\omega^2 (RC)^2 + 1} = \\ &= -20 \lg \sqrt{\omega^2 (RC)^2 + 1}, \end{aligned} \quad (12.3)$$

який обчислюється в децибелах (дБ).

При подальшому аналізі використовуються спрощуючі припущення, які полягають у наступному.

Позначивши в (12.1) $RC = \tau$, ми можемо на частотній осі поставити точку $\omega_\tau = \tau^{-1}$. Оскільки частотний діапазон достатньо широкий, то відносно частоти ω_τ умовно розбиваємо його на два піддіапазони – нижніх частот і верхніх частот.

Для піддіапазону нижніх частот оберемо такі, для яких $\omega \ll \omega_\tau$. Відповідно, тоді у формулі (12.3) $\omega^2 RC \ll 1$ і, як результат, $L(\omega) = 0$.

Для піддіапазону верхніх частот обираємо частоти, для яких $\omega \gg \omega_\tau$. Формула (12.3) при цьому набуде вигляд $L(\omega) \approx -20 \lg \omega RC$.

При $\omega RC = 10$ маємо $L(\omega) = -20$. Це означає, що при зростанні частоти ω відносно ω_τ у 10 разів (на одну декаду) амплітуда вихідної напруги зменшується на 20 дБ.

При $\omega RC = 2$ маємо $L(\omega) = -20 \lg 2 = 6$ дБ, і цей нахил еквівалентний нахилу -20 дБ/дек.

У подальшому користуватимемося декадною логарифмічною частотною шкалою координат.

На частоті $\omega = \omega_\tau$

$$L(\omega) = -20 \lg \sqrt{2} = -3 \text{ дБ.}$$

Це означає, що частотну характеристику (12.1) у логарифмічному масштабі можна представити з максимальною похибкою в 3 дБ двома прямими, одна з яких на нижніх частотах до ω_τ співпадає з частотною координатною віссю, а друга на верхніх частотах, починаючи з ω_τ , матиме нахил -20 дБ/дек (рис. 12.8).

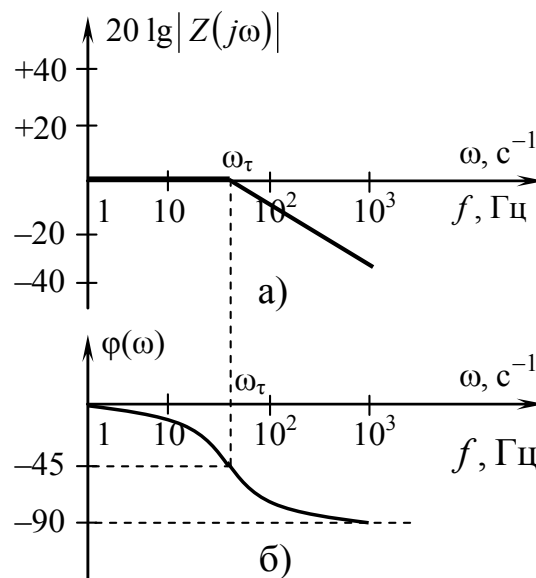


Рис. 12.8.

Логарифмічна фазочастотна характеристика $\varphi(\omega) = -\arctg\left(\frac{\omega}{\omega_\tau}\right)$ на тій

же частотній осі відображається кривою, що наведена на рис. 12.8, **б**, і з її вигляду витікає, що з ростом частоти фаза напруги на виході чотириполюсника має тенденцію зростати по відношенню до вхідної напруги і при $\omega \rightarrow \infty$ наближається до -90° .

У загальному плані частотна характеристика будь-якого чотириполюсника може бути представлена у вигляді:

$$K(j\omega) = \frac{\prod_{m=1}^M (1 + j\omega\tau_m)}{\prod_{n=1}^N (1 + j\omega\tau_n)}, \quad (12.4)$$

причому $n \geq m$.

Логарифмуючи (12.4), одержуємо:

$$\lg K(j\omega) = L(\omega) = 20 \left[\sum_{m=1}^M \lg |(1 + j\omega\tau_m)| - \sum_{n=1}^N \lg |(1 + j\omega\tau_n)| \right]. \quad (12.5)$$

Це надає можливість одержувати кусочно-лінійні апроксимації частотних характеристик практично будь-якої складності.

Вигляд частотної характеристики, представленої на рис. 12.8, **а**, має просту фізичну інтерпретацію. Вона полягає у тому, що на нижніх частотах опір конденсатора значно перевищує опір резистора, тому при протіканні струму практично вся вхідна напруга виділяється на конденсаторі. З ростом частоти опір конденсатора знижується – і, відповідно, зменшується величина напруги на ньому і на виході чотириполюсника.

12.2.4. Фільтр верхніх частот

Фільтр верхніх частот (high-pass filter) є електричним пристроєм, що передає без змін сигнали верхніх частот, а на нижніх частотах забезпечує затування сигналів і випередження їх за фазою відносно вхідних сигналів.

Розглянемо схему простого фільтра верхніх частот (рис. 12.9).

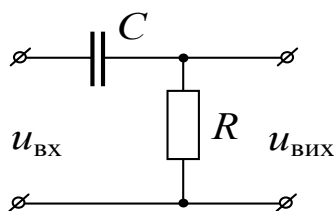


Рис. 12.9.

Комплексний коефіцієнт передачі:

$$K(j\omega) = \frac{U_{\text{ВІХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}.$$

Постійна часу: $\tau = RC$.

Для піддіапазону нижніх частот із зменшенням частоти отримаємо, що $j\omega RC$ зменшується, а $\frac{1}{j\omega RC}$ – збільшується. Знехтува-

вши одиницею, що стоїть у знаменнику, отримаємо $K(j\omega) = \omega RC$, тобто ККП прямо пропорційний частоті.

$L(j\omega) = 20 \lg(\omega RC)$ і, отже, якщо частота збільшиться у 10 разів (на 1 декаду), то логарифмічний коефіцієнт передачі збільшиться на 20 дБ.

Якщо важко побачити цю залежність одразу, то можна скористатися простим прикладом, який обчислюється явно.

Нехай:

$$RC = 1; \quad \omega_1 = 0,01; \quad \omega_2 = 10.$$

Тоді:

$$L_1 = 20 \lg 0,01 = -40; \quad L_2 = 20 \lg 0,1 = -20; \quad L_2 - L_1 = +20.$$

Тому для піддіапазону нижніх частот маємо пряму з кутовим коефіцієнтом $k = +20$ дБ/дек.

Для піддіапазону верхніх частот добуток ωRC буде досить великим і, відповідно, вираз $\frac{1}{j\omega RC}$ прямуватиме до нуля. Отже, доданком $\frac{1}{j\omega RC}$ у знаменнику можна знехтувати. Тоді:

$$K(j\omega) = 1 \quad (U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}); \quad L(j\omega) = 0 \text{ дБ}.$$

Отже, на верхніх частотах отримуємо пряму $L(j\omega) = 0$ дБ. Це говорить про те, що на верхніх частотах сигнали передаватимуться без змін.

12.2.5. Смуговий пасивний фільтр

Схема смугового фільтра наведена на рис. 12.10. Послідовно з'єднуючи фільтри верхніх та нижніх частот, отримують **смуговий фільтр** (у схемотехніці він має назву **напівмоста Віна**). Його вихідна напруга дорівнює нулю на верхніх та нижніх частотах.

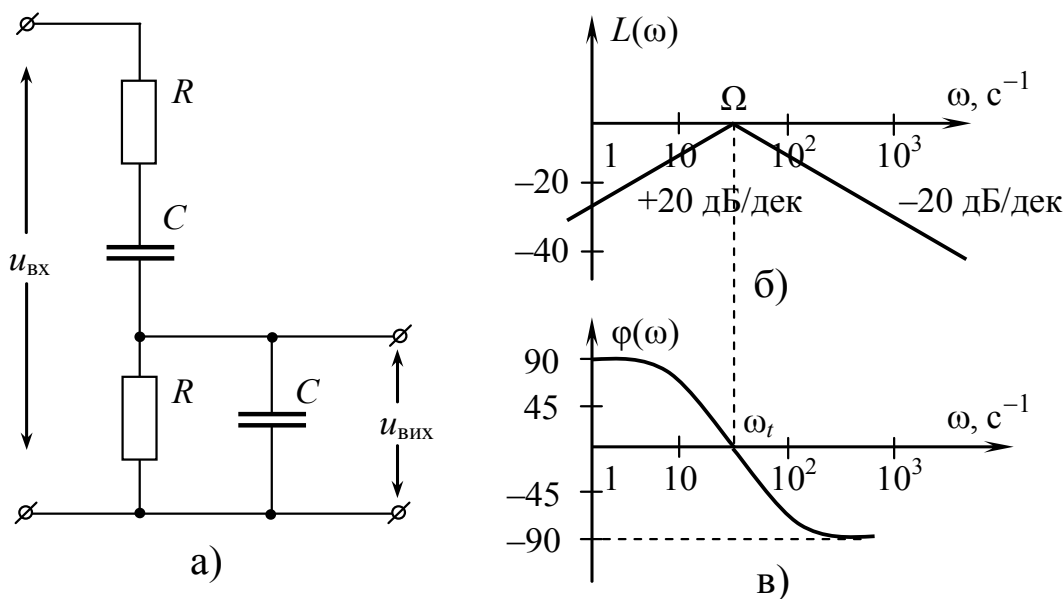


Рис. 12.10.

Як витікає з рис. 12.10, *a*, частотно-залежний чотириполюсник побудований на основі двох R - C двополюсників як дільник напруги, а частотні властивості кожного з них були розглянуті вище. Обидва двополюсники мають постійну часу RC , а це означає, що злам частотних характеристик кожного з них відбувається на одній частоті: $\Omega = (RC)^{-1}$.

Знову розглянемо піддіапазони верхніх та нижніх частот. Для піддіапазону нижніх частот матимемо великий опір конденсатора, оскільки $X_C = 1/\omega C$. Тоді першим резистором (верхній на схемі) можна знехтувати, оскільки його опір набагато менше опору послідовно з'єданого з ним конденсатора. Також можна знехтувати іншим конденсатором (праворуч на схемі), бо його опір великий, а опір паралельно з'єданого з ним резистора малий. Отже, струм піде через резистор. Отримаємо таку схему (це, як бачите, фільтр верхніх частот): для піддіапазону верхніх частот матимемо малий опір конденсатора (набагато менший за опір резистора), тоді першим конденсатором (зліва на схемі) і нижнім резистором (нижній на схемі) можна знехтувати, в результаті чого одержується фільтр нижніх частот.

Таким чином, для піддіапазону нижніх частот АЧХ пасивного смугового RC -фільтра матиме такий самий вигляд, як і АЧХ фільтра верхніх частот для того ж піддіапазону.

Аналогічно, для піддіапазону верхніх частот АЧХ пасивного смугового RC -фільтра матиме такий само вигляд, як і АЧХ фільтра нижніх частот для того ж піддіапазону.

Отже, на піддіапазоні нижніх частот пасивний смуговий RC -фільтр працює як фільтр верхніх частот, а на піддіапазоні верхніх частот – як фільтр нижніх частот.

Комплексний коефіцієнт передачі може бути обчислений за допомогою формули для ненавантаженого дільника напруги (більш детальну інформацію можна знайти у спеціалізованій літературі).

$$K(j\omega) = U_{вих} / U_{вх} = \frac{1 / [(1/R) + j\omega C]}{[1 / (1/R) + j\omega C] + R + (1 / j\omega C)}$$

$$K(j\omega) = U_{вих} / U_{вх} = \frac{j\omega RC}{(j\omega RC + 1)^2 + j\omega RC}$$

Підставивши $\omega RC = \Omega$, отримаємо:

$$K(j\Omega) = U_{вих} / U_{вх} = j\Omega / (1 + 3j\Omega - \Omega^2).$$

Отже, нами отримано функціональну залежність, графік якої треба побудувати. Вихідна напруга набуває максимального значення при $\Omega = 1$. Далі можна зробити повне дослідження функції (знайти проміжки спадання та зростання, екстремуми функції та ін.) за допомогою математичного апарату і побудувати її графік.

Якщо розглянутий смуговий фільтр доповнити паралельною гілкою опорів (рис. 12.11, *a*), то одержана схема набуває дещо інших властивостей і нази-

вається **мостом Віна-Робінсона**. Опори R_1 паралельної ланки дають коефіцієнт передачі $1/3$, тому на частоті Ω коефіцієнт передачі моста наблизатиметься до нуля. Амплітудна і фазова характеристики матимуть вигляд, наведений на рис. 12.11, б, в. Схема використовується для приглушення сигналів у заданому частотному діапазоні.

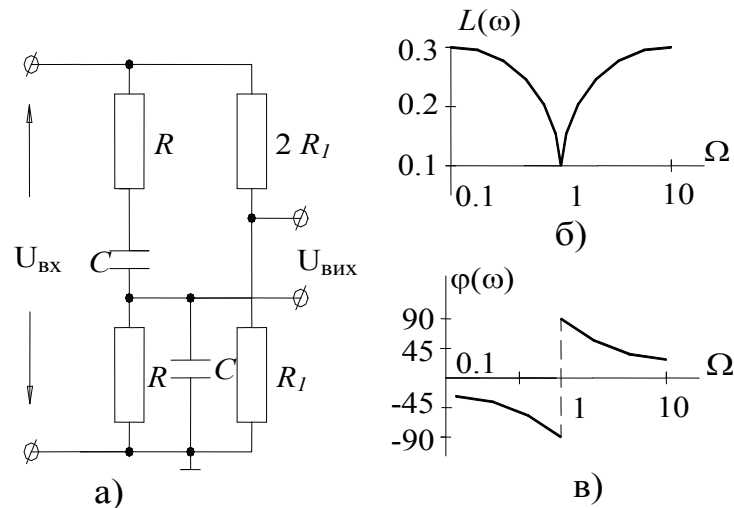


Рис. 12.11.

12.3. Використання віртуальної лабораторії *Multisim* для виконання роботи

Для дослідження частотних властивостей пасивних або активних чотириполюсників у віртуальній лабораторії **Multisim** передбачено декілька різних способів. У будь-якому випадку необхідно, щоб досліджувана схема була підготовлена і до її входу було приєднане джерело змінної напруги, а загальна шина заземлена.

12.3.1. Безпосередній аналіз АЧХ та ФЧХ

Безпосередній аналіз АЧХ та ФЧХ полягає у тому, що до виходу чотириполюсника приєднується осцилограф або інший вимірювальний прилад і задається ряд частот вхідного сигналу. Для кожної частоти записується діюче або амплітудне значення напруги на вході і, відповідно, на виході чотириполюсника. Після цього для кожної з частот обчислюються модуль і фаза комплексного коефіцієнта передачі, які потім використовуються для побудови логарифмічних амплітудно-частотної й фазочастотної характеристик (ЛАЧХ та ЛФЧХ). Усі обчислення можна виконати, наприклад, у пакеті *Excel*.

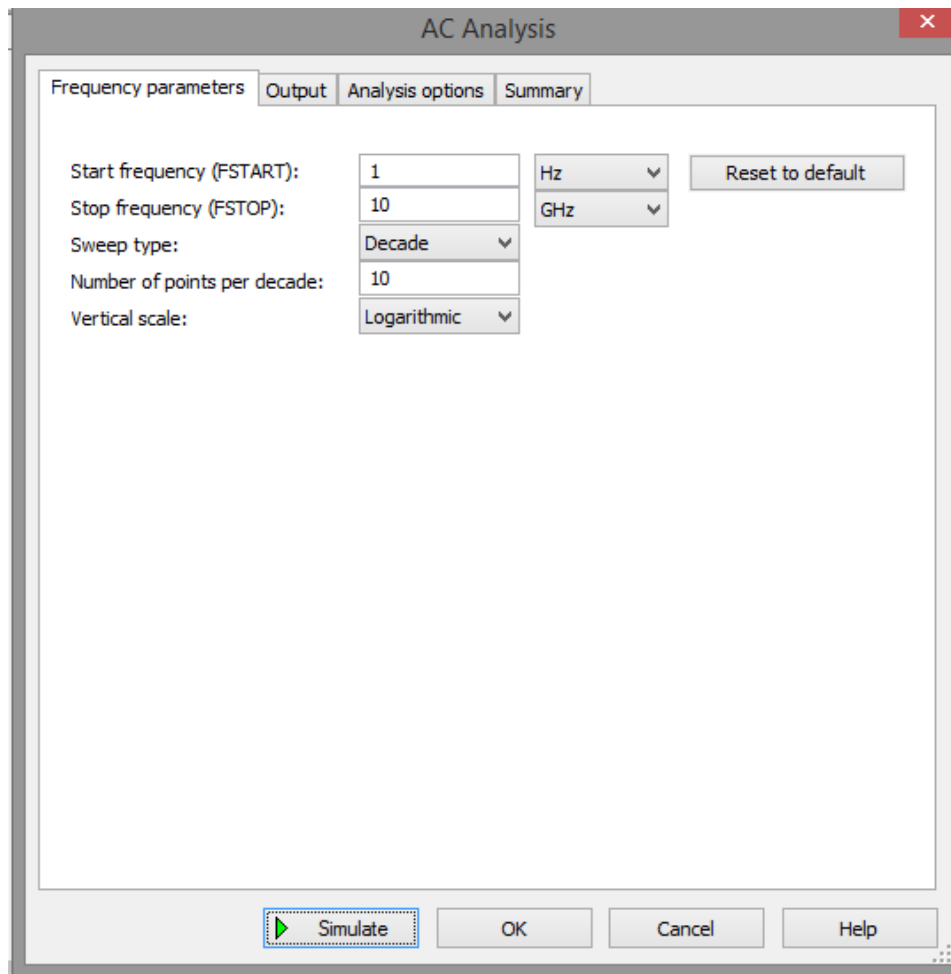


Рис. 12.12

12.3.2. Використання підпрограми частотного аналізу

Спосіб полягає у використанні обчислень за допомогою підпрограм, які вмонтовані у пакет **Multisim**.

Послідовність обчислення та побудови ЛАЧХ і ЛФЧХ така. У меню *Simulate* → *Analyses* обирається опція *AC Analysis*. Результатом вибору є поява вікна *AC Analysis* з наступними установками:

Frequency parameters (рис. 12.12):

Start frequency – початкова частота ЛАЧХ і ЛФЧХ;

End frequency – кінцева частота проведення аналізу;

Sweep type – тип горизонтальної шкали (шкали частот);

Number of points – кількість точок дослідження в обраному частотному діапазоні;

Vertical scale – масштаб вертикальної шкали (лінійний, логарифмічний).

Output (рис. 12.13):

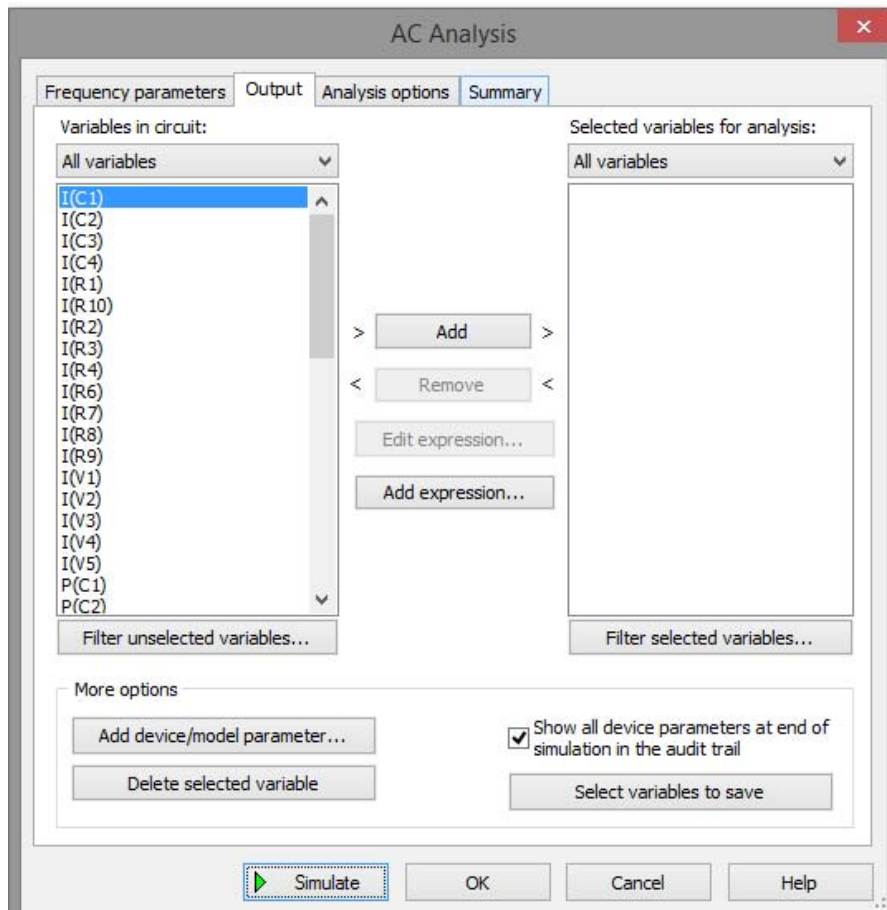


Рис. 12.13

Обов'язковими установками при частотному аналізі є вибір елементів схеми, відносно яких проводяться дослідження. Тому елементи, струми або напруги на яких необхідно аналізувати, обираються у вікні ***Selected variable for analysis*** за допомогою кнопки ***Add***. Після виконаних установок натискається кнопка ***Simulate*** і з'являється вікно ***Grapher View*** з графіками ЛАЧХ та ЛФЧХ (рис. 12.14). Відповідні опції, що розміщені у вікні ***Grapher View***, дозволяють змінювати вигляд графіків, змінювати масштаби, встановлювати курсори тощо.

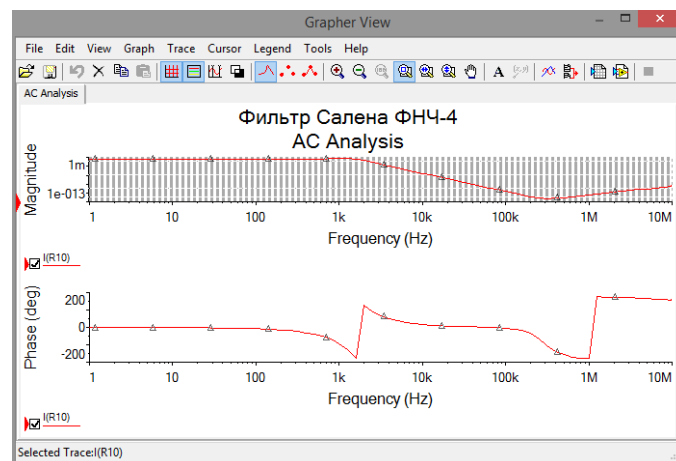


Рис. 12.14

12.3.3. Використання віртуального аналізатора АЧХ

Цей спосіб полягає у використанні приладу, що називається *Bode plotter*. Його використання було розглянуто у попередніх роботах.

Вибір того чи іншого способу визначення амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик визначається викладачем в залежності від рівня підготовки студентів, або в залежності від вимог до вивчення розділу, що розглядається.

12.3.4. Вивчення частотних властивостей чотириполюсників на основі блоку передаточної функції

Multisim має ряд чотириполюсників, які можна знайти в опції *Control Function Blocks*, у тому числі: інтегратор (*Voltage Integrator*), диференціатор (*Voltage Differentiator*) та блок передаточної функції (*Transfer Function Block*) (рис. 12.15).

Дуже часто різні за структурою електричні кола мають однакові передаточні функції. Наприклад, схеми, які наведені на рис. 12.16, мають таку передаточну характеристику:

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{T p}{T p + 1},$$

де для кола на рис. 12.16, *а*: $T = L / r$,

а для кола на рис. 12.16, *б*: $T = r C$.

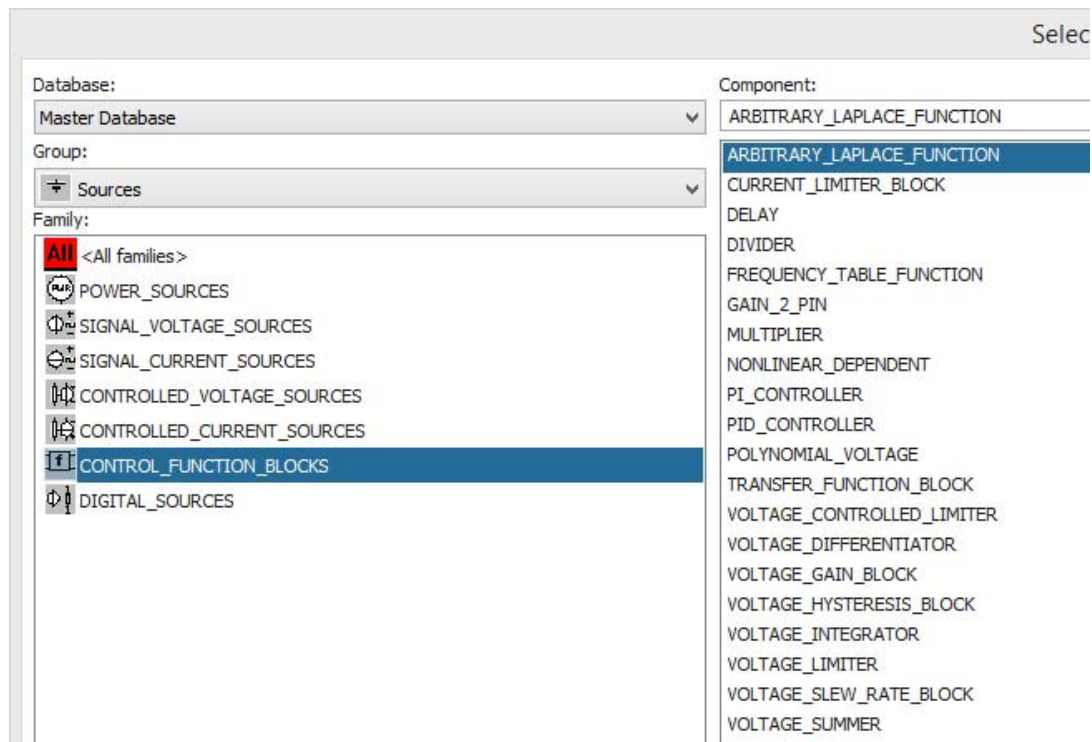


Рис. 12.15

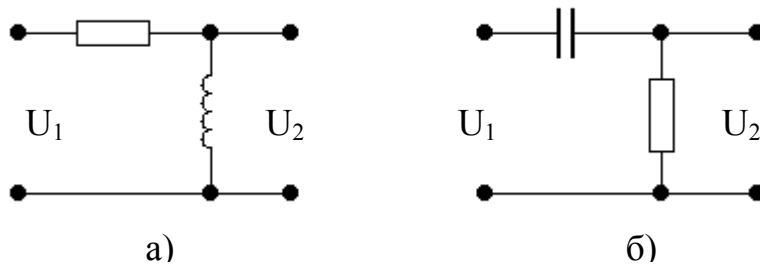


Рис. 12.16

Якщо у формулі передаточної функції замінити $p = j\omega$, отримаємо комплексний коефіцієнт передачі:

$$K(j\omega) = \frac{U_{вых}(j\omega)}{U_{вх}(j\omega)}$$

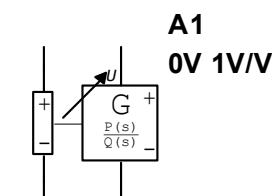


Рис. 12.17

Існуючий у пакеті **Multisim** блок передаточних функцій (рис. 12.17) дозволяє формувати передаточні характеристики чотирьохполюсника відповідно до виразу:

$$K(p) = K(p) = \frac{p^3 A_3 + p^2 A_2 + p A_1 + A_0}{p^3 B_3 + p^2 B_2 + p B_1 + B_0},$$

де p – оператор Лапласа.

При подвійному натисненні лівої кнопки миші на блоку передаточної функції з'являється вікно **Transfer Function Block** (рис. 12.18).

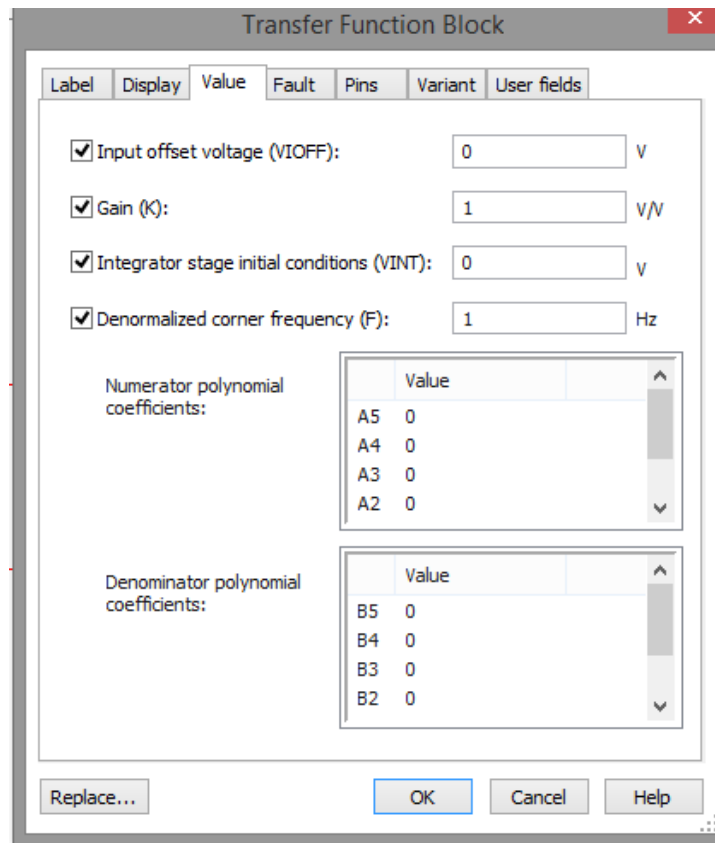


Рис. 12.18

Після цього необхідно натиснути кнопку **Edit** з метою появи вікна **Transformer Function Block Model "Ideal"**. У вікні вибору параметрів блоку передаточної функції можна встановити відповідні до варіанта значення:

Input offset voltage (VIOFF) – зсув напруги на вході;

Gain (K) – коефіцієнт підсилення;

Integrator stage initial conditions (VINT) – установка початкових умов у режимі інтегратора;

Denormalized corner frequency (W) – частота зрізу;

Numerator 3rd order coefficient (A3) – коефіцієнт полінома 3-го порядку (чисельник);

Numerator 2nd order coefficient (A2) – коефіцієнт полінома 2-го порядку (чисельник);

Numerator 1st order coefficient (A1) – коефіцієнт полінома 1-го порядку (чисельник);

Numerator constant (A0) – постійний коефіцієнт чисельника;

Denominator 3rd order coefficient (B3) – коефіцієнт полінома 3-го порядку (знаменник);

Denominator 2nd order coefficient (B2) – коефіцієнт полінома 2-го порядку (знаменник);

Denominator 1st order coefficient (B1) – коефіцієнт полінома 1-го порядку (знаменник);

Denominator constant (B0) – постійний коефіцієнт знаменника.

12.4. Порядок виконання роботи

12.4.1. Дослідити частотні характеристики інтегратора напруги. Обрати інтегруючий блок (рис. 12.19, *а*) і скласти схему за рис. 12.19, *в*. Включити схему і зняти АЧХ і ФЧХ блоку. Вигляд АЧХ наведено на рис. 12.20.

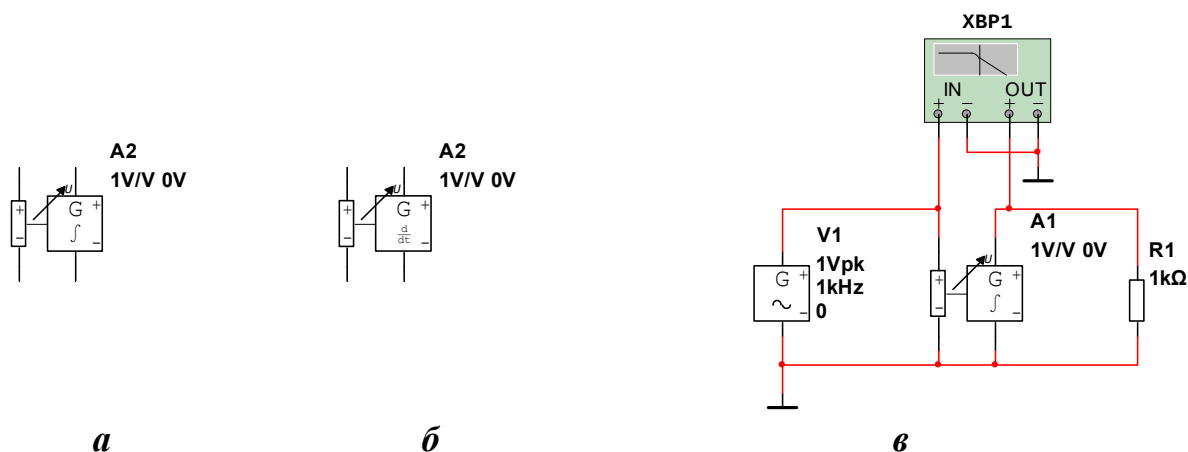


Рис. 12.19

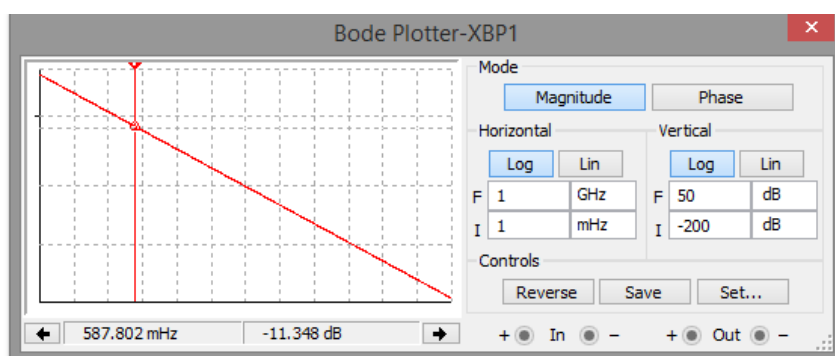
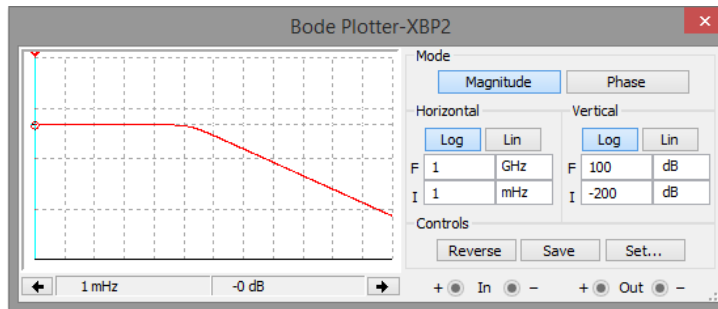


Рис. 12.20

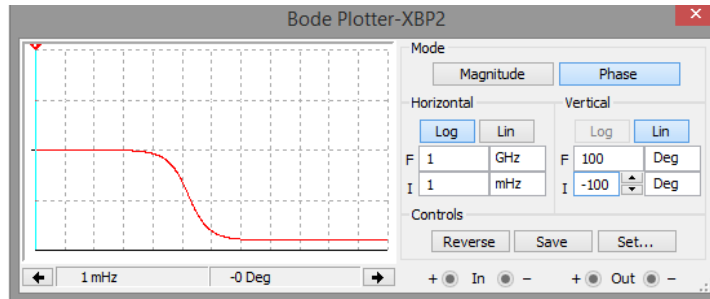
Налаштувати параметри вертикальної та горизонтальної шкали і визначити чисельне значення затухання. Для цього для двох-трьох значень частот, що відрізняються на одну – дві декади, заміряти величини коефіцієнта затухання сигналу в інтеграторі. Провести аналогічний дослід з фазовою характеристикою.

12.4.2. Провести аналогічний дослід з диференціатором (рис. 12.19, *б*). Порівняти отримані результати і зробити відповідні висновки.

12.4.3. Дослідити фільтр нижніх частот. Приготувати схему фільтра нижніх частот на основі R - C або R - L елементів залежно від варіанта. Типи пасивних чотириполосників наведені у Додатку 3. Параметри R і $C(L)$ обрати з таблиці завдань (Додаток 2). Ще раз нагадуємо, що для проведення дослідів вхід чотириполосника повинен бути приєднаним до джерела змінної напруги, а загальна шина заземлена. Результати обчислення АЧХ і ФЧХ повинні бути зображені у логарифмічному масштабі, як зображено на рис. 12.21.



a



б

Рис. 12.21

За результатами проведення дослідів обчислити частоту зрізу частотної характеристики і постійну часу фільтра. Результати обчислень порівняти з постійною часу, обчисленою за установленими даними компонентів.

Змінити постійну часу на порядок убік збільшення та убік зменшення частоти зрізу. Виконати обчислення, аналогічні п. 2, і порівняти результати обчислень.

12.4.4. Провести дослідів, аналогічні п.п. 2, 3, для фільтра верхніх частот і виконати відповідні обчислення.

12.4.5. Провести дослідів, аналогічні п.п. 2, 3, для R - C смугового фільтра і виконати відповідні обчислення (Додаток 3, варіант 9).

12.4.6. Провести дослідів з визначення АЧХ і ФЧХ для кіл із L - C елементами, що забезпечують резонанс напруг і резонанс струмів. Обчислити резонансну частоту за параметрами, які задані відповідно до варіанта роботи, що виконується, і за результатами експериментальних досліджень. (Радимо для проведення цього дослідів встановити лінійний масштаб осі частот).

12.4.7. Дослідити характеристики блоку передаточної функції у режимі диференціатора.

Скласти схему відповідно до рис. 12.19, **в**. Задати коефіцієнти поліномів, маючи на увазі, що передаточна характеристика реального диференціатора:

$$K(p) = \frac{T_1 p}{T_2 p + 1}.$$

Зняти АЧХ і ФЧХ блоку. Прийняти $T_1 = 0,01$ с. Розглянути відношення ($T_2 > T_1$; $T_2 < T_1$).

12.4.8. Дослідити характеристики блоку передаточної функції в режимі інтегратора.

Скласти схему відповідно до рис. 12.19, **в**. Задати коефіцієнти поліномів згідно варіанту, маючи на увазі, що передаточна характеристика інтегратора:

$$K(p) = \frac{1}{T_1 p + 1}.$$

Зняти АЧХ і ФЧХ блоку.

12.4.9. Дослідити характеристики блоку передаточної функції як резонансної ланки.

Скласти схему відповідно до рис. 12.19, **в**. Задати коефіцієнти поліномів згідно варіанту, маючи на увазі, що передаточна характеристика резонансної ланки:

$$K(p) = \frac{T_1 p}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1}.$$

12.4.10. Повторити досліди за попереднім пунктом, але задати $T_1 = T_2$, а T_3 зменшити до нуля.

12.4.11. Порівняти отримані результати з результатами досліджень інтегратора і диференціатора, що були проведені за п. 7.2.3.

12.4.12. Визначити електричне коло, яке описується передаточною функцією другого порядку.

12.5. Задачі до атестації

12.5.1. Як, використовуючи блок передаточної функції у пакеті Multisim, отримати чотириполюсники, комплексні коефіцієнти передачі яких мають вигляд:

$$\dot{K}_1(j\omega) = \frac{1}{T_1 T_2 \cdot (j\omega)^2 + (T_1 + T_2) \cdot j\omega + 1};$$

$$\dot{K}_2(j\omega) = \frac{T_1 \cdot j\omega}{T_2^2 \cdot (j\omega)^2 + 1};$$

$$\dot{K}_3(j\omega) = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{1}{T \cdot (j\omega) + 1}.$$

12.5.2. Навести схеми чотириполюсників, які реалізують наступні передаточні функції:

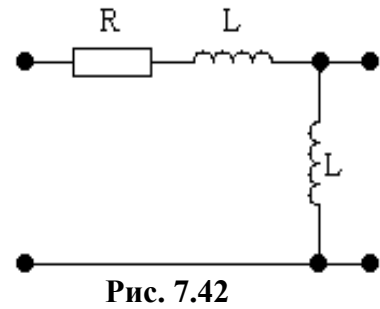
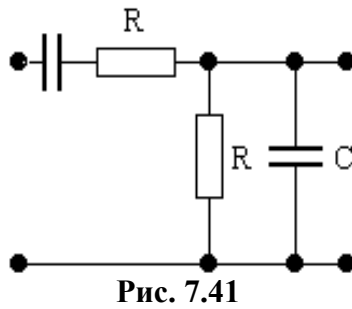
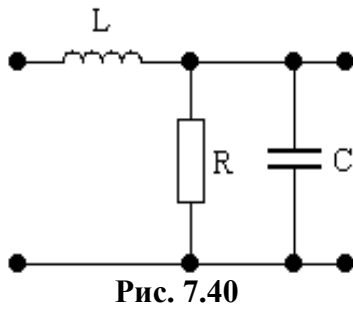
$$K_1(p) = \frac{1}{T_1 p + 1};$$

$$K_2(p) = \frac{T_1 p}{T_1 p + 1};$$

$$K_3(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)}.$$

12.5.3. Зобразити та обґрунтувати вигляд частотних характеристик пасивних чотириполюсників, що зображені у таблиці (Додаток 7.5.2).

12.5.4. Зобразити та обґрунтувати вигляд частотних характеристик пасивних чотириполіусників, що зображені на рис. 7.40 – рис. 7.42.

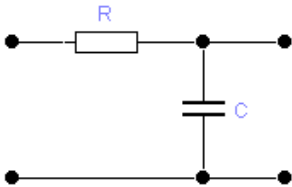
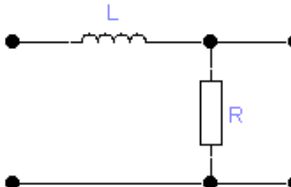
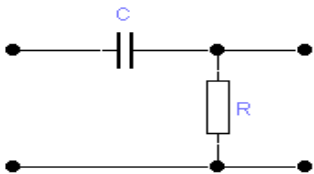
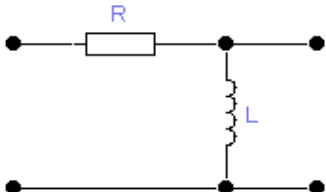
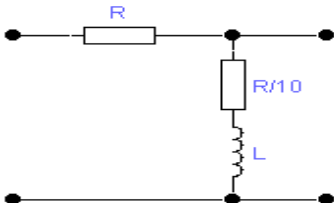
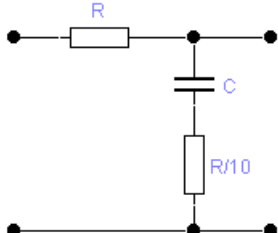
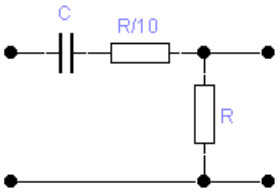
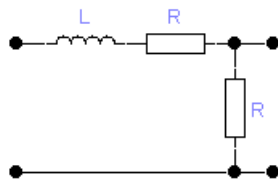
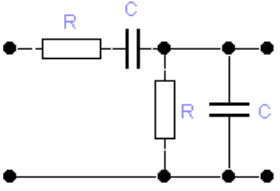
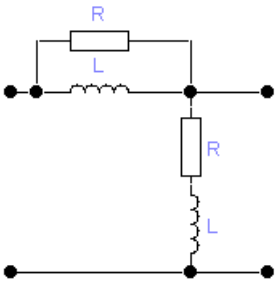
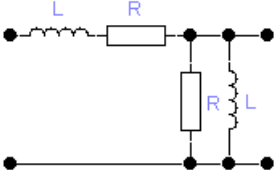
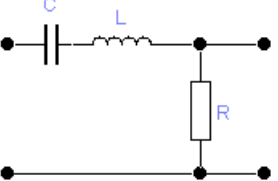


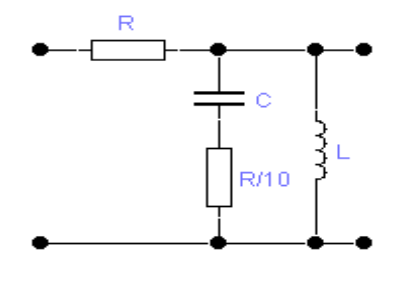
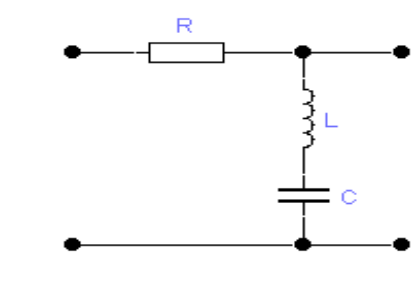
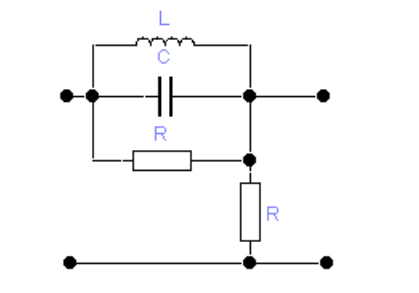
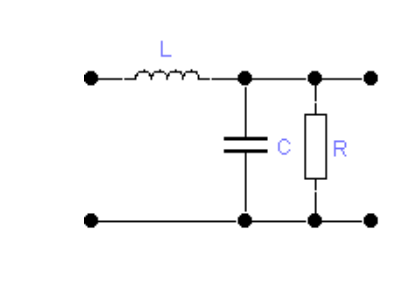
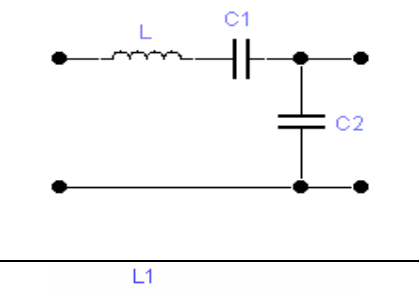
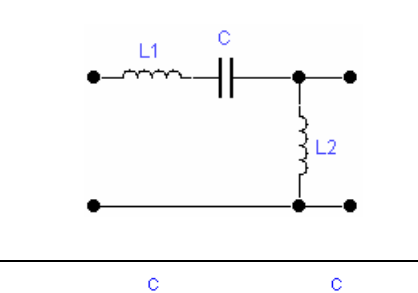
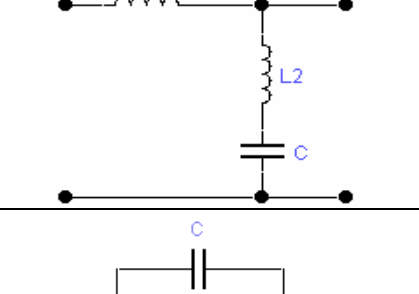
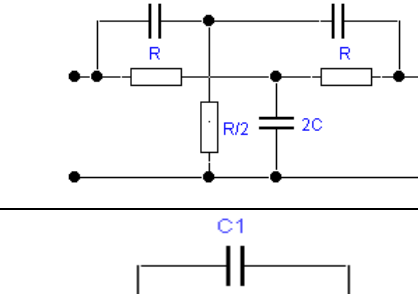
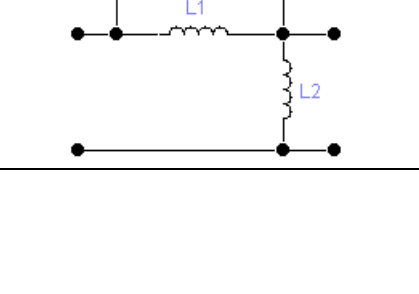
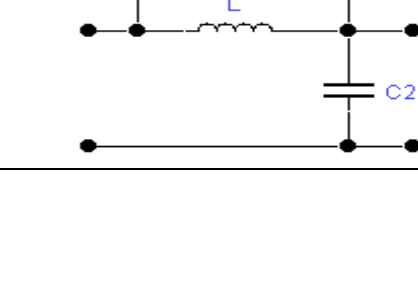
Додатки

Додаток 1. Таблиця варіантів для проведення дослідів із вивчення частотних характеристик чотириполіусників.

№ варіанта	R-L	R-C	R, Ом	C, мкФ	L, мГн
1	+		500	1	29
2		+	600	2	45
3	+		700	3	24
4		+	800	4	78
5	+		900	5	25
6		+	1000	6	35
7	+		2000	7	49
8		+	3000	8	82
9	+		4000	9	47
10		+	5000	10	19
11	+		6000	11	84
12		+	7000	12	46
13	+		8000	13	28
14		+	9000	14	67
15	+		1000	15	70

Додаток 2. Типи пасивних чотириполіусників.

Номер варіанту	Схема пасивного чотириполіусника	Номер варіанту	Схема пасивного чотириполіусника
1		2	
3		4	
5		6	
7		8	
9		10	
11		12	

13		14	
15		16	
17		18	
19		20	
21		22	

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ13

Дослідження електричних параметрів симетричних трифазних кіл

13.1. Мета роботи

Аналіз властивостей та взаємозв'язків між струмами і напругами у симетричних трифазних електричних колах. Ознайомлення з методами вимірювання параметрів трифазної системи і побудова векторних діаграм.

13.2. Основні теоретичні положення

Трифазним струмом називається сукупність трьох однофазних змінних струмів однакової частоти і зсунутих відносно один одного на $1/3$ періоду (120°). Якщо у трифазній системі діють електрорушійні сили, рівні за величиною і зсунуті за фазою на 120° , а повні опори всіх трьох фаз як за величиною, так і за характером однакові, то такий режим називається **симетричним**.

В електричних колах трифазного струму обмотки генератора і споживачі електричної енергії можуть з'єднуватися зіркою або трикутником.

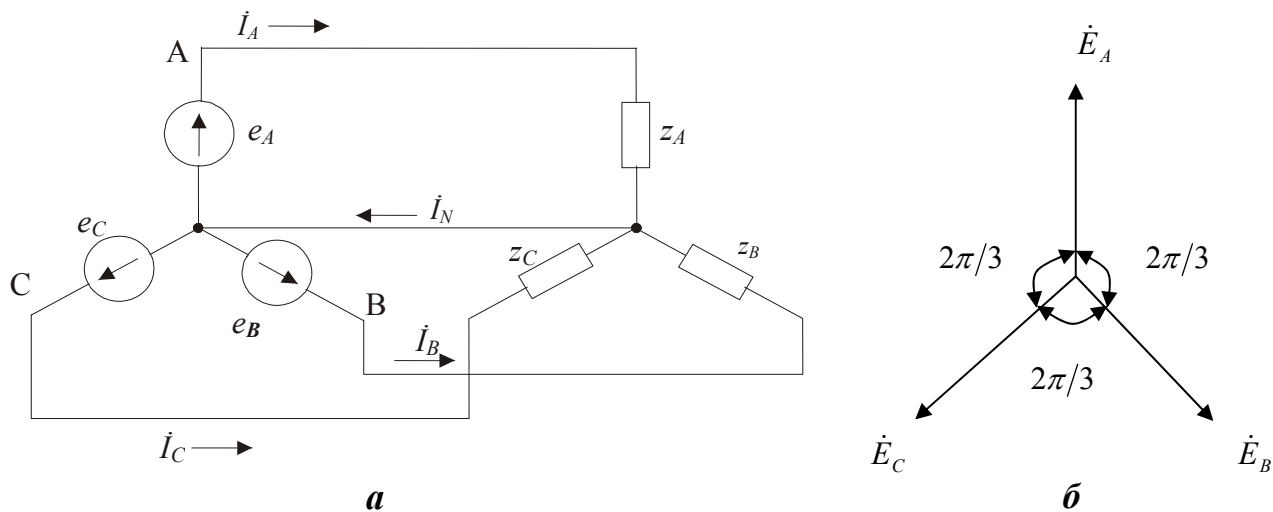


Рис. 13.1

Перший спосіб з'єднання – зірка (рис. 13.1, *а*) – характеризується тим, що споживачі з'єднуються кінцями фазних обмоток в одну загальну точку. Загальні точки називають нульовими точками, а з'єднуючий їх провідник називають нейтральним. Така форма електрозабезпечення називається чотирипровідною. Кожен споживач фактично живиться від свого джерела, яке називається фазним, а відповідні провідники живлення називаються фазами. За такою схемою забезпечується живлення однофазних споживачів – наприклад, освітлювальні прилади, житлові будинки та квартири, ряд нагрівальних приладів тощо. При такій формі з'єднання у будь-який момент часу:

$$\sum_{i=1}^3 e_i = e_A + e_B + e_C = 0. \quad (13.1)$$

Тому при симетричному навантаженні, тобто при $Z_A = Z_B = Z_C$, для струмів, що протікають по фазних провідниках $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ і які також називаються фазними, також виконуватиметься умова:

$$\sum_{i=1}^3 i_i = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (13.2)$$

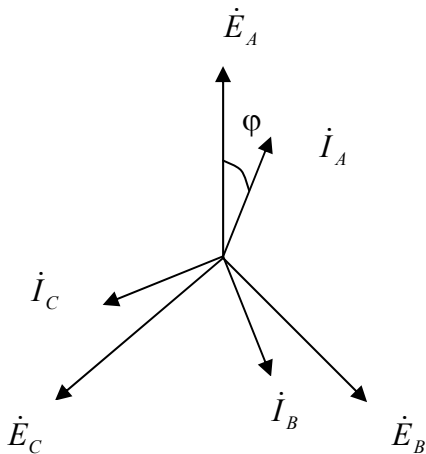


Рис. 13.2

З формули (13.2) витікає, що при симетричному навантаженні струм через нейтральний провід не протікає ($\dot{I}_N = 0$), а отже, нейтральний провід стає зайвим, і його можна не застосовувати. Це буде трипровідна трифазна система. Для трипровідної системи завжди виконуються співвідношення $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ незалежно від величини і характеру споживачів.

За умови, що опори провідників значно менші опорів фаз навантаження Z , можна вважати, що $E_\phi = U_\phi$.

Напруга між лінійними проводами та струми в них називаються лінійними напругами і струмами. При з'єднанні зіркою $I_l = I_\phi$, а з трикутника векторів (рис. 13.2) маємо: $U_l = \sqrt{3} U_\phi$. Комплексні значення фазних струмів можуть бути обчислені за формулами:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C}.$$

Другий спосіб з'єднання споживачів – трикутник (рис. 13.3). Такий спосіб

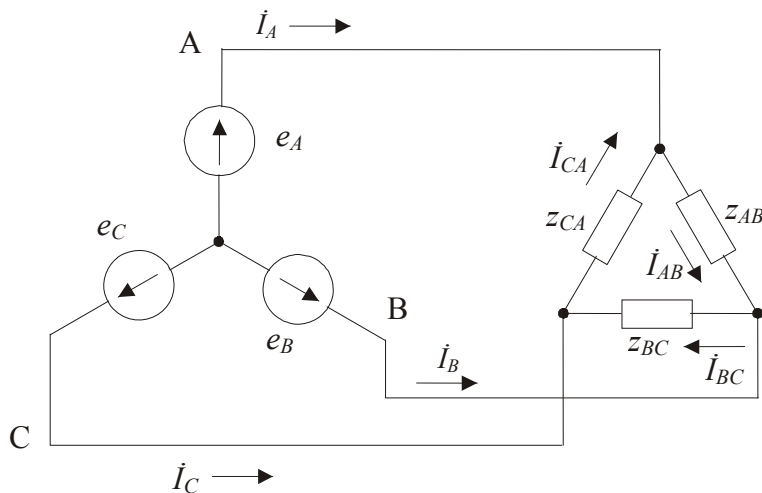


Рис. 13.3

виключає використання нейтрального провідника, тому схема живлення називається трифазною трипровідною. У таку схему живлення можна включати лише симетричні споживачі – наприклад, електричні двигуни. При такій схемі з'єднання споживачів енергії, опори Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} вмикаються між двома лінійними провідниками.

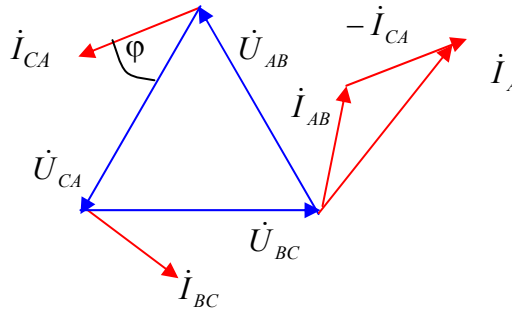


Рис. 13.4

Тому фазні напруги споживачів, тобто напруги на опорах, дорівнюють лінійним напругам трифазного джерела, що відображається векторною діаграмою, наведеною на рис. 13.4.

Струми у фазах споживача обчислюються за законом Ома:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

Лінійні струми визначаються за першим законом Кірхгофа як різниця фазних струмів:

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

З векторних діаграм та з формул витікає, що при симетричній системі ЕРС і симетричному навантаженні між лінійними і фазними струмами буде справедливим співвідношення:

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi.$$

13.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

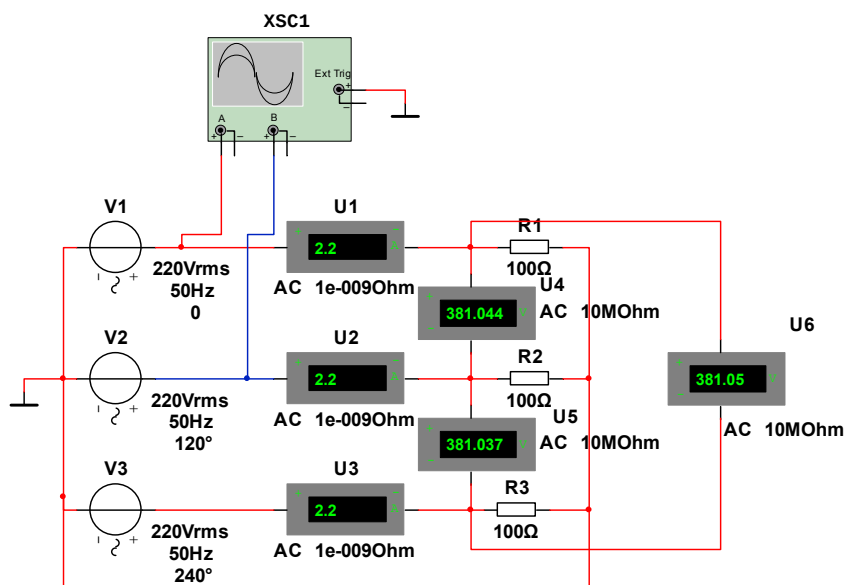


Рис. 13.5

Трифазне електричне коло у пакеті **Multisim** виглядає дещо інакше, ніж на стандартній схемі. Так, схема з'єднання «зірка – зірка», що зображена на рис. 13.1, *a*, в **Multisim** збирається, як зображено на рис. 13.5.

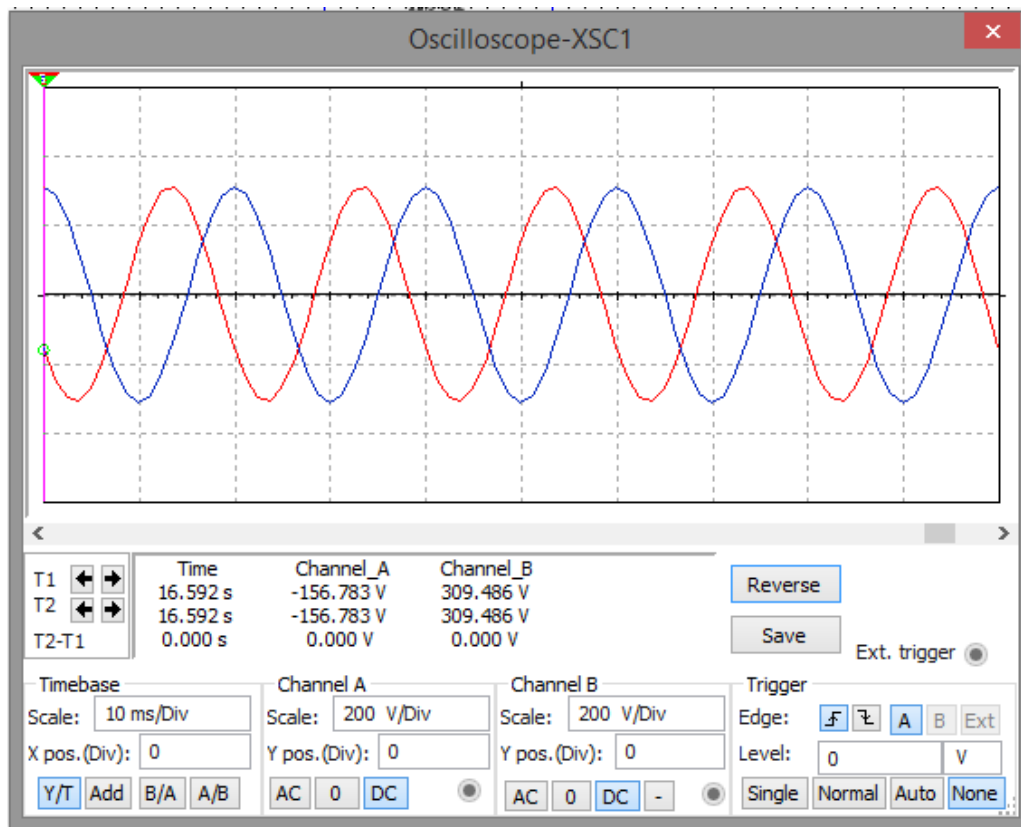


Рис. 13.6

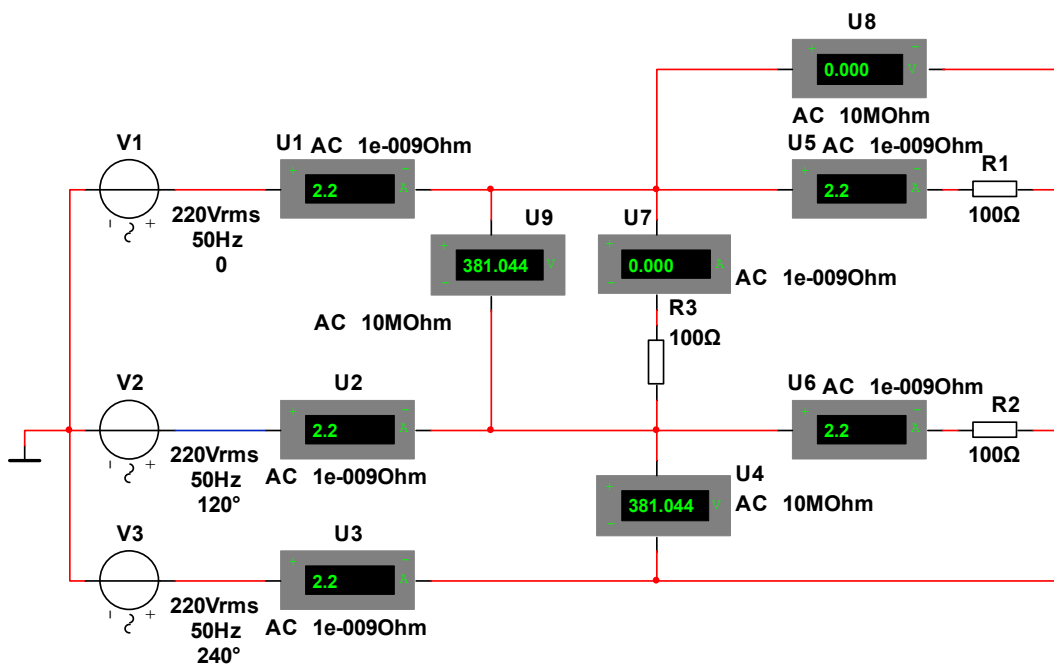


Рис. 13.7

Якщо до джерела трифазної напруги приєднати навантаження, яке з'єднане трикутником, то схема, що наведена на рис. 13.5, у пакеті **Multisim** матиме вигляд, як показано на рис. 13.7.

13.4. Порядок виконання роботи

13.4.1. Створити схему трифазної мережі з джерелами (відповідно до варіанту), що ввімкнуті „зіркою”. Заміряти лінійні напруги між кожною парою фаз U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} . Заміряти також фазові кути між напругами U_A та U_{AB} , U_B та U_{BC} , U_C та U_{CA} .

13.4.2. Створити трифазне навантаження з опорами згідно варіанту, з'єднати їх „зіркою” і приєднати до відповідних фаз трифазного джерела живлення. Заміряти струми в кожній фазі навантаження. Заміряти фазові кути між відповідними фазними напругами та струмами (рис. 13.5).

13.4.3. Для величини $\cos \varphi$, обраної за варіантом, обчислити величину реактивного опору, а потім – для заданої частоти знайти величини індуктивностей. Розраховані таким шляхом індуктивності встановити у схему послідовно з опорами R_A , R_B , R_C .

Заміряти фазові кути між фазними напругами та струмами. Встановити відповідність між експериментальними та розрахунковими даними.

Запропонувати схему обчислення потужності у навантаженні: в одній фазі; в трьох фазах. Навести схему для виміру: активної складової потужності; повної потужності.

13.4.4. Відключити заземлення, що встановлене у навантаженні, а вузол O_1 з'єднати з вузлом O через амперметр. Пояснити показ амперметра.

13.4.5. „Зірку” опорів, у відповідності до правил еквівалентного перетворення „зірки” на „трикутник”, перетворити на „трикутник” опорів і зібрати схему, що наведена на рис. 12.7. Заміряти струми у кожній з фаз (струми лінійного або міжфазного навантаження). Обчислити відповідність між фазними та лінійними напругами.

13.5. Вимоги до звіту

13.5.1. Побудувати векторні діаграми напруг і струмів у трифазних електричних колах, що досліджувались, і навести їх обґрунтування.

13.5.2. Навести результати експериментально отриманих співвідношень між фазними та лінійними струмами і напругами. Обґрунтувати отримані результати.

13.5.3. Навести результати експериментально отриманих показників активних, реактивних, повних потужностей у фазних та лінійних навантаженнях. Побудувати відповідні векторні діаграми.

13.5.4. Порівняти результати експериментальних досліджень з теоретично отриманими результатами.

13.5.5. Пояснити результати заміру струму між двома нейтральми O та O_1 .

13.6. Питання до атестації

13.6.1. Пояснити, що таке симетричний режим.

13.6.1. Пояснити терміни: „фаза”, „симетричне трифазне коло”, „лінійний струм”, „фазний струм”, „нейтраль”.

13.6.2. Які кутові співвідношення між фазними напругами симетричної трифазної системи?

13.6.3. Які кутові та амплітудні співвідношення між лінійними і фазними напругами симетричної трифазної системи?

13.6.4. Чим визначаються кутові співвідношення між фазними струмами та напругами?

13.6.5. Як обчислити потужність, що споживається симетричним трифазним навантаженням при з'єднанні опорів у „зірку”?

13.6.6. Пояснити співвідношення між фазними та лінійними напругами при з'єднанні навантаження в „зірку”.

13.6.7. Пояснити кутові співвідношення між лінійними і фазними напругами та відповідними струмами при з'єднанні навантаження у „трикутник”.

13.7. Задачі

13.7.1. Фазні струми симетричного трифазного споживача на рис. 13.8 дорівнюють 12 А. Яким буде струм I_{ca} після перегорання запобіжника у проводі А?

13.7.2. Визначити опори фаз симетричного трифазного споживача, які з'єднані „трикутником”, якщо відомо, що $I_A = 3,4$ А; $U = 220$ В (рис. 13.9).

13.7.3. Як зміняться струми після розмикання ключа в схемі на рис. 13.10?

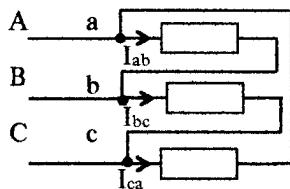


Рис. 13.8

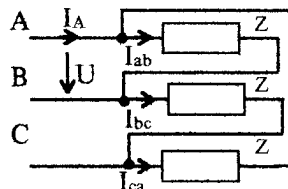


Рис. 13.9

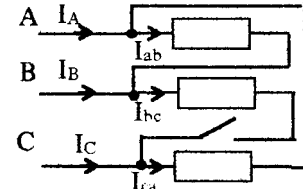


Рис. 13.10

13.7.4. Визначити, що покаже амперметр, який увімкнено у фазний провід симетричного трифазного споживача, з'єданого „трикутником”, якщо миттєве значення лінійного струму $i_A = 7,05 \sin(314t + 40^\circ)$ А.

13.7.5. Визначити фазні та лінійні струми симетричного трифазного споживача з опорами фаз 190 Ом, який підімкнули „трикутником” до трифазної симетричної системи лінійних напруг 380 В.

13.7.6. Визначити, що покаже амперметр, який увімкнули у лінійний провід симетричного трифазного споживача, з'єданого „трикутником”, якщо миттєве значення фазного струму $i_A = 7,05 \sin(314t + 40^\circ)$ А.

13.7.7. Чому дорівнює повна потужність симетричного трифазного споживача, незалежно від способу його з'єднання?

13.7.8. Чому дорівнює комплекс струму при з'єднанні несиметричного споживача „трикутником”?

13.7.9. Симетричний трифазний споживач з опором фази 5 Ом, який з'єднано „зіркою”, підімкнули до чотирьоповодної трифазної мережі з лінійною напругою 380 В. Визначити струм у нейтральному проводі.

13.7.10. Симетричний трифазний споживач з опором фази 30 Ом, який з'єднано „зіркою”, підімкнули до симетричної системи напруг. Визначити лінійний струм споживача, якщо миттєве значення лінійної напруги $u_{AB} = 282 \sin(314t + 30^\circ)$ В.

13.7.11. Симетричний трифазний споживач з опором фази 30 Ом, який з'єднано „зіркою”, підімкнули до симетричної системи напруг. Визначити фазний струм споживача, якщо миттєве значення лінійної напруги $u_{AB} = 282 \sin(314t + 30^\circ)$ В.

13.7.12. Симетричний трифазний споживач з опором фази 30 Ом, що з'єднано „трикутником”, підімкнули до симетричної системи напруг. Визначити фазний струм споживача, якщо миттєве значення лінійної напруги $u_{AB} = 282 \sin(314t + 30^\circ)$ В.

13.7.13. Симетричний трифазний споживач з опором фази 30 Ом, який з'єднано „трикутником”, підімкнули до симетричної системи напруг. Визначити лінійний струм споживача, якщо миттєве значення лінійної напруги $u_{AB} = 282 \sin(314t + 30^\circ)$ В.

13.7.14. Визначити фазні струми і активну потужність симетричного трифазного споживача, що підімкнули „зіркою” до симетричної системи лінійних напруг 415 В, якщо відомі опори фаз: $R = 14$ Ом; $X = 16$ Ом.

13.7.15. Визначити фазні струми і активну потужність симетричного трифазного споживача, який підімкнули „трикутником” до симетричної системи лінійних напруг 600 В, якщо відомі опори фаз: $R = 87$ Ом; $X = -43$ Ом.

13.7.16. Визначити лінійні струми і активну потужність симетричного трифазного споживача, який підімкнули „трикутником” до симетричної системи лінійних напруг 600 В, якщо відомі опори фаз: $R = 87$ Ом; $X = -43$ Ом.

13.7.17. Визначити показ вольтметра, що ввімкнули на лінійну напругу симетричного трифазного споживача, який з'єднано „зіркою”, якщо миттєве значення лінійного струму $i_A = 24 \sin(\omega t - 30^\circ)$ А, а повний опір фази споживача становить 10 Ом.

13.7.18. Як зміняться струми, якщо перегорить запобіжник? Споживач симетричний (рис. 13.11).

13.7.18. Задані лінійна напруга трифазної мережі та опір симетричного трифазного споживача. Визначте струм у проводі В при перегорянні запобіжника в проводі А (рис. 13.11).

13.7.19 Струм симетричного споживача $I_{BC} = 10$ А. Яким буде струм I_C (рис. 13.12)?

13.7.20. Струм симетричного споживача $I_C = 34,6$ А. Яким буде струм I_{AB} (рис. 13.12)?



Рис. 13.11

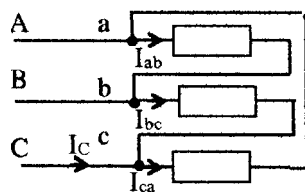


Рис. 13.12

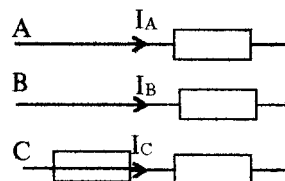


Рис. 13.13

13.7.21. Задані лінійна напруга трифазної мережі та опір симетричного трифазного споживача. Визначте струм у проводі В при перегорянні запобіжника в проводі С (рис. 13.13).

13.7.22. Зобразити трифазний симетричний споживач, якщо його опори в Омах дорівнюють:

- | | | |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 1. $Z_a = 5$, | $Z_b = 3 + j4$, | $Z_c = 3 - j4$. |
| 2. $Z_a = 5$, | $Z_b = 5e^{-j\frac{2}{3}\pi}$, | $Z_c = 5e^{j\frac{2}{3}\pi}$, |
| 3. $Z_a = 5 - j4$, | $Z_b = 5 - j4$, | $Z_c = 5 - j4$. |
| 4. $Z_a = 5$, | $Z_b = -j5$, | $Z_c = j5$. |

13.7.23. Вказати співвідношення між лінійними та фазними напругами і струмами симетричного трифазного споживача при з'єднанні „зіркою”.

- | | |
|---|--|
| 1. $U_L = U_\phi$; $I_L = \sqrt{3} I_\phi$. | 2. $U_L = \sqrt{3} U_\phi$; $I_L = I_\phi$. |
| 3. $U_\phi = \sqrt{3} U_L$; $I_L = I_\phi$. | 4. $U_\phi = \sqrt{2} U_L$; $I_\phi = \sqrt{2} I_L$. |

13.7.24. Вказати співвідношення між лінійними і фазними напругами та струмами симетричного трифазного споживача при з'єднанні „трикутником”.

- | | |
|---|---|
| 1. $U_L = U_\phi$; $I_L = \sqrt{3} I_\phi$. | 2. $U_L = \sqrt{3} U_\phi$; $I_L = I_\phi$. |
|---|---|

13.7.25. Навантаження складається з трьох однофазних споживачів, активний опір кожного з яких однаковий і дорівнює 50 Ом ($\cos\phi = 1$), з'єднаних між собою зіркою і приєднаних до джерела, лінійна напруга якого дорівнює 380В, за допомогою трьох фазних і нульового проводів. Визначити фазну напругу і струми. Побудувати векторні діаграми.

13.7.26. До трифазного джерела з лінійною напругою 380В і частотою 50Гц під'єднали симетричне навантаження, що з'єднали зіркою, з повним опором в фазі 90 Ом та індуктивністю 180мГн. Визначити діючі значення лінійного струму і напруги. Побудувати векторну діаграму.

13.7.27. У трифазну мережу з діючим значенням лінійної напруги 220В і частотою 50Гц ввімкнули споживача, що з'єднано трикутником і має симетричне навантаження, що складається з котушки з індуктивності 0,3Гн і послідовно ввімкненого з нею резистора з активним опором 20 Ом в кожній фазі. Визначити діючу напругу лінійних і фазних струмів.

13.7.28. До джерела трифазної напруги з діючим значенням лінійної напруги 380В і частотою 50Гц під'єднали симетричне індуктивне навантаження,

з'єднане зіркою. Діюче значення струму в кожній фазі 1,25А, $\cos\varphi = 0,456$. Визначити повний і активний опір навантаження та його індуктивність. Побудувати векторну діаграму.

13.7.29. На рисунку 13.14 представлені векторні діаграми струмів і напруг для споживачів енергії, що з'єднані по схемі „зірка” і ввімкнені в трифазну чотирипровідну мережу. Визначити характер навантаження в кожній фазі.

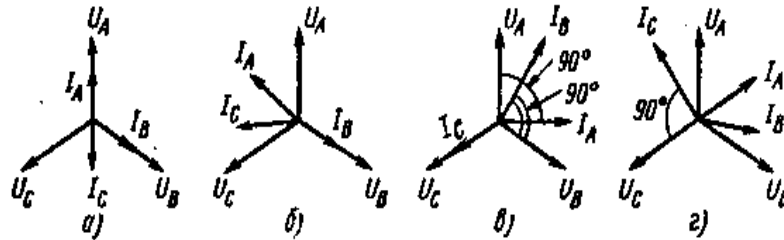


Рис. 13.14

13.8. Додаток

Таблиця варіантів до лабораторної роботи.

Номер варіанту	$E_{A, B, C}$ В	$\cos\varphi$	$R_{A, B, C}$ Ом
1	10	0,001	50
2	20	0,002	60
3	30	0,003	70
4	40	0,004	80
5	50	0,005	90
6	55	0,006	95
7	60	0,007	100
8	65	0,008	200
9	70	0,009	300
10	75	0,001	400
11	80	0,002	500
12	85	0,003	600
13	90	0,004	700
14	95	0,005	800
15	10	0,002	60

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ14

Дослідження електричних кіл постійного струму з нелінійними елементами

14.1. Мета роботи

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл з нелінійними елементами.

14.2. Основні теоретичні положення

Загальна характеристика нелінійних елементів. До *нелінійних* належать електричні кола, до складу яких входять нелінійні елементи (НЕ). *Нелінійними* є такі елементи, вольт-амперна характеристика (ВАХ) яких має нелінійний характер у робочому діапазоні струмів або напруг. *Вольт-амперна характеристика* представляє собою функціональну залежність напруги на нелінійному елементі від струму, який протікає через нього, або навпаки – залежність струму, що протікає через НЕ, від напруги, що прикладається до його клем.

В електротехніці усі електричні компоненти (елементи) можуть бути нелінійними. Більш того, нелінійними є всі напівпровідникові електронні компоненти.

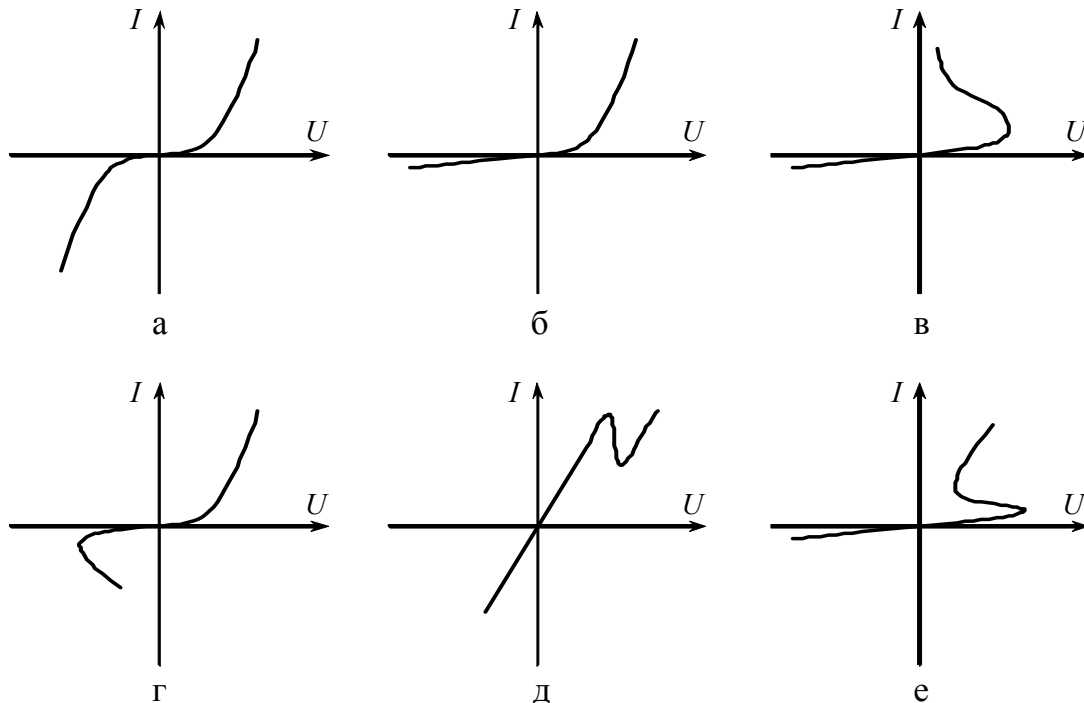


Рис. 14.1

Вольт-амперні характеристики НЕ можуть бути *симетричними* і *несиметричними*. *Симетричною* є характеристика, яка не залежить від напрямку визначаючих її величин, тобто симетрична відносно початку системи координат:

$U(I) = -U(-I)$ (рис. 14.1, а). Для *несиметричної* характеристики ця умова не виконується: $U(I) \neq -U(-I)$ (рис. 14.1, б – е). Наявність у нелінійного елемента симетричної ВАХ дозволяє спрощувати аналіз схеми, виконуючи його лише у межах одного квадранту.

За типами ВАХ всі НЕ можна розділити на елементи з *однозначною* та *неоднозначною* характеристиками. *Однозначною* називається така характеристика, у якій кожному значенню U відповідає єдине значення I та навпаки (рис. 14.1, а, б, д). У випадку *неоднозначної* характеристики деяким значенням U можуть відповідати два або більше значень I та навпаки (рис. 14.1, в, з, е).

Нелінійні елементи можуть бути розподілені на дві групи: *регульовані* та *нерегульовані*. Нерегульовані прилади мають незмінні вольт-амперні характеристики, а у регульованих приладах ВАХ змінюється зі зміною регулюючої величини. Тому у нерегульованих нелінійних елементах ВАХ зображується однією кривою, а у регульованих – сімейством кривих. ВАХ з регульованими характеристиками мають транзистори.

ВАХ, що зображена на рис. 14.1, а, характерна для нелінійних (тиристових та вілітових) опорів, а також деяких типів терморезисторів. Як приклад їх використання можна назвати системи стабілізації напруги. Напруга, що прикладена до них, приводить до появи відповідного струму. Якщо з якоїсь причини напруга зростає, то різко зростає і струм, який контролюється вимірювальними приладами.

Характеристика (рис. 14.1, б) є несиметричною і характерна для напівпровідникових діодів, які використовуються для перетворення змінного струму в постійний, оскільки реально проводять струм лише в одному напрямку.

ВАХ, що приведена на рис. 14.1, в, характерна для деяких типів терморезисторів. Характеристика, що приведена на рис. 14.1, д, характерна для тунельних діодів, які використовуються в генераторах високих частот, а характеристики рис. 14.1, з мають деякі типи германієвих випрямлячів. Характеристику типу рис. 14.1, е мають чотиришарові напівпровідникові прилади (діністори, тиристори), які використовуються в ключових генераторах низьких частот, у системах автоматики та ін.

Розрахунки кіл постійного струму з нелінійними елементами

Вивчення нелінійних електричних кіл має велике практичне значення в зв'язку з широким використанням особливих властивостей таких кіл у сучасних електротехнічних пристроях, особливо в електровимірювальній техніці, радіотехніці, пристроях автоматичного керування та регулювання.

Розрахунки електричних кіл з нелінійними елементами виконуються графічно, якщо задається графік вольт-амперної характеристики, або з використанням ЕОМ, якщо функціональна залежність задається у вигляді таблиці або в аналітичній формі.

Розглянемо наочні приклади графічного розв'язання задач.

Нелінійні елементи при послідовному включенні

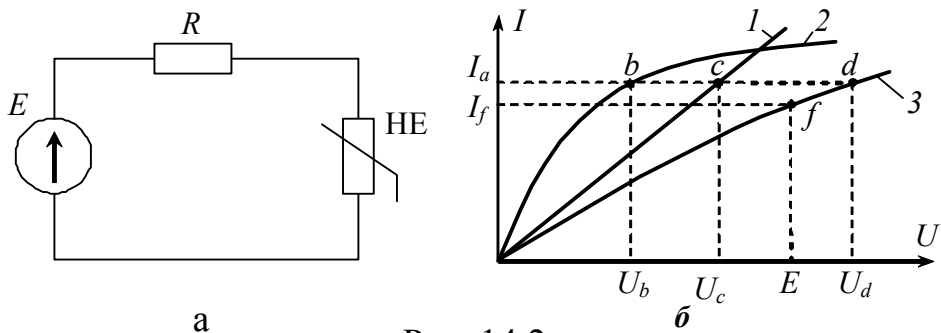


Рис. 14.2

На рис. 14.2, *а* наведена схема електричного кола, що містить послідовно з'єднані лінійний резистор R і нелінійний елемент HE , які підімкнуті до джерела живлення E , а на рис. 14.2, *б* показані ВАХ лінійного 1 і нелінійного 2 елементів.

Один із способів розв'язання задачі полягає в тому, що будується загальна ВАХ послідовно з'єднаних елементів, виходячи з тієї умови, що при послідовному з'єднанні через лінійний і нелінійний елементи протікає однаковий струм і в результаті напруга, що прикладається від джерела, розподіляється між лінійним елементом та нелінійним. Тому побудова загальної ВАХ базується на тому, що при обраному струмі I_a напруга U_d загальної характеристики знаходиться за формулою:

$$U_d = U_b + U_c.$$

Після побудови характеристики 3 легко визначити струм, що протікає в електричному колі при будь-якій прикладеній напрузі. Для цього необхідно, наприклад, з точки E , що лежить на осі напруг і відповідає величині напруги зовнішнього джерела живлення, підняти перпендикуляр до перетину з загальною характеристикою у точці f . Перетин перпендикуляра з точки f на вертикальну вісь дає можливість встановити величину струму I_f у колі, а відповідні перетини з характеристиками елементів – падіння напруги на кожному з них.

Інший спосіб обчислення параметрів електричного кола – це спосіб холостого ходу і короткого замикання, який полягає у наступному. За другим законом Кірхгофа, для кола з послідовно з'єднаними елементами маємо:

$$E = U_{HE} + U_R$$

або

$$U_{HE} = E - U_R = E - I R. \quad (14.1)$$

Останнє рівняння (14.1) представляє собою рівняння прямої лінії 2 (рис. 14.3), яка перетинає вісь напруг у точці з координатами $U_{HE} = E$ при $I = 0$, а вісь струмів – у точці $I = \frac{E}{R}$ при $U = 0$. Пряма 2 називається *лінією навантаження*. Кут нахилу α визначається зі співвідношення:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E/R}{E} = \frac{1}{R} = \frac{I_A}{U_R},$$

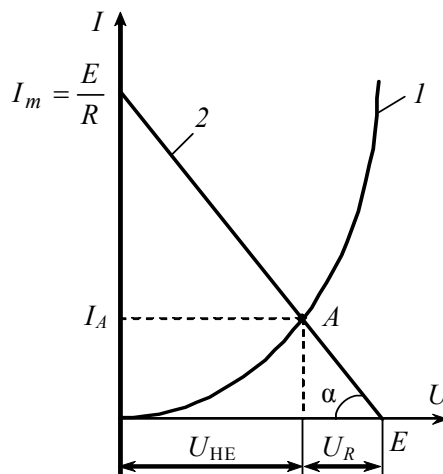


Рис. 14.3

тому точка A дає можливість визначити як струм, який протікає через елементи, так і падіння напруг на лінійному опорі і нелінійному елементі.

При послідовному з'єднанні двох і більшої кількості НЕ спочатку за допомогою графічних побудов знаходиться ВАХ двох НЕ і т. д. до отримання загальної ВАХ всіх НЕ.

При наявності у послідовному колі лише нелінійних елементів (рис. 14.4, *а*) можна використовувати й інший спосіб графічних обчислень.

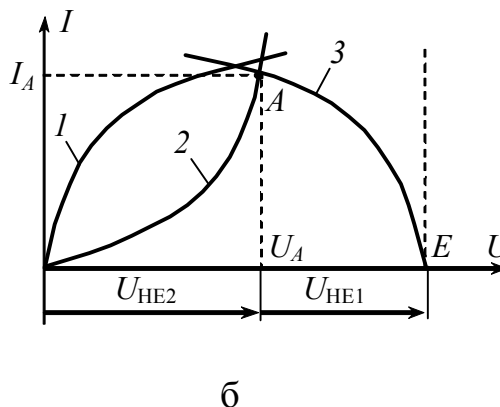
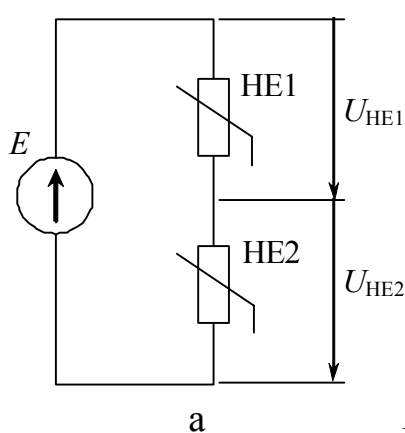


Рис. 14.4

Нехай на рис. 14.4, *б* крива 1 зображує вольт-амперну характеристику НЕ1, а крива 2 – ВАХ НЕ2. Поставимо задачею визначення режиму роботи елемента НЕ2.

З формули (14.1) і схеми, що приведена на рис. 5.7, *а*, витікає:

$$U_{HE2} = E - U_{HE1}. \quad (14.2)$$

Оскільки $U_{HE1} = f(I)$ і $U_{HE2} = f(I)$, то точка A перетину кривих $U_{HE2}(I)$ та $E - U_{HE1}(I)$ (на рис. 14.4, *б* – 2 і 3 відповідно) дасть нам шукані величини напруги і струму НЕ2. Для побудови залежності $E - U_{HE1}(I)$ (крива 3) необхідно перенести початок координат кривої 1 осі напруг у точку E , а потім зробити її дзеркальне відображення (рис. 14.4, *б*).

Паралельне з'єднання нелінійних елементів

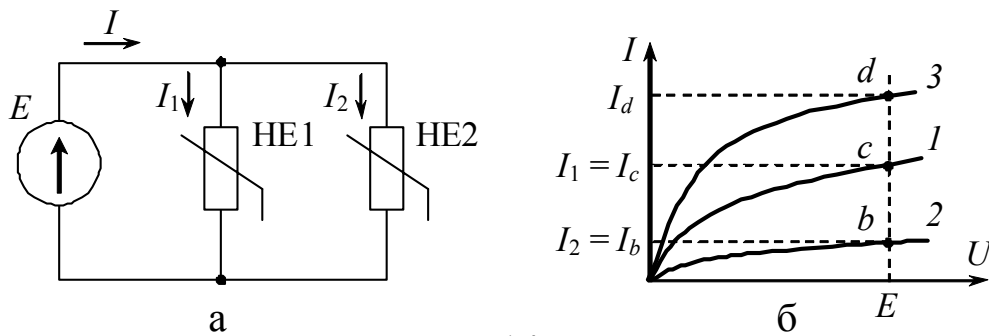


Рис. 14.5

При паралельному з'єднанні нелінійних елементів HE1 і HE2 (рис. 14.5, а) з ВАХ відповідно 1 і 2 (рис. 14.5, б) виходимо з умови, що напруга E однакова для обох елементів, і тому знаходження результуючої ВАХ забезпечується шляхом додавання струмів I_1 і I_2 , що відповідають робочим точкам b і c , тобто:

$$I_p = I_d = I_1 + I_2.$$

Так само знаходиться і решта необхідних точок результуючої кривої 3, яка встановлює залежність струму I від величини напруги, що прикладається до паралельно з'єднаних НЕ.

Використання методу еквівалентного активного двополюсника при розрахунку нелінійних електричних кіл

Якщо у складній електричній схемі маємо гілку з нелінійним елементом, то для визначення струму, що протікає через нього, і напруги, яка до нього прикладається, можна використати метод холостого ходу і короткого замикання для лінійної частини, виділивши лінійну частину схеми Л як активний двополюсник (рис. 14.6, а).

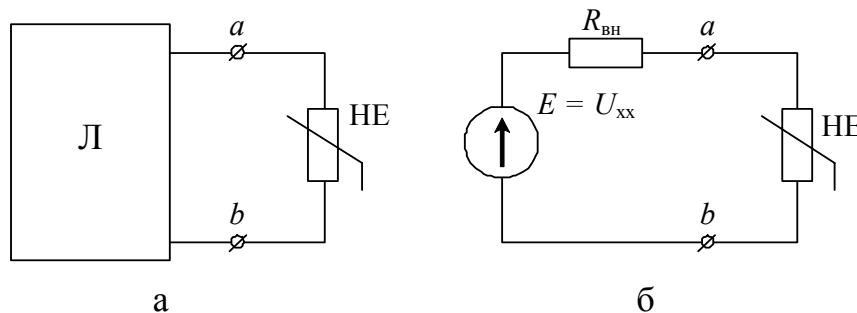


Рис. 14.6

Для такого двополюсника обчислюється або вимірюється напруга холостого ходу на клеммах при відсутності нелінійного елемента, а також обчислюється або заміряється струм короткого замикання при короткозамкнутих клеммах $a - b$. Потім з рівняння

$$U_{xx} = R_{вн} I_{кз}$$

знаходиться внутрішній опір $R_{\text{вн}}$ (він також може бути обчислений за допомогою відомих методів перетворення опорів).

Після одержання схеми заміщення двополюсника (рис. 5.10, б) подальше розв'язання задачі не викликає складності.

Особливості використання методів розрахунку нелінійних кіл у задачах електроніки

Розглянуті методи не розкривають усіх особливостей використання нелінійних елементів. Це пояснюється тим, що в аналогових електронних схемах, поряд з постійними напругами та струмами, діють і синусоїдальні сигнали або сигнали іншої форми. У такому випадку розрахунки виконуються як з використанням режимів постійного струму, так і режимів змінного струму.

Пояснимо це на прикладі. Допустимо, що схема має послідовно з'єднані джерело постійної напруги E і джерело змінної напруги $u(t)$, причому виконується умова, що амплітуда сигналу $u(t)$ набагато менша за E . Два джерела приєднані до послідовно включених нелінійного елемента і активного резистора (рис. 14.7, а).

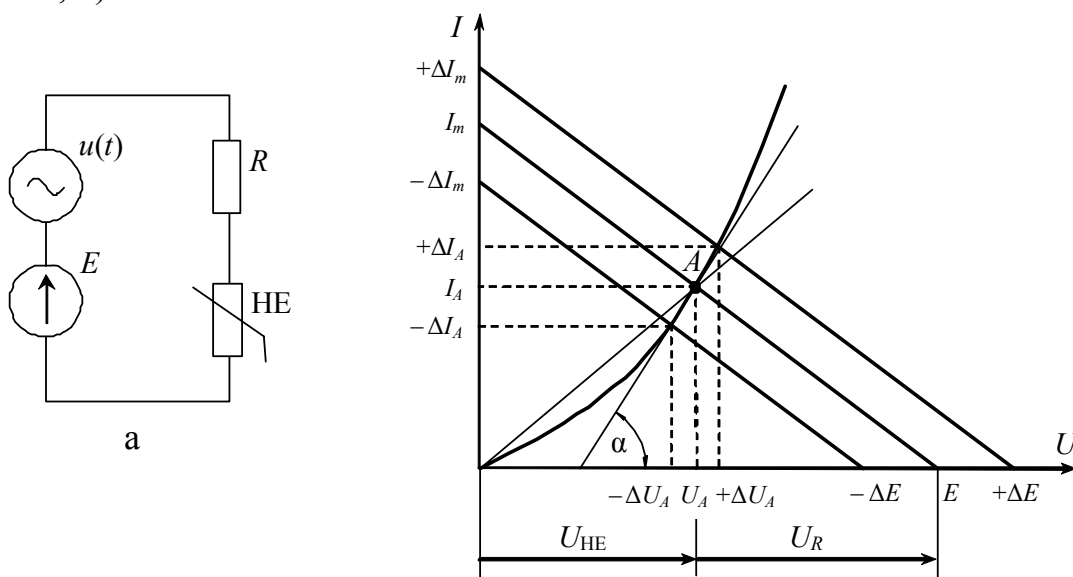


Рис. 14.7 б

При дії лише джерела E маємо лінію навантаження $I_m - E$, яка перетинає характеристику нелінійного елемента в точці A (рис. 14.7, б). При цьому напруга E розподіляється на U_{HE} і U_R . При дії джерела з напругою $u(t)$, що має амплітуду ΔE , лінія навантаження паралельно зміщується, і відповідно зміщується напруга на HE на величину $\pm U_A$ і струм на величину $\pm I_A$.

Для точки A , яка називається *робочою точкою* або *точкою спокою* і якій відповідає струм I_A і напруга U_A (рис. 14.7, б), можемо визначити опір по постійному струмові як відношення

$$R_{\text{п}} = \frac{U_A}{I_A}.$$

Фактично це означає, що у даній точці ми замінюємо нелінійний елемент лінійним з активним опором $R_{\text{п}}$ (іноді він називається *статичним опором* $R_{\text{ст}}$). Йому відповідатиме пряма лінія OA .

Для джерела змінного струму також можна визначити опір нелінійного елемента як відношення

$$\frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = R_{\text{д}}.$$

Параметр $R_{\text{д}}$ називається *динамічним опором* НЕ, а його величина може бути визначена як кут нахилу дотичної в точці A (рис. 14.7, б):

$$R_{\text{д}} = \text{ctg } \alpha = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}.$$

Якщо лінія $I_m - E$ (див. рис. 14.7, б) змінить нахил за рахунок зменшення лінійного опору, то, відповідно, зміниться місце робочої точки (положення точки спокою) і зміниться величина динамічного опору.

Якщо при розрахунках нелінійних кіл необхідно визначити поведінку схеми лише для змінної складової, то зазвичай нелінійний елемент можна замінити лінійним опором $R_{\text{д}}$. Така заміна називається *лінеаризацією електричного кола “в малому”* або *“в робочій точці”*.

Величина, зворотна опорі $R_{\text{д}}$,

$$S = R_{\text{д}}^{-1} = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_A},$$

називається *крутизною характеристики нелінійного елемента*. Цей параметр використовується для лінеаризації “в малому” НЕ з керованими характеристиками, представляючи його як джерело струму, кероване напругою:

$$\Delta I_A = S \Delta U_A.$$

У практиці роботи з напівпровідниковими нелінійними елементами широко використовується прийом *апроксимації* їх вольт-амперних характеристик, тобто заміна реальної характеристики такою функцією, яка приблизно виражає цю залежність. Існує декілька способів апроксимації нелінійних характеристик. Перший полягає у представленні їх загальною аналітичною функцією, заданою у вигляді ступеневого поліному або виразу з гіперболічним синусом і числовими коефіцієнтами. Другий передбачає заміну дійсної характеристики ломаною лінією (метод *кусочно-лінійної апроксимації*).

Кола постійного струму з регульованими нелінійними елементами

Вище відмічалось, що ряд НЕ мають властивість змінювати ВАХ під дією зовнішніх факторів або сигналів керування. До нелінійних елементів, ВАХ яких змінюється під дією зовнішніх факторів, відносяться магніторезистори,

терморезистори, тензорезистори, фоторезистори, а також відповідні типи діодів і транзисторів. До НЕ, ВАХ яких змінюється під дією сигналів керування, відносяться три- та чотиришарові напівпровідникові прилади. Приклади ВАХ таких приладів приведені на рис. 14.8.

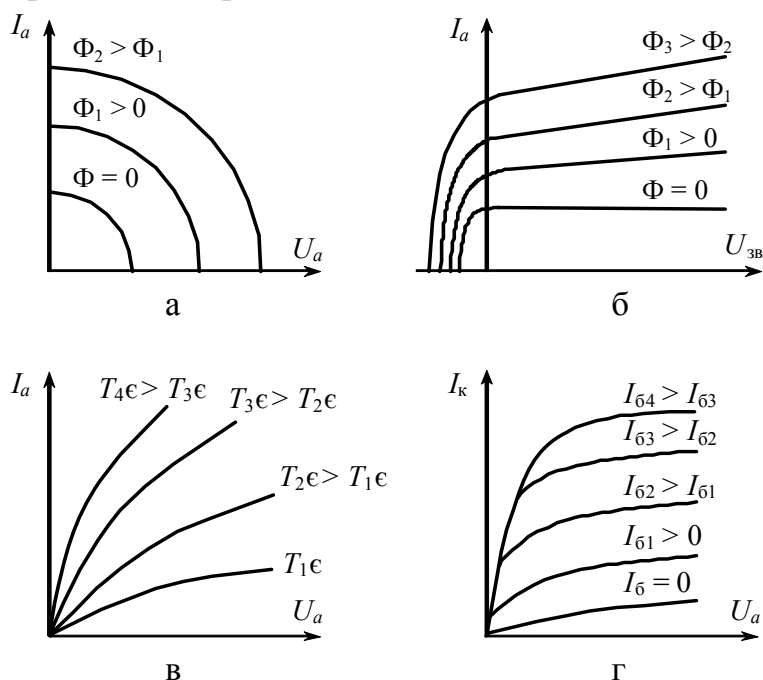


Рис. 14.8

На рис. 14.8, а, б наведені ВАХ фотодіода, характеристики якого залежать від величини світлового потоку Φ , при різних схемах включення. На рис. 14.8, в наведені характеристики терморезистора при різних температурах T° , а на рис. 14.8, г зображено сімейство вихідних характеристик біполярного транзистора, струм колектора I_k якого регулюється базовим струмом $I_б$.

Особливість роботи пристроїв, які мають сімейства ВАХ, полягає у тому, що у ряді випадків необхідно знати діапазони зміни струмів, які протікають через НЕ, або напруг, що до них прикладаються. Такі залежності будуються графічно з використанням сімейства ВАХ НЕ і лінії навантаження (при послідовному з'єднанні лінійного резистора та НЕ).

Як приклад, розглянемо сімейство ВАХ біполярного транзистора, на основі якого необхідно встановити залежності колекторного струму від базового $I_k = f(I_б)$ (характеристика вхід-вихід, рис. 14.9).

Алгоритм побудова залежності вихідного струму I_k від величини вхідного струму $I_б$ полягає у наступному.

У другому квадранті створюється горизонтальна вісь струмів бази, значення яких співпадають зі значеннями струмів сімейства характеристик, що приведені в першому квадранті. Ставлячи з кожного значення напівосі базового струму перпендикуляр до перетину з відповідною горизонтальною лінією, що починається на перетині лінії навантаження $E_k - I_k$ з сімейством ВАХ

приладу у точках $A_1 - A_8$, отримаємо сімейство точок $A'_1 - A'_8$, через які будується залежність $I_K = f(I_0)$.

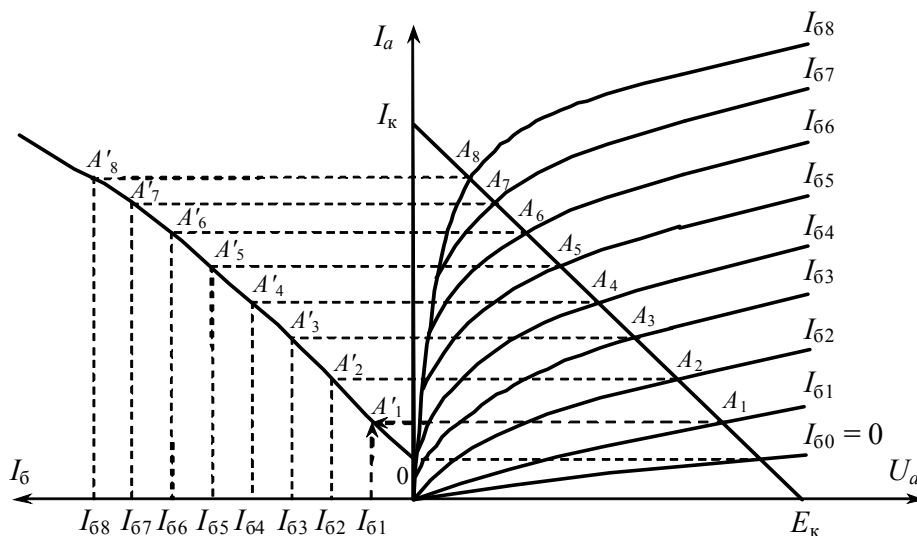


Рис. 14.9

Отримана залежність надає можливість оцінювати лінійність перетворення, діапазон зміни вхідного параметру і відповідний йому діапазон зміни вихідного параметру, крутизну характеристики перетворення та ін.

14.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

В якості нелінійних елементів для проведення дослідів можна використовувати діоди, стабілітрони, світловипромінюючі діоди, діоди Шотткі. При використанні діодів їхні вольт-амперні характеристики слід обирати в такому діапазоні напруг, який є робочим для даного типу приладу.

14.4. Проядок виконання роботи.

14.4.1. Обирається один з тих приладів, характеристики яких досліджувались у першій лабораторній роботі і для якого є паспортні дані, що отримані з довідкової літератури.

14.4.2. За допомогою приладу **I-V analyser** знімається ВАХ приладу у визначеному діапазоні параметрів і для кожного визначеного значення напруги, що задається за допомогою курсора, заміряється відповідне значення струму, що протікає через прилад. Складається таблиця відповідності у пакеті **Excel**.

14.4.3. З'єднується послідовно два-три прилади і знов до тієї ж таблиці заносяться значення струму при раніше визначених напругах. За допомогою пакету **Excel** в одній координатній сітці будуються ВАХ для одиничного діода і для їх послідовного з'єднання.

14.4.4. Повторюється попередній дослід, але при умові, що діоди з'єднуються паралельно, будуються відповідні ВАХ.

14.4.5. Складається схема з послідовно з'єднаних нелінійного елемента і резистора, що приєднуються до джерела постійної напруги у відповідності до схеми, що наведена на рис. 14.2, *a*. Напруга джерела обирається на рівні 3-10 В. Слід обрати резистор з умови, щоб напруги на резисторі і на нелінійному елементі були однаковими.

14.5. Вимоги до звіту

У звіті необхідно навести графки ВАХ нелінійних елементів при їх послідовному та паралельному з'єднанні. Навести розрахункові дані при виборі резистора у п. 14.4.5.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ15

Електричні кола з несинусоїдальними джерелами напруги та нелінійними чотириполіусниками

15.1. Мета роботи

Вивчення особливостей розрахунку електричних кіл з джерелами несинусоїдальної напруги та нелінійних чотириполіусників, які спотворюють вхідний синусоїдальний сигнал.

15.2. Основні теоретичні положення

Серед джерел змінної напруги чи струму досить часто зустрічаються такі, які у вихідному параметрі містять не тільки одну синусоїду, а досить сильно спотворені. Сигнали, що використовуються у радіотехнічних та телекомунікаційних системах, також мають досить складну форму, яка суттєво змінюється при проходженні крізь лінії зв'язку, фільтри, різноманітні перетворювачі. У лабораторній роботі пропонується отримання початкових знань про характеристики сигналів складної форми та особливостей їх проходження через R-L-C – кола.

Періодичні несинусоїдальні струми в електричних колах

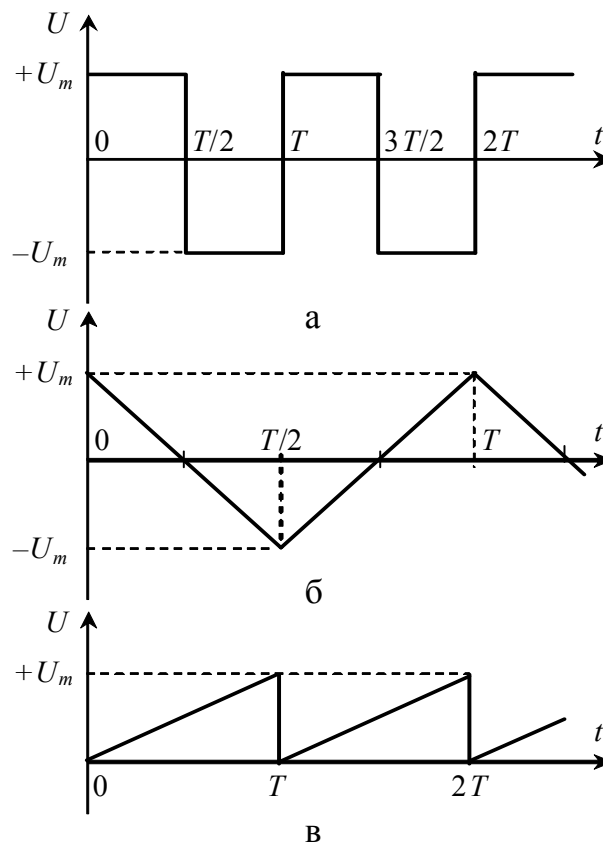


Рис. 15.1

В електронній техніці широко використовуються джерела, які генерують несинусоїдальні струми та напруги, а точніше, сигнали спеціальної форми.

На рис. 15.1 наведені варіанти періодичних напруг, які досить широко використовуються. Кількість таких варіантів досить велика, але методологія розрахунків кіл з такими джерелами має бути однаковою.

Особливість таких напруг полягає у тому, що вони не можуть бути зображені у вигляді неперервних функцій часу, тобто з точки зору математики такі процеси описуються розривними функціями.

У практиці розрахунку схем з подібними джерелами здебільшого використовують методи, в яких застосовуються ті чи інші види перетворень вихідних розривних функцій часу у функції, які представляються неперервними відносно цього аргументу.

Розглянемо один з таких способів, який полягає у тому, що періодична несинусоїдальна функція розкладається у ряд (суму) періодичних синусоїдальних функцій. Як відомо з курсу математики, будь-яку періодичну функцію, що задовольняє умовам Діріхле, можливо розкласти у тригонометричний ряд Фур'є. Електричні сигнали практично завжди задовольняють умовам Діріхле, адже на будь-якому кінцевому інтервалі мають обмежену кількість розривів першого роду і обмежену кількість максимумів та мінімумів. У відповідній математичній та електротехнічній літературі приводяться ряди Фур'є для типових функцій.

У загальному плані несинусоїдальна періодична функція $u(t)$ може бути представлена у вигляді ряду:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{ks} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} U_{kc} \cos k\omega t = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sin(k\omega t + \varphi_k),$$

де:

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) dt;$$

$$U_{ks} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin k\omega t d\omega t;$$

$$U_{kc} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos k\omega t d\omega t;$$

$$U_k = \sqrt{U_{ks}^2 + U_{kc}^2};$$

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{U_{kc}}{U_{ks}}\right);$$

k – порядок гармонічних складових.

Для $k = 1$ маємо першу гармоніку; для $k > 1$ – гармоніки вищих порядків.

Виконавши заміну розривної функції на суму неперервних, розрахунки електричних кіл можна виконувати окремо для кожної складової, після чого

необхідно обчислювати результуючі напруги або струми як геометричну суму складових (у комплексній формі – як векторну суму).

Складні форми напруг оцінюються за допомогою ряду спеціальних коефіцієнтів, а самі напруги – їх діючим значенням:

$$U_{ck} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Така форма зображення називається *замкнутою*, оскільки в формулі для U_{ck} відсутні гармонічні складові.

Якщо функція $u(t)$ використовується у вигляді ряду Фур'є, то формула прийме вигляд:

$$U_{ck} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} U_k^2}.$$

Як приклад, для функції, приведеної на рис. 15.1, а, ряд Фур'є має вигляд:

$$u(t) = \frac{4 U_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots + \dots \right),$$

а для функції (рис. 15.1, б)

$$u(t) = \frac{8 U_m}{\pi^2} \left(\cos \omega t - \frac{1}{9} \cos 3\omega t + \frac{1}{25} \cos 5\omega t - \frac{1}{49} \cos 7\omega t + \dots - \dots \right).$$

З порівняння амплітуд гармонічних складових бачимо, що з ростом порядку (номера k) їх амплітуди суттєво знижуються.

У обох випадках можна окремо виділити всі вищі гармоніки і порівняти їх з першою. Таке співвідношення:

$$K_r = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2} \quad (15.1)$$

називається *коефіцієнтом гармонік*.

Коефіцієнт K_r використовується для оцінки якості синусоїдальної напруги у генераторах синусоїдальних коливань, підсилювачах звукової частоти та інших пристроях.

Кола змінного струму з нелінійними елементами

У задачах електротехніки та електроніки часто мають місце реальні приклади появи вищих гармонік напруги та струму за рахунок проходження синусоїдальних напруг через нелінійні чотирьохполюсники. Подібні явища мають місце в підсилювачах потужності, в нелінійних перетворювачах, які працюють як у симетричних, так і несиметричних режимах. Нелінійні елементи використовуються в обмежувачах напруги, у пристроях виділення амплітуд сигналів. За допомогою НЕ забезпечується перетворення змінної напруги у постійну, помноження та ділення частоти, стабілізація змінної напруги, генерація коли-

вань різної форми, забезпечення модуляції та демодуляції, виконання логарифмічних перетворень і т. п.

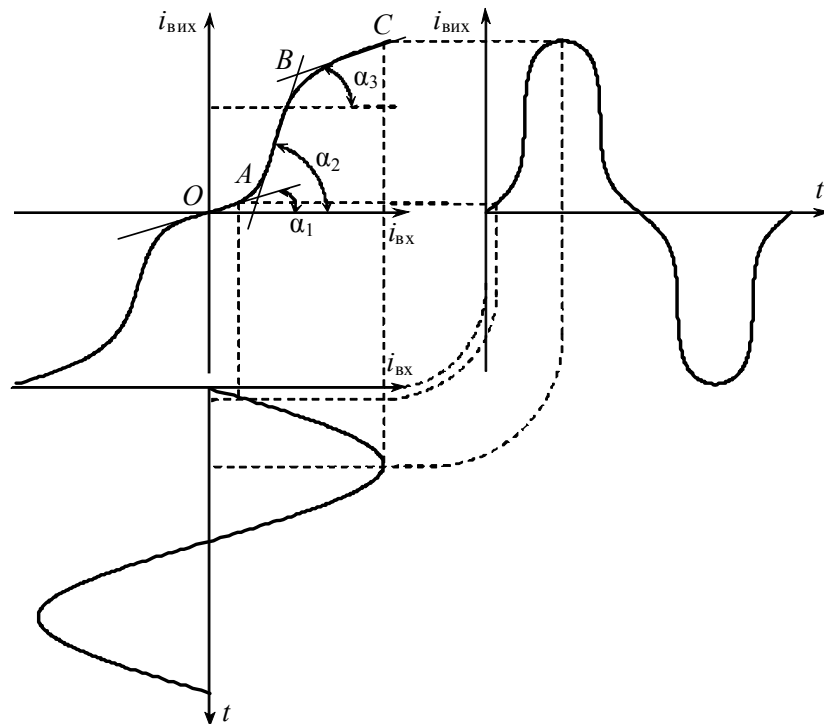


Рис. 15.2

На рис. 15.2 наводиться приклад нелінійної характеристики приладу, при дії на нього синусоїдального сигналу значної амплітуди. З вигляду нелінійної характеристики видно, що в цілому вона може бути апроксимована трьома лінійними ділянками: OA з нахилом α_1 ; AB – з нахилом α_2 ; BC з нахилом α_3 . В результаті коефіцієнт підсилення вхідного сигналу $i_{вх}(t)$ на кожній з ділянок буде різним. На першій ділянці:

$$K_I = \frac{I_{вих}}{I_{вх}} = \operatorname{tg} \alpha_1;$$

на другій:

$$K_I = \operatorname{tg} \alpha_2;$$

на третій:

$$K_I = \operatorname{tg} \alpha_3.$$

Завдяки різному рівню підсилення вихідний сигнал буде спотворений, і його форма матиме вигляд, приведений на графіку $i_{вих}(t)$. З вигляду одержаної синусоїди можна стверджувати, що в ній, окрім першої гармонічної складової, також містяться вищі складові, які фактично і вносять спотворення вихідного сигналу:

$$I_{вих}(t) = I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} \sin 2\omega t + I_{3m} \sin 3\omega t + \dots,$$

де I_{1m} , I_{2m} , I_{3m} – амплітуди гармонічних складових; ω , 2ω , 3ω – їх частоти.

Визначення амплітуд гармонічних складових є досить складною задачею, рівень якої залежить від того, наскільки складною є аналітична форма запису функції $i_{вих}(i_{вх})$.

У ряді випадків такі функції апроксимуються гіперболічним синусом типу:

$$I_{\text{вих}} = I_{\alpha} \operatorname{sh} \beta i_{\text{вх}},$$

де I_{α} , β – числові коефіцієнти.

Якщо використовується така апроксимація, то гармонічні складові обчислюються з використанням функції Беселя. При використанні кусочно-лінійної апроксимації амплітуди гармонічних складових можуть бути обчислені шляхом розкладання вихідної функції у ряд Фур'є.

При розгляді перетворень синусоїдального сигналу нелінійними елементами всю структуру здебільшого представляють як нелінійний чотириполюсник (рис. 15.3, *а, б*), вихідний сигнал якого приймає несинусоїдальну форму.

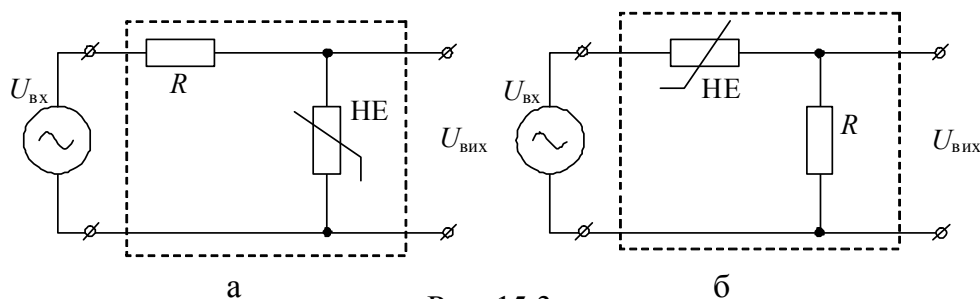


Рис. 15.3

Характер вихідного сигналу залежить від виду ВАХ нелінійного елемента, способу його включення, а також від характеру вхідного сигналу та його амплітуди. Тому в залежності від цих факторів змінюватиметься також гармонічний склад вихідного сигналу, наявність чи відсутність постійної складової.

На рис. 15.4 наводиться приклад зміни форми вхідного синусоїдального сигналу з постійною складовою. При цьому як спотворюється синусоїдальна складова, так і змінюється величина постійної складової.

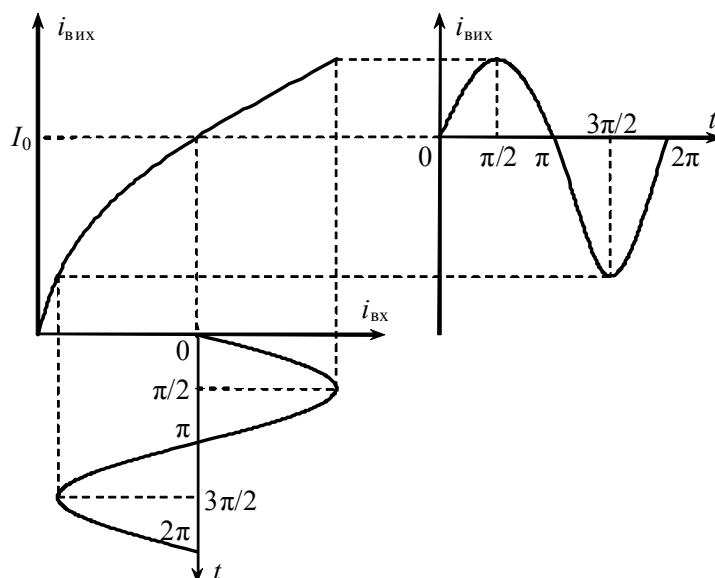


Рис. 15.4

15.3. Використання віртуальної лабораторії Multisim для виконання роботи

У віртуальній лабораторії є досить велика кількість можливостей для отримання періодичних несинусоїдальних сигналів.

У роботі скористаємось лише функціональним генератором, який розглядався у попередніх роботах (рис. 15.5, а, б).

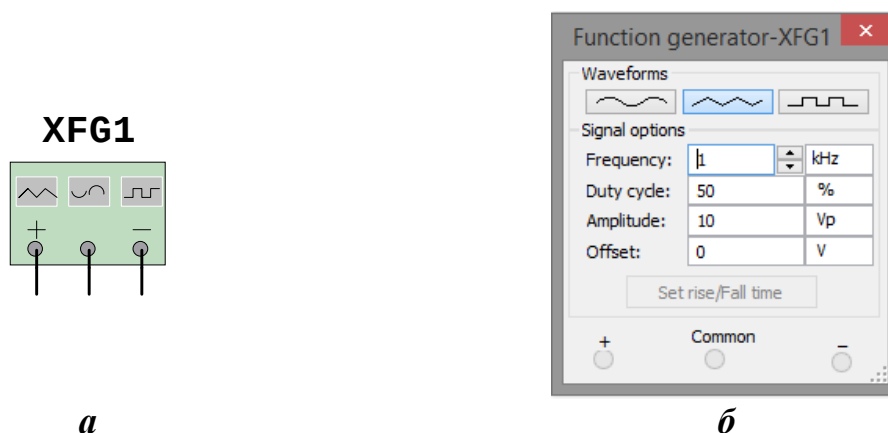


Рис. 15.5

Цей генератор, незважаючи на незначну кількість сигналів, що в ньому закладені, має значні функціональні можливості, оскільки можна змінювати періодичність сигналів, тривалість імпульсів, зміщення амплітуди, керування тривалістю фронтів. Завдяки цьому виникають широкі можливості отримувати однополярні імпульси, двополярні імпульси з різними додатніми і від'ємними амплітудами, пилоподібні імпульси з різною тривалістю інтервалу наростання та спаду сигналу, трапецієподібні сигнали (за рахунок керування тривалістю фронту та зрізу).

У доповнення до функціонального генератора, віртуальна лабораторія надає можливість проводити гармонічний аналіз сигналів в обраних точках схеми.

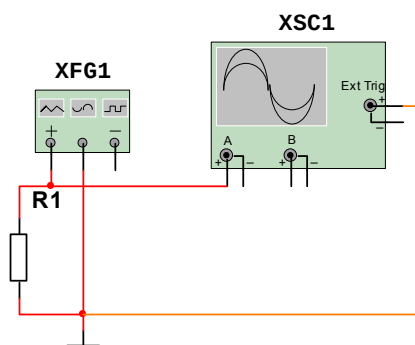


Рис. 15.6

Як приклад, розглянемо проведення гармонічного аналізу на резисторі R1, який приєднаний до функціонального генератора. На виході генератора встановлена послідовність однополярних імпульсів, форма яких наведена на осцилограмі (рис. 15.7).

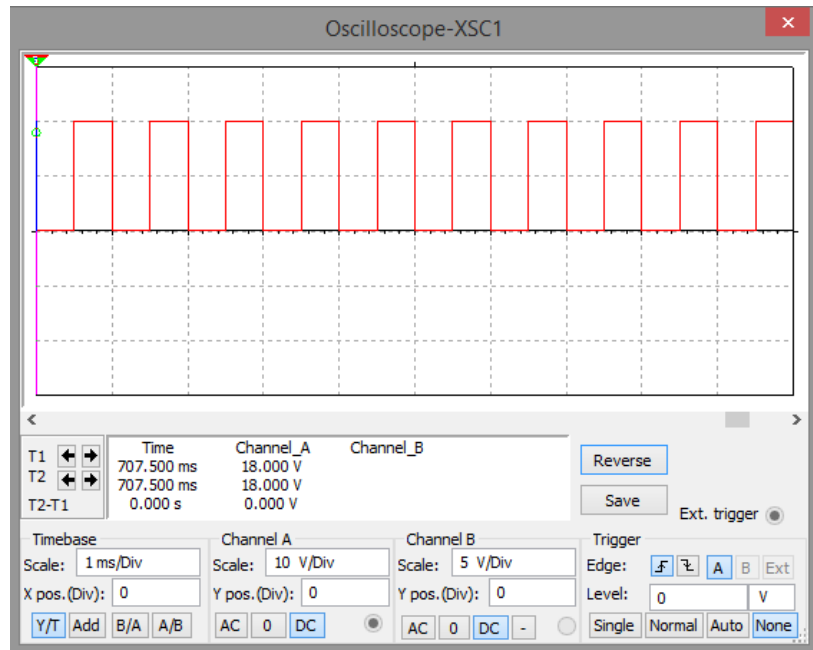


Рис. 15.7

Для проведення Фур'є-аналізу оберемо підпрограму у такій послідовності: **Simulate** → **Analyses** → **Fourier Analysis**. З'являється вікно установок **Fourier Analysis** (рис. 15.8), у якому обирається меню **Analyses parameters** і встановлюються:

- Frequency resolution (fundamental frequency) – найнижча частота, з якої починається гармонічний аналіз (частота першої гармоніки);
- Number of harmonics – кількість гармонік для обчислення і виводу на спектрограму;
- Display as bar graph – відображати у вигляді бар-графа.

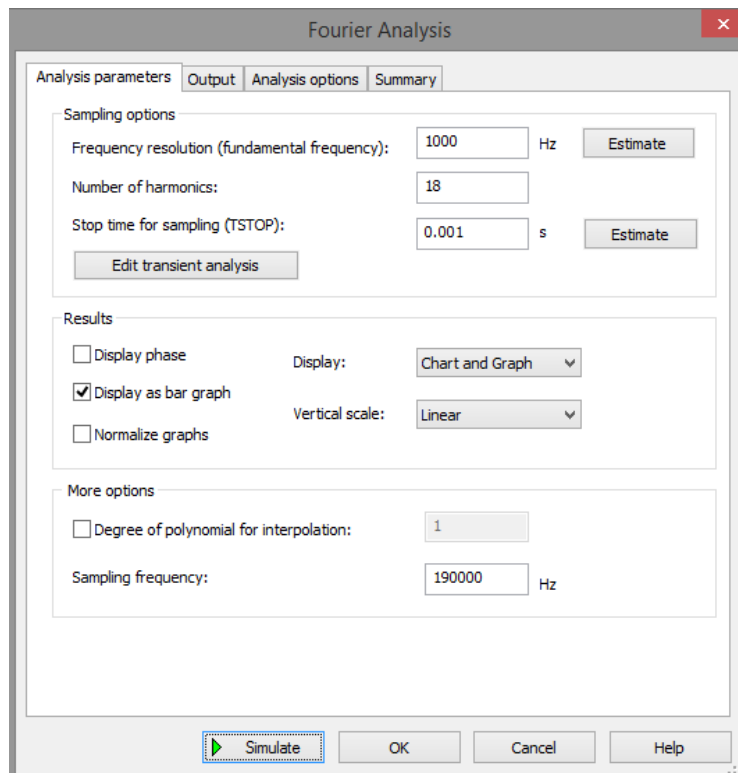


Рис. 15.8

У вікні **Output** (рис. 15.9) у лівому вікні **Variables in circuits** обирається параметр елемента, в якому слід аналізувати струм або напругу. Кнопкою **Add** цей параметр переноситься у праве вікно **Selected variables for analysis**. Після цього натискається кнопка **Simulate**. У вікні, що з'явиться (рис. 15.10), наводяться у заданному частотному діапазоні (за кількістю гармонік, що враховуються) амплітуди гармонік у вигляді вертикальних ліній, довжина яких відповідає амплітудам гармонічних складових (**Bar graph**). Також у таблиці, що наведена зверху, наводяться короткі відомості про діаграму.

Для більш детального аналізу спектру гармонік необхідно отриману діаграму розкрити на весь екран (рис. 5.11). При цьому на екрані з'являться дані про конкретні гармоніки – їх частоти, амплітуди, фази.

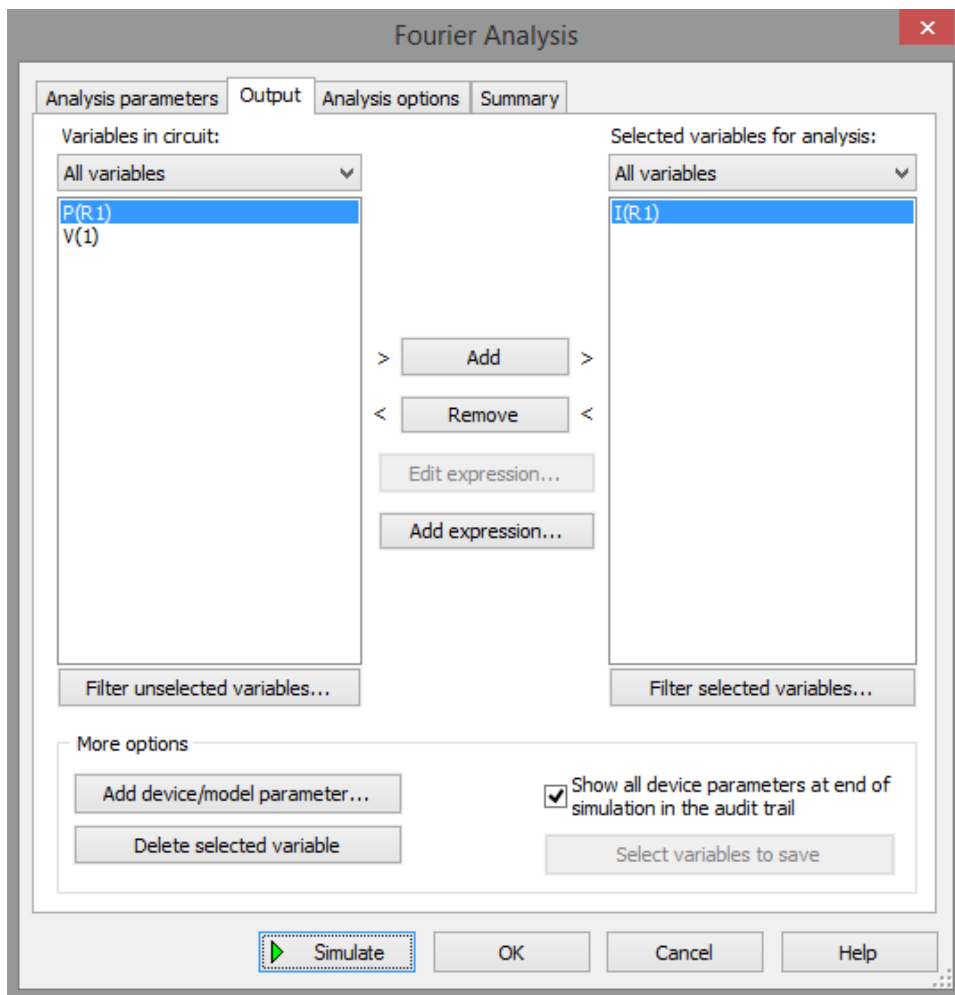


Рис. 15.9

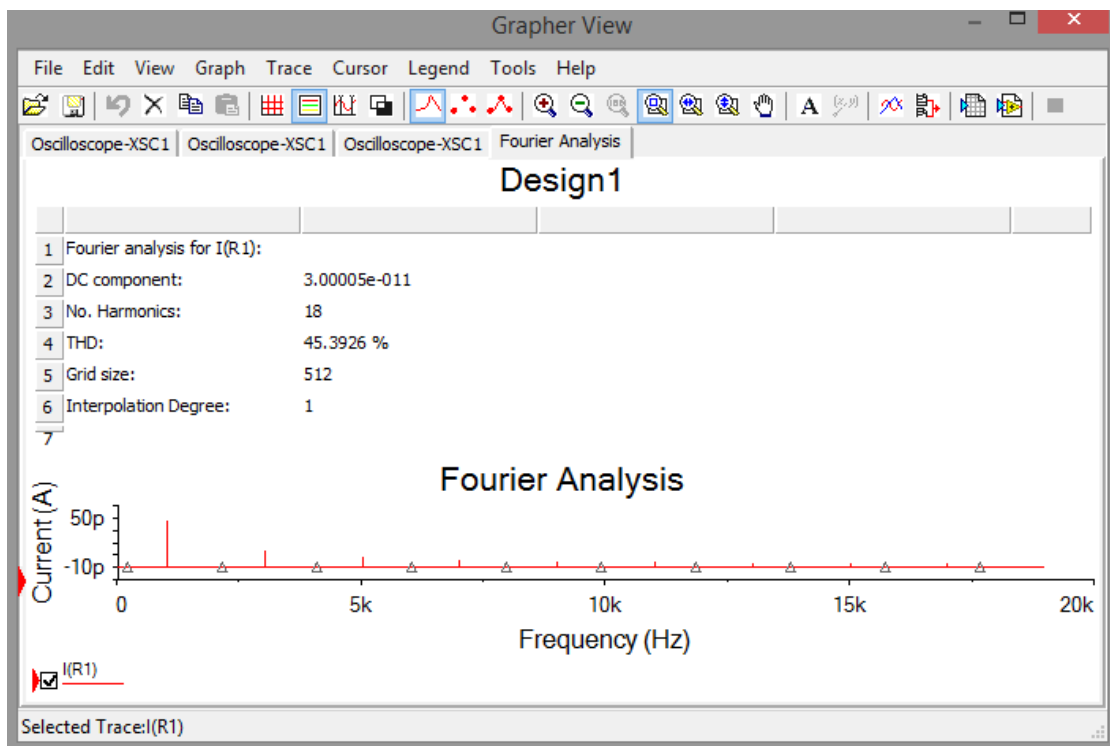


Рис. 15.10

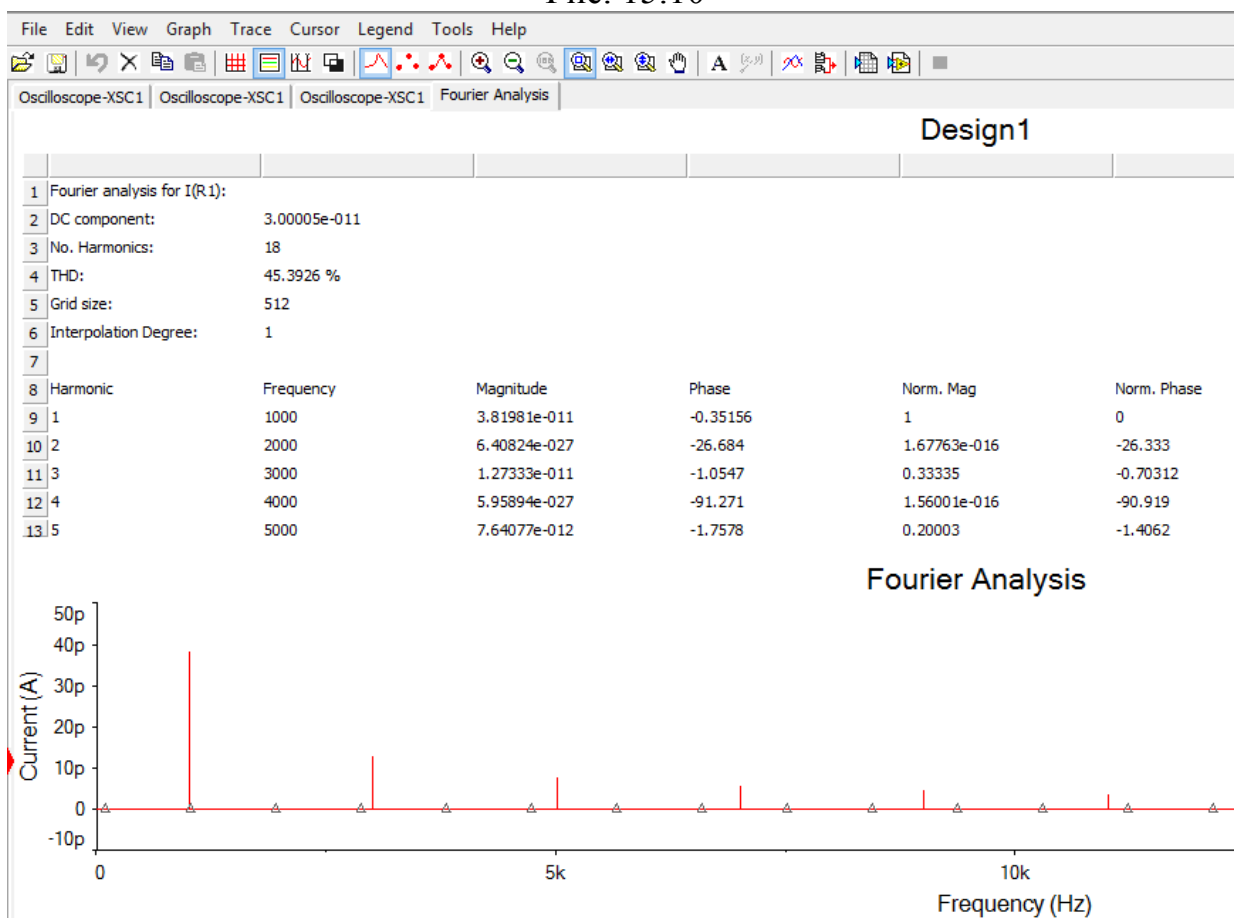


Рис. 15.11

15.4 Порядок виконання роботи

15.4.1. Складається схема, що містить джерело змінної синусоїдальної напруги і резистор у якості навантаження. Частота джерела обирається з умови $f_D = N_b \cdot 1$ (кГц). Проводиться дослід щодо визначення спектру вихідної напруги і коефіцієнта гармонік (TND) у відповідності до (15.1).

15.4.2. Для проведення дослідів використовується функціональний генератор. Встановлюється прямокутний імпульс з амплітудою 10 В і частотою у відповідності до п. 15.4.1. Робиться зміщення на величину амплітуди сигналу з тим, щоб отримати послідовність однополярних імпульсів. Тривалість імпульсу встановлюється 50% від періоду. Проводиться дослід щодо визначення амплітуд перших 5-ти гармонік і коефіцієнта гармонік. Повторюється дослід зі зменшення тривалості імпульсу до 40%, 30%, 20%, 10%, 5%, 2%. Результати заносяться у таблицю. Будується графік залежності амплітуд гармонік від тривалості імпульсу. Аналогічно проводиться дослід зі збільшенню тривалості імпульсу до 98% і будуються відповідні графіки.

15.4.3. Для параметрів імпульсу з п. 15.4.2 усувається зміщення і проводяться аналогічні дослідів. Обчислюється коефіцієнт гармонік.

15.4.4. Складається схема, що наведена на рис. 15.12. Елемент A1 – обмежувач напруги (**limiter**). Цей елемент знаходиться в групі **Sources** у підгрупі **Control function blocks**. Він виконує функцію обмеження вихідної напруги на рівні, що задається в його установах. Оберіть амплітуду вхідного сигналу 10 В, а рівні обмеження вихідної напруги встановіть ± 5 В.

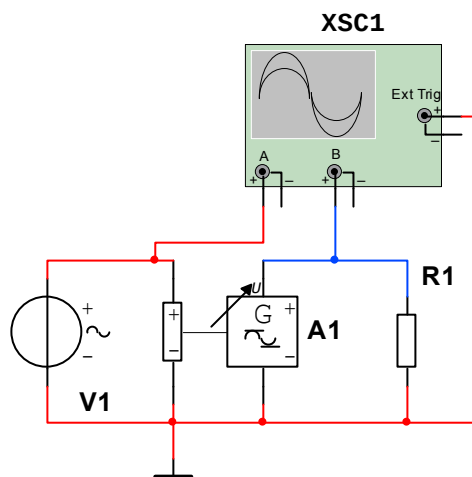


Рис. 15.12

Проводиться дослід щодо визначення гармонічного складу вихідної напруги. Визначається коефіцієнт гармонік.

15.4.5. Складається електричне коло з джерелом однополярних прямокутних імпульсів, яке навантажене послідовно з'єднаними індуктивною котушкою та активним опором. Частота імпульсів встановлюється у відповідності до п. 15.4.1. Заміряється гармонічний склад струму, що протікає через резистор, при різних постійних часу R-L навантаження. Задається постійна часу наван-

таження $T_H = L / R = (1-10) / f_d$ (обирається 3-4 значення) і для кожного значення заміряються гармонічні складові та обчислюється (заміряється) коефіцієнт гармонік.

15.4.6. Проводиться дослід, аналогічний до п. 15.4.5, але паралельно до опору навантаження додається конденсатор. Ємність конденсатора встановлюється з умови $RC = (1-10) / f_d$ (обирається 3-4 значення) і для кожного значення заміряються гармонічні складові та обчислюється (заміряється) коефіцієнт гармонік.

15.5. Вимоги до звіту

У звіті необхідно навести результати проведених дослідів, виконані обчислення, побудовані графічні залежності, а також власні висновки за результатами роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ16

Кабельні лінії зв'язку як пасивні чотириполіусники

16.1. Мета роботи

Вивчення основних властивостей кабелів зв'язку, інформаційних кабелів, силових кабелів, по яких можуть передаватись інформаційні сигнали або перешкоди, що генеруються нелінійними споживачами.

16.2. Основні теоретичні положення

Усі розглянуті вище чотириполіусники відносяться до пристроїв, які мають параметри, що сконцентровані в окремих резисторах, конденсаторах, дроселях.

У кабельних лініях передачі інформації (наприклад, у кабелях комп'ютерних мереж) недопустимо нехтувати струмами, обумовленими ємністю між провідниками, і провідністю ізоляції, особливо у випадках, коли маємо значні довжини лінії.

Щоб врахувати зміну струму та напруги по всій довжині лінії, треба вважати, що кожен якзавгодно малий елемент лінії має опір (R) та індуктивність (L). Для двопровідної лінії визначаємо ще й ємність між провідниками (C) та провідність ізоляції (G). Таким чином, лінію можна розглядати як коло з розподіленими параметрами, яке містить множину з'єднаних у ланцюг нескінченно малих елементів, кожен з яких має опір, індуктивність, провідність, ємність. Таку лінію називають *довгою лінією*.

Вважатимемо, що опір, індуктивність, ємність і провідність рівномірно розподілені вздовж лінії (однорідна лінія). Такий тип ліній дуже розповсюджений і використовується для передачі інформації.

Лінія передачі інформації характеризується наступними параметрами:

- хвильовий опір, який визначається як відношення амплітудного значення напруги до амплітудного значення струму в бігучій електромагнітній хвилі:

$$Z_0 = U_m / I_m = \sqrt{L/C}; \quad (16.1)$$

- коефіцієнт ослаблення сигналу α , який характеризує зменшення амплітуди хвилі на одиницю довжини лінії:

$$\alpha \approx \frac{R}{2} \sqrt{C/L} + \frac{G}{2} \sqrt{L/C}; \quad (16.2)$$

- коефіцієнт β (коефіцієнт фази), який визначається як зміна фази сигналу на одиницю довжини лінії:

$$\beta \approx \omega \sqrt{L/C}. \quad (16.3)$$

Вищенаведені формули є приблизними і мають місце за таких умов: $\beta \ll \omega L$ та $\alpha \ll \omega C$.

В інших випадках враховується комплексний характер опору:

$$Z_o = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}}.$$

Зменшення амплітуди хвилі вздовж лінії обумовлюється втратами в лінії, а зміна фази – швидкістю розповсюдження електромагнітних коливань. Довжина електромагнітної хвилі пов'язана з коефіцієнтом фази наступною формулою:

$$\lambda = 2\pi / \beta. \quad (16.4)$$

Коли електромагнітна хвиля розповсюджується від початку лінії до її кінця, вона називається *прямою або падаючою хвилею*. Швидкість пересування падаючої хвилі визначається як швидкість пересування точки, фаза коливань якої залишається постійною і дорівнює:

$$v_\phi = \omega / \beta. \quad (16.5)$$

Через деякий час хвиля досягає кінця лінії, відбивається і пересувається у зворотному напрямку. Це *зворотна або відбита хвиля*, її фазова швидкість дорівнює $v_\phi = -\omega / \beta$.

Таким чином, миттєву напругу в лінії можна розглядати як суму двох хвиль, які пересуваються у протилежних напрямках, при цьому кожна хвиля затухає у напрямку руху.

Враховуючи формули (16.1) і (16.5), можна записати:

$$\beta = \omega / v_\phi = 2\pi f / v_\phi, \\ \lambda = v_\phi / f = v_\phi T.$$

З вищенаведених формул можна зробити висновок, що за час, який дорівнює одному періоду, як пряма, так і зворотна хвиля пересуваються на відстань, яка дорівнює довжині хвилі.

Лінія передачі інформації може працювати у двох режимах:

- узгодженого навантаження (режим бігучої хвилі). Це характерно для лінії, на виході якої є активний опір Z , котрий дорівнює хвильовому опору Z_o . За такої умови потужність, яка досягла кінця лінії, повністю поглинається, зворотна хвиля не створюється, і коефіцієнт відбиття дорівнює нулю. Це дуже важливо для ліній зв'язку, оскільки зворотна хвиля створює ефект відлуння на початку лінії, за рахунок чого витрачається потужність передачі сигналу.

- неузгодженого навантаження, коли на виході ввімкнули опір, який не дорівнює хвильовому опору лінії ($Z \neq Z_0$). Найбільш характерні випадки неузгодженого навантаження, коли лінія розімкнута ($Z = \infty$) і коли лінія замкнута ($Z = 0$).

За даними режиму холостого ходу та короткого замикання можна визначити хвильовий опір:

$$Z_0 = \sqrt{Z_X Z_K}.$$

Режим неузгодженого навантаження характеризується наявністю відбитої хвилі, втратами потужності в лінії та зменшенням амплітуди бігучої хвилі. Коефіцієнт відбиття в кінці лінії обчислюється за формулою:

$$p = (Z_{вих} - Z_0) / (Z_{вих} + Z_0) = (U_{вих} - Z_0 I_{вих}) / (U_{вих} + Z_0 I_{вих}).$$

Використовуючи цей коефіцієнт, можна розрахувати амплітуди напруги та струму в різних режимах роботи лінії:

$$U_m = U_{відб.} (1 + p), \quad I_m = I_{відб.} (1 - p),$$

де:

U_m та I_m – амплітуди напруги та струму в кінці лінії;

$U_{відб.}$ та $I_{відб.}$ – амплітуди напруги та струму відбитої хвилі.

16.3. Використання Multisim для дослідження чотириполіусників. Порядок виконання роботи

Вивчення чотириполіусників проводиться на прикладі найпростіших схем, що наведені на рис. 16.1.

1. Обраний за варіантом чотириполіусник встановлюється у схему, що на представлена на рис. 16.2. За варіантом також встановлюються Z - параметри чотириполіусника (Z_1, Z_2) та параметри джерела живлення. Варіанти наведені у Додатку 1.

Дослідження проводяться у двох режимах:

- дослід короткого замикання, коли опір навантаження дорівнює нулю ($Z_H = 0$);
- дослід холостого ходу, коли опір навантаження дорівнює нескінченності ($Z_H = \infty$).

Дослід холостого ходу не завжди можливий, оскільки у Т-подібних схемах один вивід реактивного елемента залишається розірваним. Тому дослід проводиться при досить великому навантаженні, опір якого повинен значно перевищувати опір поперечного комплексного опору Z_2 на частоті проведення дослідів.

2. Використовуючи табличні значення опорів Z_1 та Z_2 , а також результати експериментальних досліджень, визначити Z -параметри чотириполіусника та порівняти отримані розрахункові результати з теоретичними.

3. На основі табличних даних та експериментальних досліджень обчислити комплексні опори холостого ходу та короткого замикання і порівняти отримані результати.

4. Обчислити величину характеристичного опору чотириполюсника на основі результатів дослідів холостого ходу та короткого замикання.

5. Навантажити чотириполюсник характеристичним опором і обчислити відношення U/I на його вході та виході.

6. Визначити власне затухання чотириполюсника для напруг і струмів. Обчислити його в неперах і децибелах.

7. Збільшити (зменшити) опори на вході та виході чотириполюсника на порядок по відношенню до характеристичного, заміряти величини струмів та напруг і обчислити величину затухання чотириполюсника.

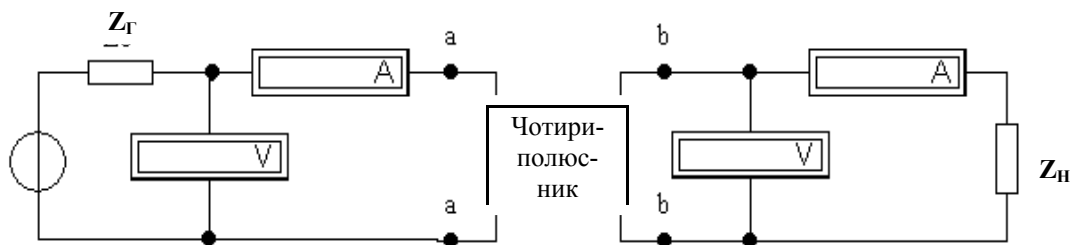


Рис. 16.2

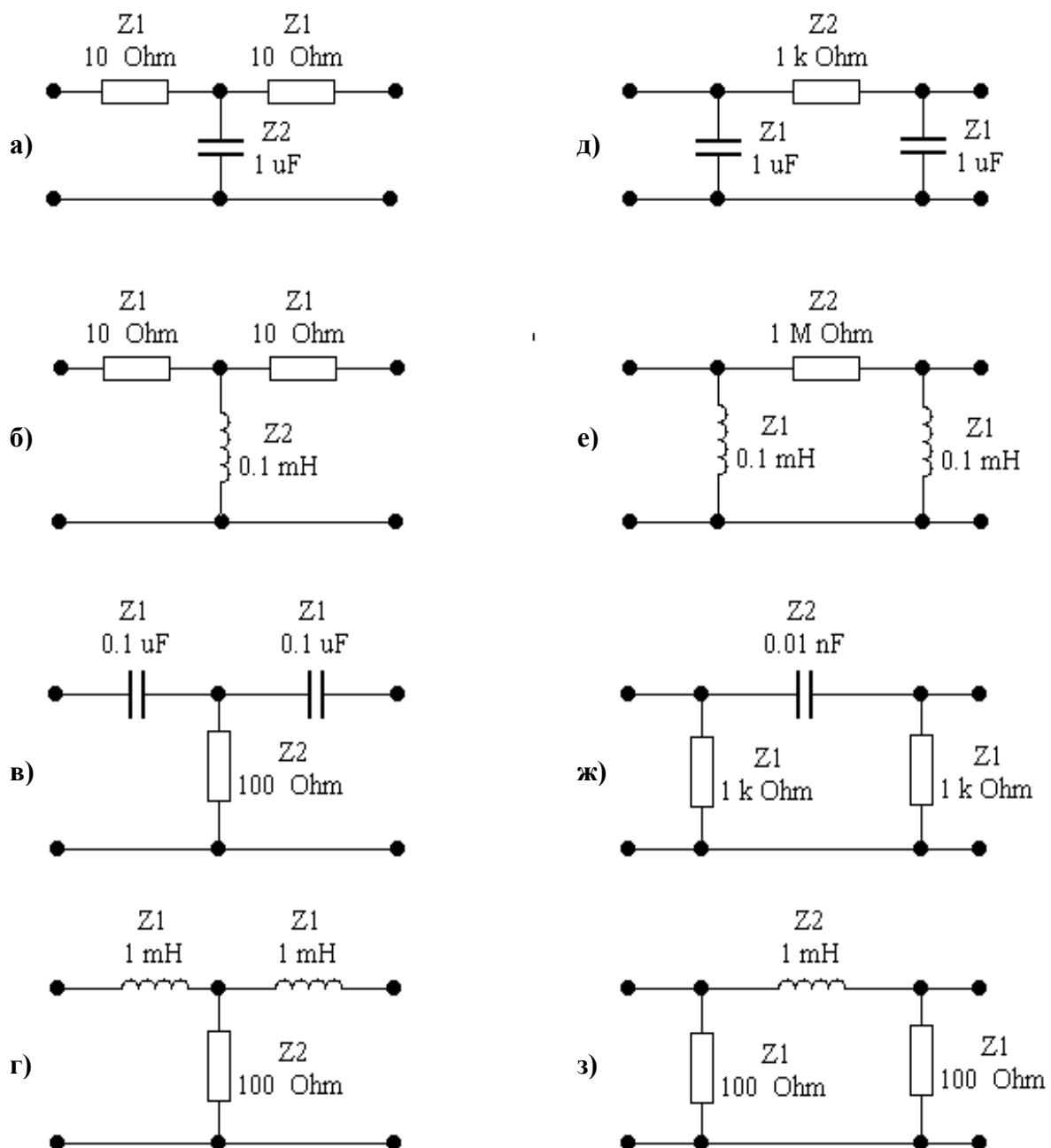


Рис. 16.1

Додаток 1. Таблиця варіантів до проведення дослідів щодо вивчення основних параметрів чотириполюсників (п. 16.2.1).

№ варіанта	Типи опорів		Тип схеми	E _Г , В	f _Г , кГц	Z _Г , Ом	Z _Н , Ом
	Z ₁	Z ₂					
1	R	C	T	5	40	70	∞
2	C	R	П	10	50	80	∞
3	R	L	T	15	60	90	∞
4	L	R	П	20	70	100	∞
5	C	R	T	5	80	110	∞
6	R	C	П	10	90	120	∞
7	L	R	T	15	100	130	∞
8	R	L	П	20	110	140	∞
9	R	C	T	5	120	150	∞
10	C	R	П	10	130	160	∞
11	R	L	T	15	140	170	∞
12	L	R	П	20	160	180	∞
13	C	R	T	5	170	190	∞
14	R	C	П	10	180	200	∞
15	L	R	T	15	190	210	∞

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ТЕ17

Часові характеристики RLC -кіл

17.1. Мета роботи

На прикладі простих електричних кіл вивчити зв'язок між параметрами вхідних та вихідних сигналів чотириполюсника, визначити їх взаємозв'язок з постійними часу електричних кіл при дії постійних струмів (напруг) або імпульсних сигналів.

17.2. Основні теоретичні положення

RLC -кола широко використовуються для організації часових затримок, формування необхідних форм і тривалостей імпульсних сигналів, узгодження сигналів у часі. LC -ланки використовують як кола, що забезпечують примусову комутацію силових ключів, RL -ланки – як елементи для забезпечення необхідних траєкторій перемикавання, а також як трансформаторні схеми. RLC -кола використовуються як моделі схем заміщення кабельних ліній зв'язку, ліній затримки високочастотних сигналів. У схемотехніці телекомунікаційних систем та мереж здебільшого використовуються часові властивості інтегруючої та диференціюючої RC -ланок.

Використання інтегруючої ланки

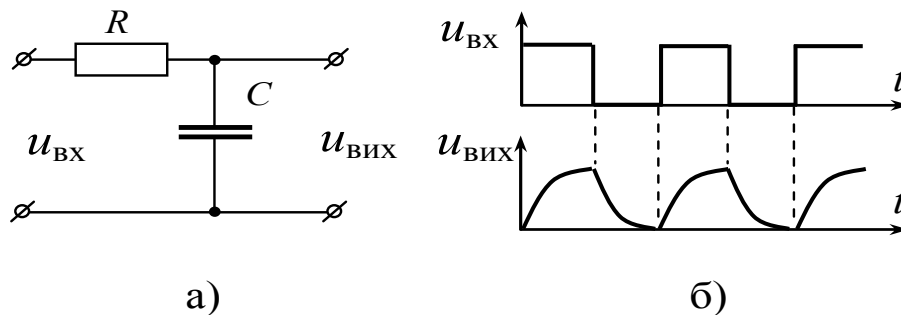


Рис. 17.1.

Напруга на виході RC -ланки, наведеної на рис. 17.1, при умові, що у початковий момент часу $U_{ВІХ}(0) = 0$, описується рівнянням:

$$U_{ВІХ}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i \, dt = \frac{1}{RC} \int_0^t (U_{ВХ} - U_{ВІХ}) \, dt.$$

З наведеного рівняння можна зробити наступні висновки. Якщо конденсатор заряджається незмінним струмом, то:

$$U_{ВІХ} = \frac{I t}{C},$$

тобто напруга на конденсаторі лінійно наростає у часі. Ця особливість широко використовується в генераторах лінійно змінюваної напруги, таймерах підвищеної точності, схемах часових затримок, схемах розширення імпульсів.

При виконанні умови $|U_{\text{вих}}| \ll |U_{\text{вх}}|$ маємо:

$$U_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt,$$

тобто схема виконує функцію інтегратора.

При живленні схеми постійною напругою $U_{\text{вх}} = E$ з наведеної формули знаходимо приблизну формулу, що широко використовується:

$$U_{\text{вих}}(t) \approx \frac{Et}{RC}.$$

При подачі на RC -ланку ідеального одиночного прямокутного імпульсу при нульових початкових умовах отримуємо залежність:

$$U_{\text{вих}}(t) = E \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right), \quad (17.1)$$

з якої легко можна одержати попередню формулу.

Якщо схема живиться від джерела напруги, то при відсутності імпульсу конденсатор розряджатиметься через джерело на резистор. Напруга на конденсаторі при цьому зменшується від початкової на цьому інтервалі часу U_0 до нуля відповідно до формули:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (17.2)$$

Формули (17.1) і (17.2) описують зміну напруги на конденсаторі і при дії періодичної послідовності імпульсів. При цьому форма вихідної напруги в значній мірі залежатиме від співвідношення між періодом імпульсів T і постійною часу RC . Від цього ж залежить і характер використання властивостей розгляданої ланки. При $RC \gg T$ вона здебільшого використовується як фільтр. При $RC \approx T$ ланка використовується як інтегруюча.

Використання диференційної ланки

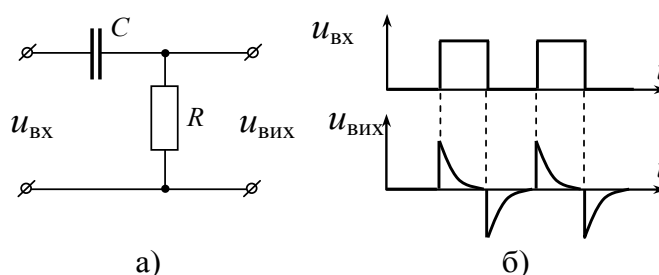


Рис. 17.2.

Напруга на виході схеми (рис. 7.16, *a*) описується формулою:

$$U_{\text{вих}}(t) = RC \frac{dU}{dt} + RC \left(\frac{dU_{\text{вх}}}{dt} - \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \right),$$

де $U = U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}$.

Якщо $\frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \ll \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$, то $U_{\text{вих}}(t) \approx RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$, тобто RC -ланка може засто-

совуватись як диференціююча.

Найбільш широко вона використовується для скорочення тривалості вхідних імпульсів. При появі імпульсу конденсатор заряджається, величина струму зменшується, і напруга на виході зменшується. Після заряду конденсатора його напруга дорівнює амплітуді імпульсу, а напруга на виході дорівнює нулю. Після закінчення імпульсу напруга конденсатора через джерело живлення прикладається до вихідного резистора, після чого конденсатор розряджається до нуля. При наявності фронту імпульсу умови диференціювання погіршуються, тому необхідно зменшувати постійну часу RC . Для виділення фронтів $t_{\text{фр}}$ (тобто виконання умови, щоб тривалість імпульсу на виході схеми приблизно дорівнювала тривалості фронту) необхідне виконання умови

$$RC \approx 0,1 t_{\text{фр}}.$$

З ростом постійної часу умови диференціювання погіршуються, і реально має місце лише спотворення вершини імпульсу.

На рис. 17.12, *б* наводиться ілюстрація дослідження часових характеристик диференціюючої ланки. Якщо постійна часу набагато перевищуватиме період слідування імпульсів, то така ланка повністю передаватиме вхідні імпульси, але без постійної складової. Цю особливість легко побачити за допомогою осцилографа шляхом перемикання режиму прийому сигналу з постійного струму на змінний.

17.3. Використання *Multisim* для виконання роботи

Для отримання постійних або імпульсних сигналів можна скористатись джерелами постійної напруги або струму, що знаходяться в меню **DC** → **Voltage**; для отримання ступінчатої напруги типу одиничного стрибка можна скористатись джерелом **Step voltage**, що знаходиться в меню **Signal voltage sources**; для отримання одиничного імпульсу заданої тривалості складається схема, яка наведена на рис. 17.3. Сигнали з генераторів ступінчатої напруги V1 та V2 подаються на суматор A1, вхід С якого налагоджено на режим віднімання. Сигнал з генератора V2 подається з затримкою на інтервал часу, що задається пристроєм затримки A2. Як наслідок, на виході суматора отримується одиничний імпульс, тривалість якого визначається величиною затримки, встановленої в A2. Для отримання періодичної послідовності імпульсів використовується функціональний генератор.

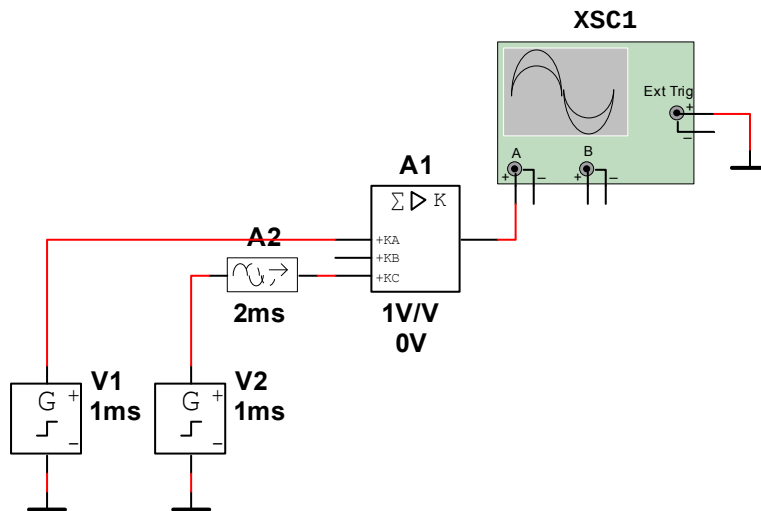


Рис. 17.3

Оскільки часові параметри визначаються перехідними процесами, які відбуваються в електричних колах під впливом постійних або імпульсних сигналів, то для їх аналізу використовується опція **Transient Analysis**, яка знаходиться у меню **Simulate** → **Analyses**. Після вибору вказаної опції з'являється вікно установок, в якому встановлюється початковий час перехідного процесу, загальний час процесу, а у вікні вихідних параметрів встановлюється параметр і елемент, які контролюватиметься. Після натискання кнопки **Simulate** з'являється графік перехідного процесу, за яким можна визначити часові параметри, що досліджуються.

Інший шлях дослідження перехідних процесів – їх запис на осцилографі. Приклад, що демонструє використання осцилографа, наведений на рис. 17.5 для перехідного процесу в електричній схемі, що представлена на рис. 17.4.

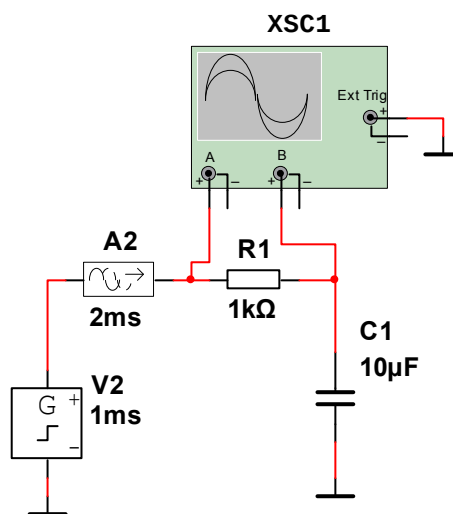


Рис. 17.4

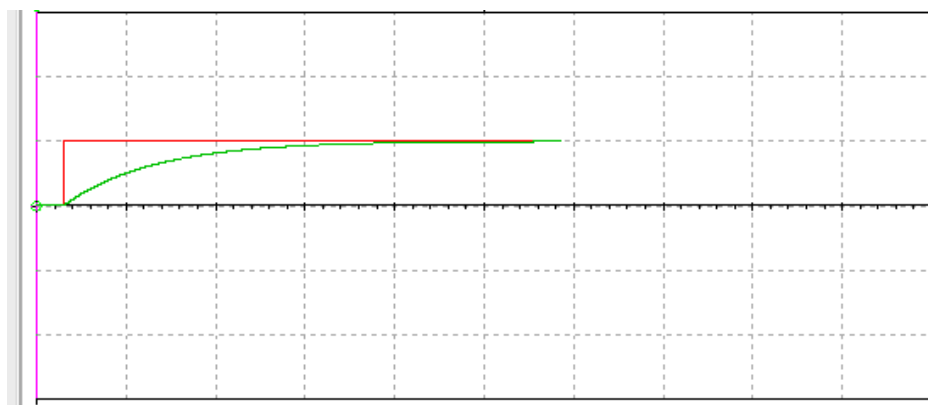


Рис. 17.5

За часом розгортки легко визначається час перехідного процесу, постійні часу R-C кіл.

17.4. Порядок виконання роботи

17.4.1. Провести дослідження інтегруючої ланки на основі R-C елементів. Для цього необхідно скласти інтегруючу ланку, а у якості джерела напруги обрати напругу типу одиничного стрибка. Зняти форму перехідного процесу зміни напруги на конденсаторі. Змінюючи постійну часу R-C ланки, кілька разів обчислили тривалість часу, яка потрібна для завершення перехідного процесу. Встановити залежність тривалості перехідного процесу від постійної часу ланки. Пов'язати отримані результати з формулами теоретичної частини. Зробити відповідні висновки.

17.4.2. Провести аналогічний дослід для інтегруючої ланки при подачі періодичної послідовності імпульсів. Імпульси слід отримувати від функціонального генератора. При цьому сумарна тривалість фронту та зрізу повинна складати не більше 1% від періоду імпульсної послідовності.

17.4.3. Скласти інтегруючу ланку на основі R-L елементів і провести аналогічні дослідження.

17.4.4. Провести дослідження диференціюючої ланки на основі R-C елементів. Для цього задатися частотою імпульсної послідовності, виходячи з умови $f_3 = N \cdot 1 \text{ кГц}$ (N – порядковий номер студента у списку групи). Змінюючи постійну часу в діапазоні від $0,01 f_3$ до $100 f_3$ (крок зміни параметрів обирається студентами самостійно), встановити залежність між постійною часу і тривалістю імпульсів. Провести дослідження щодо впливу тривалості фронту та зрізу періодичної послідовності імпульсів на роботу диференціюючої ланки.

17.4.5. Повторити дослід для ланки на основі L-R кола.

17.5. Вимоги до звіту

У звіті необхідно зробити власні висновки за проведеними дослідженнями, пояснити часові залежності та їх зв'язок з постійними часу ланок, які були досліджені.

17.6. Питання до атестації

17. 6.1. Поясніть призначення інтегруючої та диференціюючої ланок.

17.6.2. Поясніть взаємозв'язок між формами вихідних імпульсів і постійними часу інтегруючої та диференціюючої ланок.

Навчальне видання

РЯБЕНЬКИЙ Володимир Михайлович
БУРЯК Володимир Святославович

ПРАКТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Посібник для виконання лабораторних і практичних робіт
з курсу
«ОСНОВИ ТЕОРІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ ТА СИГНАЛІВ»
на основі віртуальної лабораторії
MULTISIM

Частина I

Комп'ютерне складання та верстання *А. Д. Літвінова*
Коректор *М. О. Паненко*

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 9,6. Тираж 100. Зам. № 95.
Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв Сталінграда, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

Для нотаток