

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича

В.Г. Дейбук, О.В. Деревянчук, Г.О. Кравченко

Віртуальний електронний практикум

Навчальний посібник



Чернівці
Чернівецький національний університет
2021

УДК 004.94:621.3.001.7 (075.8)

ББК 32.973.2:31.211–02я73

Д 279

Затверджено до друку
Вченою Радою Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
Протокол № 12 від 21.12.2020 р.

Рецензенти:

Виклюк Я.І., доктор технічних наук, професор, проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків Буковинського університету;

Федів В.І., доктор фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри біологічної фізики та медичної інформатики Буковинського державного медичного університету.

Дейбук В.Г., Деревянчук О.В., Г.О. Кравченко
Д 279 Віртуальний електронний практикум: Навчальний посібник / В.Г. Дейбук, О.В. Деревянчук, Г.О. Кравченко. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2021. – 188 с.

ISBN 978-966-423-622-2

Навчальний посібник містить основні відомості про систему схемотехнічного моделювання *Multisim*, рекомендації щодо технології підготовки та створення електронних схем, завдання до 20 лабораторних робіт. Для студентів, що навчаються за напрямом «Інформаційні технології», «Освіта», а також неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів усіх форм навчання.

УДК 004.94:621.3.001.7 (075.8)

ББК 32.973.2:31.211–02я73

ISBN 978-966-423-622-2

© Дейбук В.Г., Деревянчук О.В.,
Кравченко Г.О. 2021
© Чернівецький національний
університет, 2021

Зміст

Передмова	5
Вступ	
Мета та огляд курсу	6
Electronics Workbench та Multisim.....	6
Розділ I. Опис схем	
1.1. Середовище Multisim	8
1.2. Компоненти	13
1.3. Зуєв, поворот, вибір і з'єднання компонентів.	18
1.4. Додаткові опції.....	21
Розділ II. Емулювання	
2.1. Огляд та моделі.	31
2.2. Використання інтерактивного емулятора	32
2.3. Обробка помилок емуляції.....	33
2.4. Віртуальні пристрої.....	35
2.4.1. Мультиметр	36
2.4.2. Генератор сигналів	36
2.4.3. Осцилографи	37
2.4.4. Плотер Боде.....	39
2.4.5. Спектральний аналізатор	39
2.5. Прилади NI LabVIEW	40
2.6. Аналіз даних емуляції.....	42
2.7. Плотер.....	43
2.8. Створення компонентів.....	46
Розділ III. Інтеграція з National Instruments	
3.1. Огляд	48
3.2. Lab VIEW.....	48
3.3. Signa IExpress.....	49
3.4. ELVIS.....	50
3.5. Створення прототипів	51
3.6. Пошук несправностей	55
Розділ IV. Лабораторний практикум	
Лабораторна робота № 1	
Ознайомлення з програмою моделювання електричних та електронних кіл Multisim	57

Лабораторна робота № 2	
Змішане з'єднання опорів.....	59
Лабораторна робота № 3	
Робота джерела ЕРС у генераторному та акумуляторному режимах	65
Лабораторна робота № 4	
Експериментальна перевірка законів Кірхгофа	72
Лабораторна робота № 5	
Метод накладання.....	77
Лабораторна робота № 6	
Коло постійного струму зі змінним опором навантаження.....	82
Лабораторна робота № 7	
Вивчення перехідних процесів зарядки та розрядки конденсатора ..	88
Лабораторна робота № 8	
Послідовне RC -з'єднання у колі синусоїдного струму	94
Лабораторна робота № 9	
Послідовне RL -з'єднання у колі синусоїдного струму.....	99
Лабораторна робота № 10	
Послідовне LC -з'єднання. Резонанс напруг	104
Лабораторна робота № 11	
Паралельне RC -з'єднання у колі синусоїдного струму	110
Лабораторна робота № 12	
Паралельне RL -з'єднання у колі синусоїдного струму.....	115
Лабораторна робота № 13	
Паралельне LC -з'єднання у колі синусоїдного струму	120
Лабораторна робота № 14	
Вивчення роботи однофазного трансформатора.....	125
Лабораторна робота № 15	
Вивчення спектрів періодичних негармонічних сигналів.....	131
Лабораторна робота № 16	
Аналіз лінійного кола періодичного несинусоїдного струму.....	138
Лабораторна робота № 17	
Аналіз перехідних режимів у лінійних електричних колах.....	144
Лабораторна робота № 18	
Дослідження випрямляючих пристроїв та фільтрів	149
Лабораторна робота № 19	
Дослідження двокаскадного транзисторного підсилювача.....	175
Лабораторна робота № 20	
Дослідження операційного підсилювача зі зворотними зв'язками ..	184

Передмова

Розробка будь-якого електронного пристрою супроводжується математичним або фізичним моделюванням. З великими матеріальними витратами пов'язане фізичне моделювання, оскільки передбачає виготовлення макетів, стендів і відповідні трудомісткі дослідження. Часто фізичне моделювання неможливе через надзвичайну складність пристрою, наприклад, при розробці великих і надвеликих інтегральних мікросхем. У таких випадках вдаються з використанням засобів і методів обчислювальної техніки до математичного моделювання. На даний час відомо багато комп'ютерних пакетів програм для моделювання різноманітних електронних процесів і пристроїв (*PCAD, ORCAD, Micro Cap, Electronics Workbench* та ін.).

Запропонований навчальний посібник має на меті допомогти студентам самостійно оволодіти основами комп'ютерного моделювання основних електротехнічних та електронних пристроїв на базі популярної системи автоматизованого проектування *Multisim*. Наявність спеціальної літератури, технічної документації, різноманітних рекомендацій та посібників не забезпечують у повному обсязі самостійну роботу студентів вищої школи з дисциплін електротехнічного циклу. Тому видання даного навчального посібника заповнює наявну прогалину в методичному забезпеченні таких навчальних дисциплін як «Електротехніка», «Основи електротехніки та електроніки», «Теорія електричних кіл» та ін.

Посібник складається з чотирьох розділів. Перший містить опис системи *Multisim*. У другому розділі подано рекомендації щодо технології підготовки та створення електронних схем. У третьому розділі наведено інтеграцію з *National Instruments*. Четвертий розділ містить завдання до двадцяти лабораторних робіт, питання для самоконтролю та список рекомендованої літератури.

Вступ

Мета та огляд курсу

У перших трьох розділах подано огляд основних особливостей Multisim. Ви зможете розібратись з інтерфейсом користувача, засобами вводу та імітації схем. Також ви дізнаєтесь про можливості Multisim у розробці друкованих плат.

Посібник складається з кількох розділів, у кожному з яких запропоновані вправи для закріплення тем. У додатку містяться вказівки з інтеграції Multisim з іншими додатками National Instruments для створення єдиної платформи розробки і тестування.

Electronics Workbench

Electronics Workbench – це лідер на міжнародному ринку з розробки програмних забезпечень для проектування схем, які мають найбільший попит і використовуються у всьому світі. Компанія володіє більше ніж 15-річним досвідом автоматизації проектування електронних приладів і була однією з піонерів комп'ютерної розробки електроніки. У наш час обладнання Electronics Workbench використовується більше як на 180 тисячах робочих місць.

У комплект продуктів Electronics Workbench входять засоби для опису електронних схем, їх емуляції (SPICE, VHDL), а також для розробки й автоматичного трасування друкованих плат.

Користувачі отримують унікальні продукти, прості у використанні та інтегруванні. Майстер підтримки і оновлення (SUU – Support and Upgrade Utility) автоматично перевіряє і встановлює через мережу необхідні оновлення, постійно забезпечуючи найвищий рівень роботи вашого ПЗ.

Продукція Electronics Workbench і National Instruments – це найбільш тісна інтеграція між засобами розробки, перевірки і тестування САПР електронних засобів, які наявні на даний час.

Electronics Workbench – це дочірня компанія, яка повністю володіє National Instruments Corporation (NASDAQ: NATI). Для більш детальної інформації про NI, відвідайте www.ni.com.

Штаб-квартира Electronics Workbench розміщена в Торонто (Канада), офіс продаж і обслуговування розміщений в Європі, Азії та Південній Америці. Безліч висококваліфікованих технічних посередників пропонують купівлю й обслуговування в 35 країнах світу.

Multisim

Multisim – це інтерактивний емулятор схем, він дозволяє вам створювати кращі пристрої за мінімальний проміжок часу. Multisim включає в себе версію Multicap, що робить його ідеальним засобом для негайного наступного тестування і програмного опису схем. LabVIEW і **Signa IExpress** виробництва National Instruments для тісної інтеграції засобів тестування і розробки також підтримує взаємодію з Multisim.

Розділ I. Опис схеми

1.1. Середовище Multisim

Multisim – це унікальна можливість розробки схеми та її емуляції з одного середовища розробки. Такий підхід має багато переваг. Початківцям у Multisim не потрібно перейматися складністю синтаксису SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis – програма емуляції з вбудованою обробкою схем) та її команд, а в досвідчених користувачів є можливість налаштування усіх параметрів SPICE.

Завдяки Multisim опис схеми став простим і зрозумілим. Змінювати характеристики будь-якої кількості елементів дозволяє одночасно показ у вигляді електронної таблиці: від схеми друкованої плати (PCB = PBC???) до моделі SPICE. Безрежимне редагування – це ефективний спосіб з'єднання і розміщення компонентів. Інтуїтивно просто і зрозуміло працювати з цифровими і аналоговими складовими елементів.

Multisim дозволяє користувачам, окрім традиційного аналізу SPICE, підключати до схеми віртуальні прилади. Простий і швидкий спосіб побачити результат за допомогою імітації реальних подій – концепція віртуальних інструментів.

Також у Multisim є спеціальний компонент під назвою «інтерактивні елементи» (interactive parts), які можна змінювати під час емуляції. До інтерактивних елементів відносяться перемикачі, потенціометри. Найменші зміни елемента одразу відображаються в імітації.

За необхідності більш складного аналізу, Multisim пропонує більше 15 різноманітних функцій аналізу. Деякі приклади включають використання змінного коду Монте-Карло, аналіз найбільш несприятливих умов і Фур'є-аналіз. До Multisim входить Grapher – потужний засіб перегляду і аналізу даних емуляції.

Допоможуть будь-якому розробнику схем заощадити час і уникнути помилок на усьому шляху розробки схеми функції опису і тестування схеми, що представлені в Multisim.

Вступ до Multisim

Інтерфейс користувача складається з кількох основних елементів, які показані на рис. 1.1.

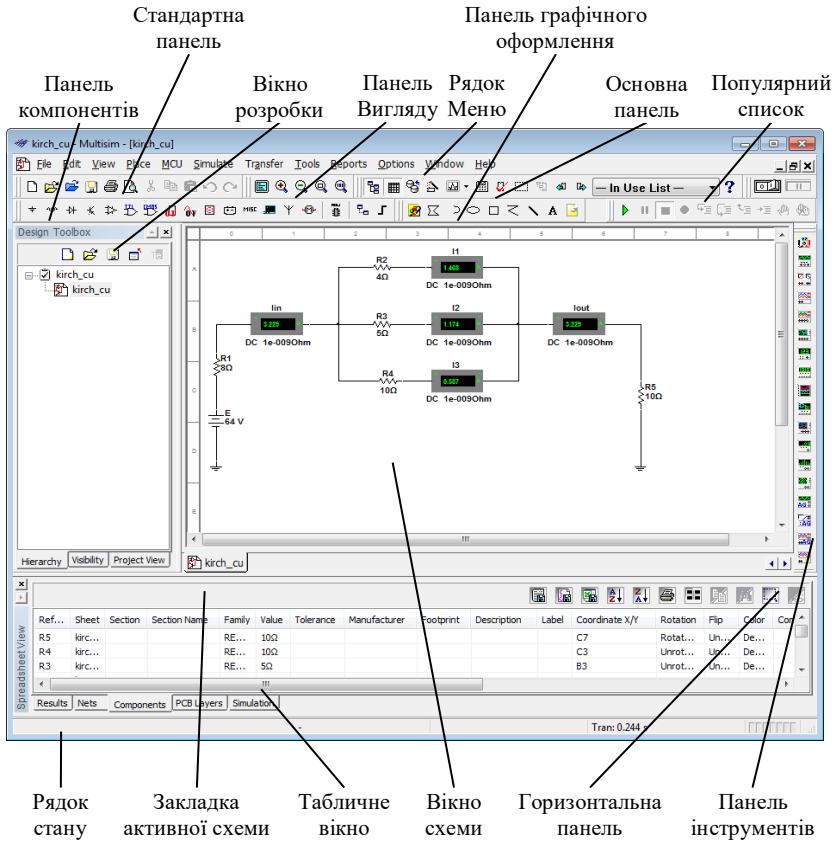


Рис 1.1. Середовище Multisim

Вікно розробки (Design Toolbox)

Засоби керування різними елементами схеми знаходяться у вікні розробки. Закладка «Доступність» (Visibility) дозволяє приховувати або відображати шари схеми робочої області.

Закладка «Ієрархія» (Hierarchy) відображає взаємодію між файлами відкритого проекту у вигляді структури дерева. Закладка «Проект» (Project) містить інформацію про проект. Користувач може додати файли в папки відкритого проекту, змінювати доступ до файлів і створювати архів проекту.

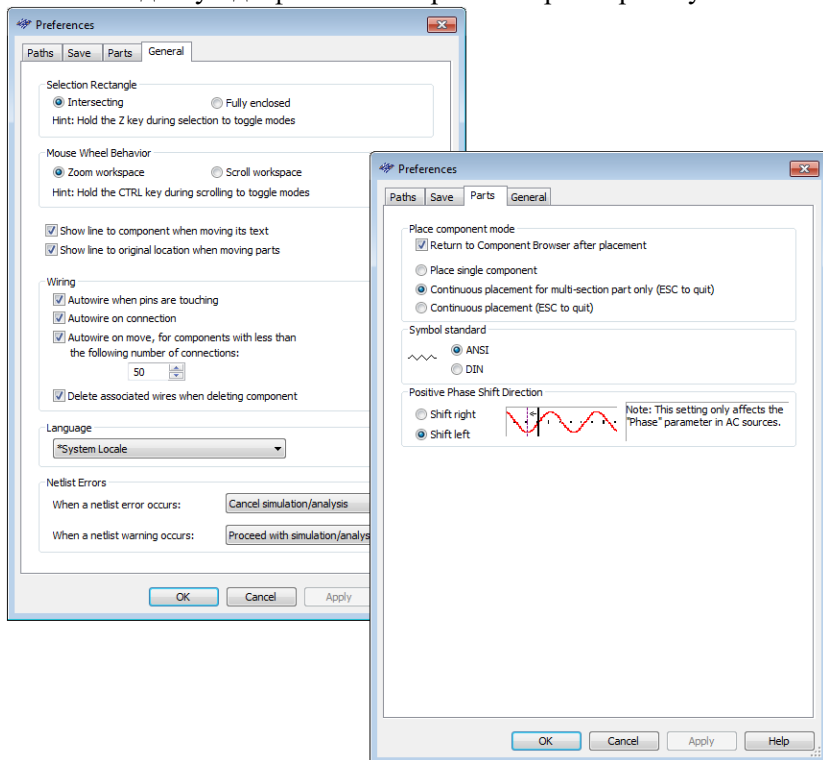


Рис. 1.2. Різні глобальні налаштування

Глобальні налаштування

Властивостями середовища Multisim керують глобальні налаштування. З діалогового вікна «Властивості» (Preferences) відкривається доступ до них. Вибір пункту Опції/глобальні налаштування (Options/Global Preferences) відкриє вікно «Властивості» з наступними закладками:

- Paths (Шлях) – тут можна вказати шлях до файлів бази даних та інші налаштування;
- Save (Зберегти) – тут можна вказати/налаштувати період автоматичного збереження і, в разі потреби, разом з приладом, записувати дані емуляції;
- Parts (Компоненти) – тут знаходяться налаштування емуляції за замовчуванням та можна вибрати режим розміщення компонентів і стандарт символів (ANSI або DIN).
- General (Загальні) – тут можна змінити поведінку прямокутника вибору та інструментів з'єднань.

Налаштування аркуша

Діалогові вікна «Властивості аркуша» (Sheet Properties) використовуються для налаштування властивостей кожного аркуша. Ці властивості зберігаються з файлом схеми, і налаштування не змінюються, якщо проект відкривається на іншому комп'ютері.

Налаштування аркуша згруповані в наступні закладки:

- Circuit (Схема) – тут можна вибрати кольорову схему і зовнішній вид тексту робочої області;
- Workspace (Робоча область) – тут ви можете налаштувати розмір і властивості аркуша;
- Font (Шрифт) – тут можна обрати шрифт, розмір та нариси для текстових елементів схеми;
- Wiring (З'єднання) – тут знаходяться налаштування з'єднань і шини;
- Visibility (Доступність) – тут можна відобразити або приховати додаткові шари коментарів;
- PCB (Друкована плата) – тут знаходяться налаштування друкованої плати.

У вказівках користувача Multisim (Multisim User Guide) або в файлі довідника Multisim (Multisim helpfile) можна переглянути детальний опис кожної властивості аркуша.

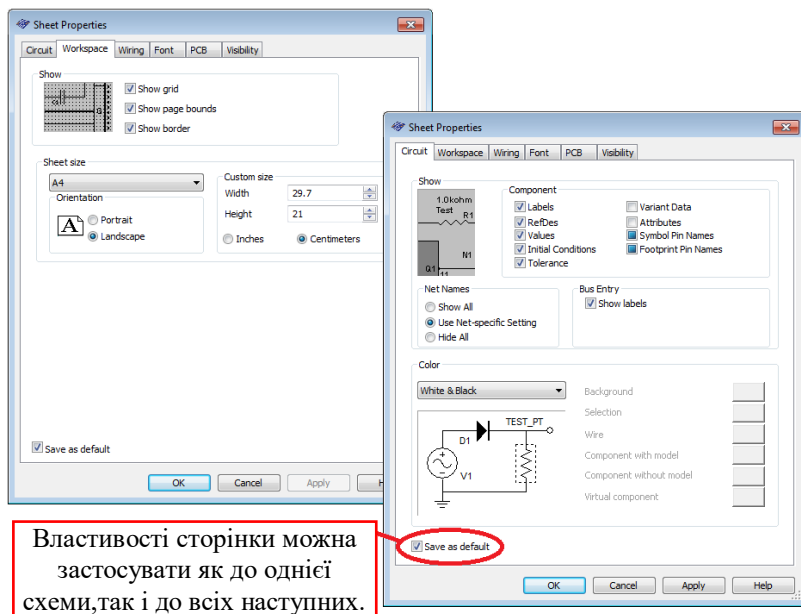


Рис. 1.3. Властивості аркуша

Налаштування інтерфейсу користувача

Інтерфейс користувача Multisim можна налаштувати індивідуально. Панель інструментів можна закріпити в будь-якому місці й змінити їх форму. Інструменти усіх панелей також можна змінювати і створювати нові. При потребі, система меню повністю налаштовується до контекстних меню різних об'єктів.

Можна теж налаштувати «гарячі» клавіші клавіатури. Можна призначити свою клавішу в будь-якій команді меню або панелі інструментів.

До речі: радимо призначити комбінацію клавіш (наприклад Ctrl-E), щоб з командами інтерактивних елементів не перетиналися клавіші,.

Для налаштування інтерфейсу користувача виберіть пункт Опції/Налаштування інтерфейсу користувача (Options/Customize User Interface). Ви можете створювати та змінювати

панель інструментів, призначати «гарячі» клавіші, налаштовувати і створювати нове меню, а також змінювати стиль інтерфейсу користувача за допомогою діалогового вікна «Налаштування» (Customize).

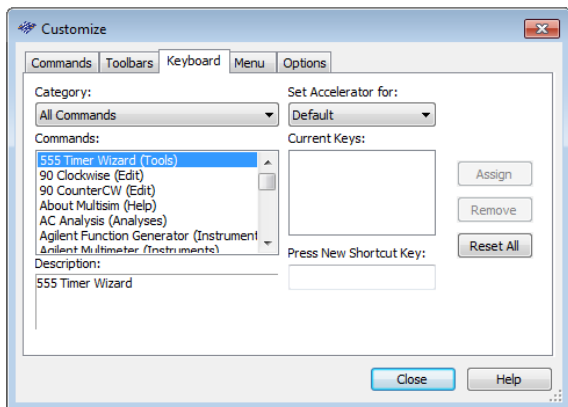


Рис. 1.4. Діалогове вікно «Налаштування»

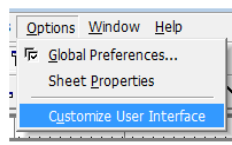


Рис. 1.5.
Налаштування меню

1.2. Компоненти

Огляд компонентів

Компоненти – це основа будь-якої схеми, це усі елементи, з яких вона складається. Multisim оперує двома категоріями компонентів: реальним (real) і віртуальним (virtual). Необхідно усвідомити різницю між ними, щоб у повному обсязі використовувати їх переваги.

У реальних компонентів, на відміну від віртуальних є визначене, незмінне значення та своя відповідність на друкованій платі.

Користувач може призначити довільні параметри віртуальним компонентам, які потрібні тільки для емуляції. Наприклад, опір віртуального резистора може бути довільним, навіть 3,86654 Ом. Під час перевірки схем з відомим значенням компонентів віртуальні компоненти допомагають розробникам. Віртуальні компоненти також можуть не співпадати з реальними,

наприклад, 4-х контактний елемент відображення шістнадцяткових цифр, показаний на рис. 1.6.

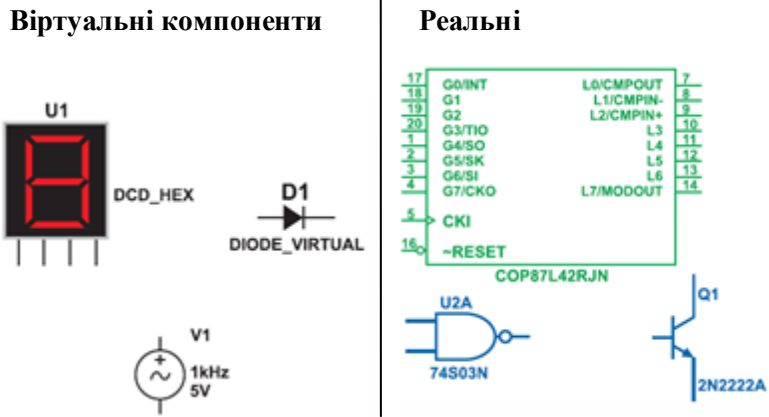


Рис. 1.6. Символи різних компонентів:

7-сигментичний дисплей, діод D1, джерело напруги V1, логічні елементи І-НЕ U2A, мікроконтролер U3 і транзистор Q1.

Є й інша класифікація компонентів у Multisim: цифрові, аналогові, анімовані, інтерактивні, змішані, цифрові з мультівібратором, електромеханічні і радіочастотні.

Інтерактивні компоненти

На дії користувача можуть реагувати деякі елементи схеми Multisim. Одразу відображається на результатах емуляції зміна цих елементів. Компоненти керуються за допомогою клавіш, вказаних під кожним елементом.

Наприклад, наведено декілька компонентів на рис. 1.7: клавіша А збільшить опір потенціометра до 100% від указаної величини (1 кОм). Щоб зменшити опір, натисніть Shift+A. Пробіл відкриває або закриває перемикач на правому рисунку.

Можна вибрати «гарячу» клавішу наступним чином: при подвійному клацанні миші відкриється вікно, у випадяючому меню.

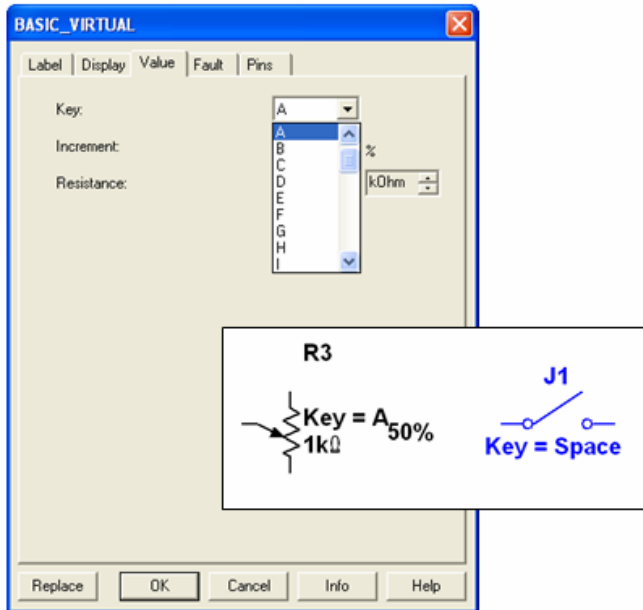


Рис.1.7. Приклади інтерактивних компонентів

Характеристики компонентів

У провіднику компонентів відображаються наступні поля:



Рис. 1.8. Вкладка «Елементи» (Parts) або панель інструментів «Компоненти» (Component)

Провідник компонентів

Провідник компонентів (Component Browser) – це місце, де обирають компоненти, щоб розмістити їх на схемі. «Гарячі» клавіші за замовчуванням для розміщення компонента – Ctrl+W або подвійним натисканням миші. Курсор миші оберне форму компонента, поки ви не виберете місце на схемі для компонента.

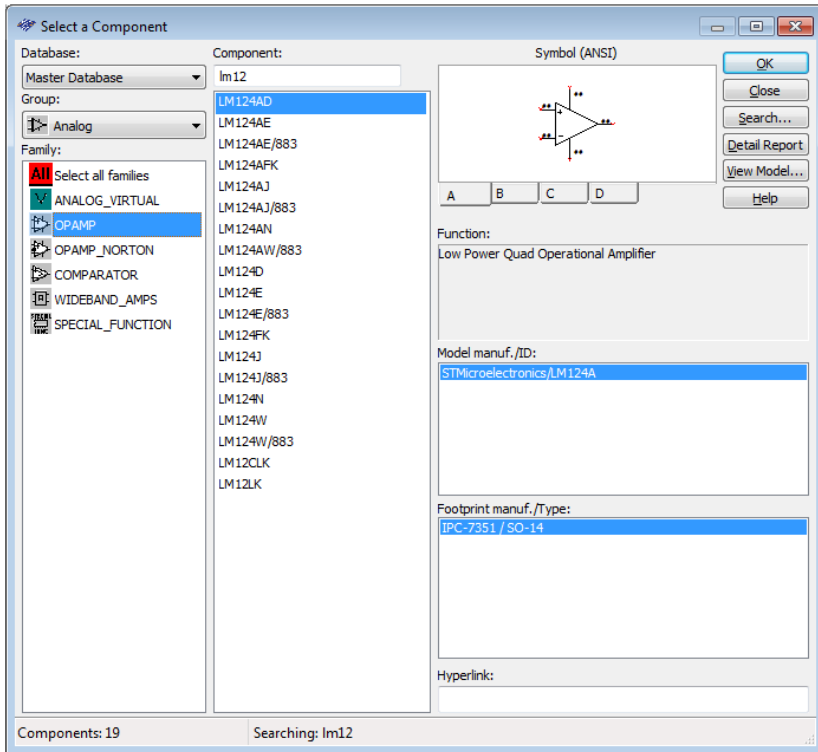


Рис. 1.9. Провідник компонентів

Для пошуку набиріть назву компонента і провідник автоматично підбере необхідний елемент. Кнопка «Пошук» (Search) відкриває розширений пошук.

У провіднику компонентів відображається існуюча база даних, в якій зберігаються відображені елементи. У Multisim вони організовані у сімейства (families) та групи (groups). Відображається також у провіднику опис компонента (поле «Призначення» Function), виробник або модель і друкована плата.

Будь-який набір символів замінює символ зірка ("*"). Наприклад, серед результатів запиту "LM*AD" будуть "LM101AD" і "LM108AD".

Бази даних

Multisim містить бази даних трьох рівнів

- З головної бази даних (Master Database) можна тільки зчитувати інформацію, у ній знаходяться компоненти Electronics Workbench;
- Користувачка база даних (User Database) призначена для зберігання компонентів, які надавати в загальний доступ небажано;
- Корпоративна база даних (Corporate Database) призначена для тих компонентів, які повинні бути доступними іншим користувачам мережі.

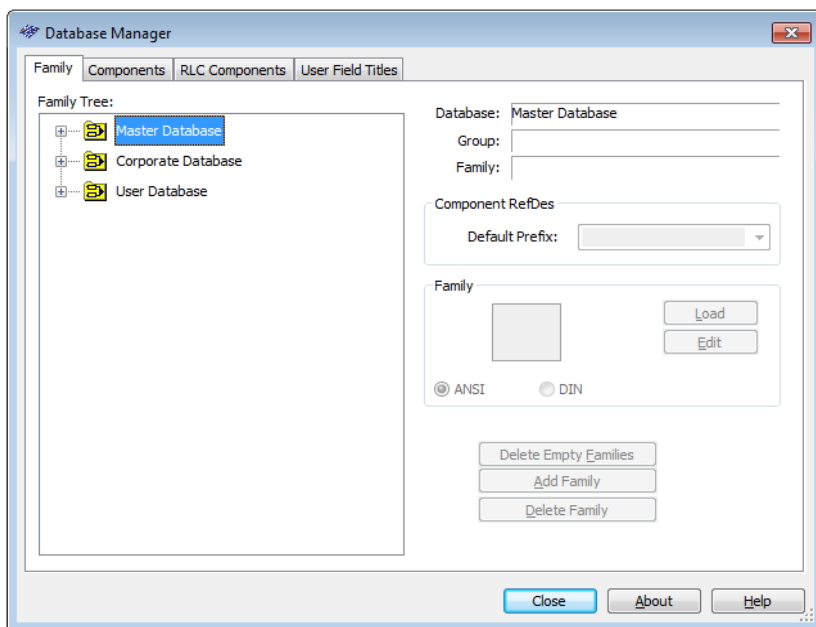


Рис. 1.10. Провідник баз даних

Засоби керування базами даних дозволяють, об'єднувати дві бази в одну, редагувати їх, переміщувати компоненти. Усі бази даних поділяються на групи, а вони – на сімейства. Коли користувач обирає компонент і розміщує його в схему, створюється нова копія.

Якщо змінити компонент у базі даних, то існуюча копія компонентів залишиться такою ж. Зміни торкнуться нових компонентів цього типу. Під час збереження схеми вся інформація про компоненти зберігається в файлі Multisim. При загрузці користувач може залишити завантажені елементи у незмінному вигляді або оновити компоненти даними бази з аналогічними назвами. На примітку: щоб відкрити провідник баз даних, виберіть Інструменти/База даних/Провідник баз даних (Tools/Database/ Database Manager); щоб редагувати елементи провідника, скопіюйте їх у користувацьку або корпоративну базу даних.

1.3. Зсув, поворот, вибір і з'єднання компонентів

Зсув, поворот і виділення

Вони розміщуються на схемі і з'єднуються між собою після вибору компонентів з бази даних. Подвійне натискання по компоненту в провіднику прикріплює його до курсору.

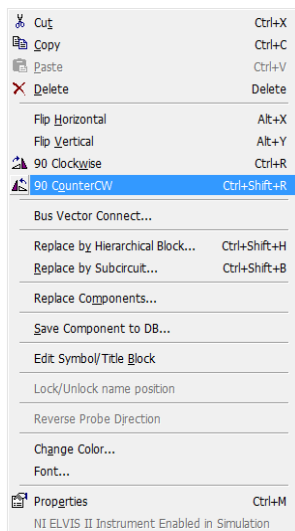


Рис. 1.11. Поворот компонента

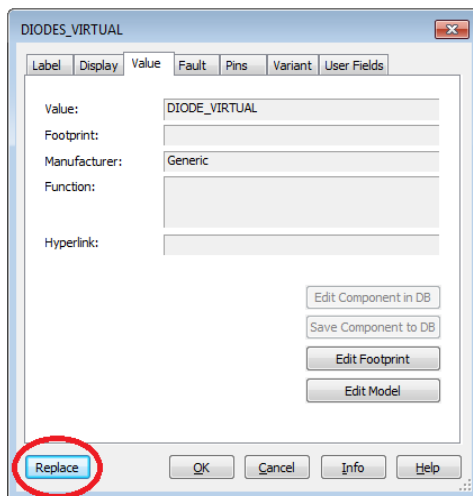


Рис. 1.12. Заміна компонентів

Натиснувши в бажаному місці, можна помістити елемент на схему. Після установки компонента і у цей час, його можна повернути. Щоб це зробити, в першу чергу натисніть Ctrl+R. Щоб повернути установлений компонент, виділіть його і натисніть Ctrl+R або виберіть повернути за або проти годинникової стрілки на 90° у контекстному пункті.

Просто клацніть по ньому мишею, щоб вибрати компонент. Притисніть кнопку миші для вибору декількох компонентів і переміщуйте її, малюючи навколо потрібних компонентів прямокутник вибору. Будуть позначаються пунктирною лінією вибрані компоненти. Вибирати можна окремі елементи, наприклад мітку або значення компонента. Одним клацанням миші по потрібному елементу здійснюється вибір.

Додавати або знімати виділення з декількох компонентів дозволяє клавіша Shift.

За допомогою контекстного меню можна замінювати компоненти на інші, пункт «Замінити компонент(и)» (Replace Component(s)). Нові компоненти вибираються у щойно відкритому додатковому вікні провідника компонентів. З'єднання компонентів після заміни відновиться.

З'єднання

У Multisim використовується безрежимний принцип роботи: дія мишкою залежить від положення курсору, вибрати інструмент або режим немає необхідності під час роботи в Multisim. В залежності від того, на який об'єкт наведений курсор, він змінює свій вигляд. На рис. 1.13. наведені різні види курсору.

Коли курсор розміщений над терміналом (terminal) або роз'ємом (pin) компонента, його з'єднати лівим клацанням миші можна. Коли курсор розміщений поряд з роз'ємом або терміналом і над існуючим проводом, з'єднання можна легко змінити.

Натисніть по роз'єму, щоб почати вести з'єднуючий провід, натисніть по кінцевому терміналу, щоб завершити з'єднання.

Після появи провідника Multisim автоматично надайте йому номер у мережі. Номер збільшується послідовно, починаючи з 1. Заземлюючі провідники завжди мають номер 0 – ця вимога пов'язана з роботою прихованого емулятора SPICE. Щоб надати

йому логічне ім'я, або змінити номер з'єднання просто двічі натисніть по провіднику (рис. 1.14).

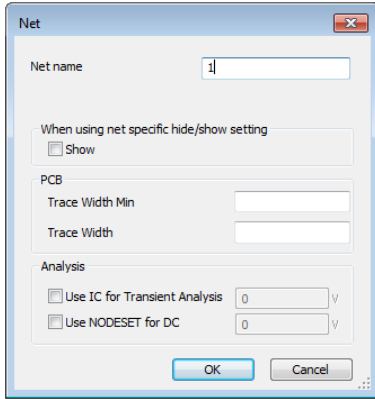


Рис. 1.13. Властивості з'єднання

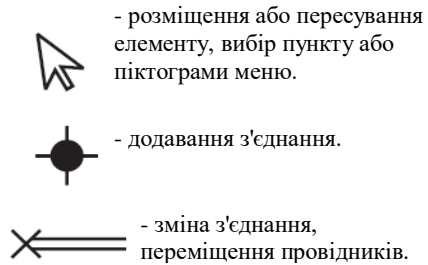


Рис. 1.14. Безрежимний курсор миші

Автоз'єднання роз'ємів дотиком

Є у Multisim функція автоматичного з'єднання виходів між собою з провідниками. Щоб додати компонент до існуючої мережі з'єднань, потрібно щоб його виводи торкалися існуючої мережі.

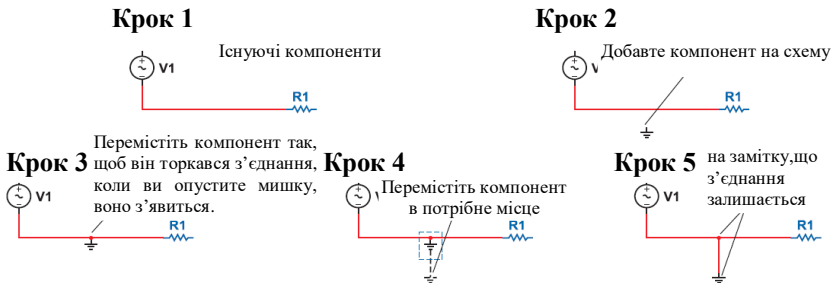
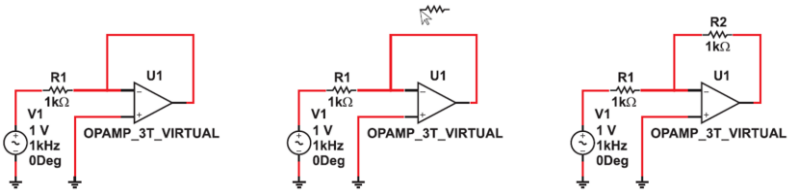


Рис. 1.15. Автоматичне з'єднання дотиком

Додавання в авторозрив

У Multisim є можливість вставити компонент у середину існуючої мережі з'єднань. Просто роташуюте для цього елемент паралельно до провідника (рис. 1.16).



Крок 1 Потрібно вставити компонент.

Крок 2 Помістити компонент паралельно до провідника

Крок 3 Компонент вставляється автоматично

Рис. 1.16. Автоставка компонентів

1.4. Додаткові опції

Майстри з'єднань

У Multisim є декілька майстрів з'єднань, які допомагають розробникам швидко створювати схеми із заданими параметрами. Список майстрів з'єднань наведений на рис. 1.17. В меню Інструменти/Майстри з'єднань (Tools/Circuit Wizards) вони знаходяться.

«Майстер таймерів» (555 Timer Wizard) дозволяє створювати нестабільні та моностабільні осцилятори за допомогою таймера 555.

У «Майстрі фільтрів» (Filter Wizard) простим вводом параметрів створюються фільтри в Multisim.

Майстер підсилювачів із загальним емітером на біполярному площинному транзисторі (Common Emitter BJT Amplifier Wizard) допомагає створити підсилювач із загальним емітером і заданими параметрами. MOSFET (канальний польовий уніполярний МОП-транзистор) підсилювач створюється відповідним майстром (MOSFET Amplifier Wizard).



Рис. 1.17. Майстри з'єднань

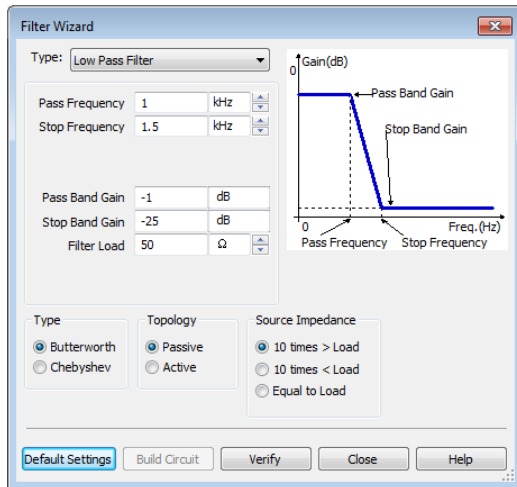


Рис. 1.18. Діалогове вікно майстра фільтрів (Filter Wizard)

Є декілька схем з операційними підсилювачами у Multisim. У полях «Майстра ОП» (Op-Amp Wizard) потрібно ввести необхідні параметри:

- Інвертований підсилювач;
- Неінвертований підсилювач;
- Диференційний підсилювач;
- Інвертований сумуючий підсилювач;
- Неінвертований сумуючий підсилювач;
- Масштабований суматор.

Перевірка правил електротехніки (ERC)

У результаті перевірки правил електротехніки (Electrical Rules Check) генерується звіт з детальною інформацією про помилки (наприклад, вихідний роз'єм з'єднаний із роз'ємом живлення) і не з'єднані роз'єми. Після з'єднання усіх елементів перевірте схему, користуючись правилами в діалоговому вікні ERC.

У залежності від схеми, вам можуть знадобитися попередження про визначені типи з'єднань, помилки у випадку наявності інших та ОК для усіх інших. На закладці «Правила

ERC» (ERC Rules) в діалоговому вікні Electrical Rules Check установлюється тип з'єднань і повідомлень.

Можна виконати перевірку усієї схеми або певної ділянки. Під час перевірки, усі некоректності відображаються в панелі результатів у нижній частині екрану, відображаючи маркери на схемі. При натисканні на помилку екран збільшує масштаб і центрується на ній.

«Правила перевірки» (ERC Rules) і закладки «Опції перевірки» (ERC Options) призначені для налаштувань. Для початку перевірки: виберіть пункт Інструменти/Перевірка правил електротехніки (Tools/Electrical Rules Check), відкриється вікно «Перевірки» (Electrical Rules Check).

Налаштуйте параметри звіту на закладці «Опції перевірки» (ERC Options) (рис. 1.19).

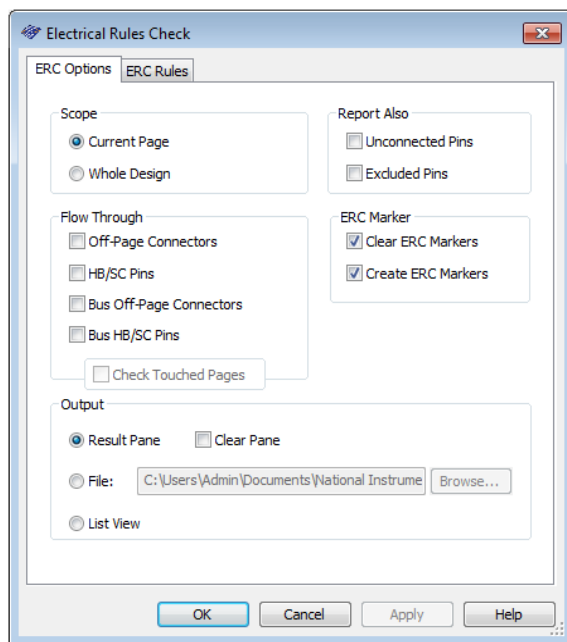


Рис. 1.19. Закладка налаштування перевірки

Установіть параметри перевірки на закладці «Правила перевірки» (ERC Options) (рис. 1.20).

Натисніть ОК. Формат відображення результатів встановлюється в розділі «Результати» (Output) на закладці ERC Options.

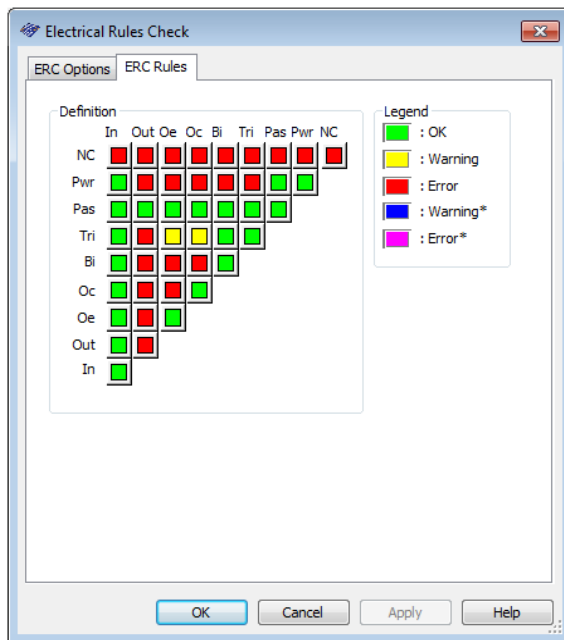


Рис. 1.20. Правила перевірки

Підсхеми та ієрархічні блоки

Multisim – призначений також для роботи зі схемами різної складності. При створенні модульної структури схеми й абстрагування складних схем слугує концепція декількох аркушів (multi-sheet design), підсхеми (ПС, sub-circus - SC) та ієрархічні блоки (ІБ, hierarchical blocks - HB).

Підсхеми корисні тим, що можна зробити схему більш компактною та зберігати її в той час в одному файлі. Ієрархічні блоки підходять краще при використанні в декількох схемах, при цьому що вони зберігаються в різних файлах.

Підсхеми та ієрархічні блоки функціонально не відрізняються один від одного, єдина різниця між ними – це спосіб зберігання на диску.

Існують два способи зробити ієрархічний блок або підсхему. Перший: виділити частину схеми і вибрати пункт Розмістити/Роз'єми/ІБ/Роз'єм ПС (Place/Connectors/ІВ/SC Connector). Нижче описаний другий метод.

Новий ієрархічний блок (другий метод):

1. Виберіть Розмістити/Новий ієрархічний блок (Place/New Hierarchical Block) і вкажіть ім'я файлу.
2. Кнопка «Огляд» (Browse) дозволяє вибрати шлях та ім'я для збереження файлу ієрархічного блоку.
3. Введіть необхідне число вхідних і вихідних роз'ємів та натисніть ОК. З'явиться «невняний» образ нового ієрархічного блоку, виберіть його місцезнаходження і натисніть мишею.
4. Двічі натисніть по новому блоку та виберіть «Редагувати ІБ/ПС» (Edit ІВ/SC) у діалоговому вікні, що відкриється Ієрархічний блок/Підсхема (Hierarchical Block/Subcircuit).

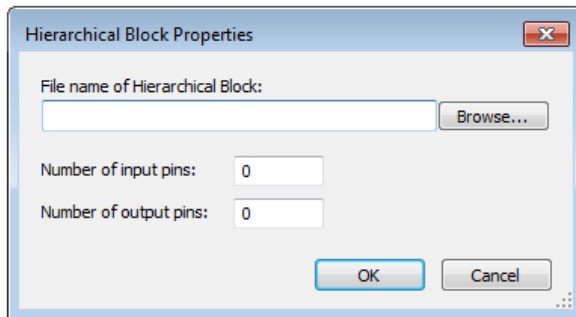


Рис. 1.21. Діалогове вікно властивостей ієрархічного блоку

5. Розмістіть та з'єднайте компоненти нового ієрархічного блоку.

6. З елементами схеми з'єднайте ІБ.

7. Збережіть схему.

Щоб додати ІБ з файлу, виберіть пункт Розмістити/Ієрархічний блок з файлу (Place/Hierarchical Block from file) і повторіть дії.

Додавання нової підсхеми (другий метод):

1. Виберіть пункт Розмістити/Нову підсхему (Place/New Subcircuit). Відкриється вікно Ім'я підсхеми (SubcircuitName).

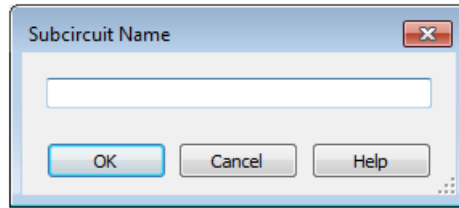


Рис. 1.22. Діалогове вікно імені підсхеми

2. Введіть необхідне ім'я для схеми, наприклад «джерело живлення» і натисніть ОК. Курсор прийме вигляд «нааявної» схеми, показуючи, що можна розмістити її.

3. Натисніть на потрібне місце для схеми (Ви можете її перемістити пізніше, за необхідності). На схемі з'явиться підсхема у вигляді вікна з указаним іменем підсхеми.

4. Двічі натисніть по новій підсхемі і виберіть Редагувати ІБ/ПС (Edit HB/SC). З'явиться порожнє вікно підсхеми у діалоговому вікні Ієрархічний блок/ Підсхема (Hierarchical Block/Subcircuit).

5. Компоненти нової підсхеми розмістіть і з'єднайте.

6. Виберіть пункт Розмістити/Роз'єми/ІБ/Роз'єм ПС (Place/Connectors/HB/SC Connector), новий роз'єм помістіть і з'єднайте. Розмістіть усі необхідні роз'єми. Коли ви повернетесь до основної схеми, на піктограмі підсхеми будуть усі додані роз'єми.

7. З'єднайте підсхему з іншими компонентами.

Заміна компонентів підсхемами або ієрархічними блоками.

У Multisim можна замінити існуючі компоненти підсхемами або ієрархічними блоками. Виберіть потрібний компонент, який відповідає по вигляду необхідній підсхемі і замініть його на ІБ: пункт Розмістити/Замінити ієрархічним блоком (Replace/Place by Hierarchical Block) або Замінити/Розмістит підсхемою (Replace/Place by Subcircuit).

Подання у вигляді таблиці

Загальне уявлення про властивості об'єктів дозволяє отримати таблиця.

Це більш популярний засіб редагування та перегляду параметрів, включаючи детальну інформацію про компоненти: мітку, схему, параметри й обмеження конструкції (design constraints).

За допомогою таблиці можна змінити одразу декілька компонентів. Елементи можна відсортувати у будь-якому стовпчику у спадаючому або у зростаючому порядку. Також ви можете експортувати дані таблиці в Microsoft Excel для звіту.

Звіти у схемі

У Multisim можна зробити декілька різних звітів: «Список матеріалів» (Bill of Materials BOM), «Статистика схеми» (Schematic Statistics), «Звіт про з'єднання» (Netlist Report), «Незадіяні елементи» (Spare Gates) та «Звіт перехресних посилань» (Cross Reference Report), «Детальний звіт про компоненти» (Component Detail Report). У списку матеріалів наведені всі реальні компоненти схеми, це список тих елементів, які потрібні для виготовлення схеми.

Також міститься наступна інформація у списку матеріалів:

- Мітка кожного компонента;
- Кількість кожних елементів;
- Пакування чи схема кожного компонента (package або footprint);
- Опис, що включає тип (наприклад, резистор) і значення (наприклад, 5,1 кОм).

У детальному звіті про компоненти (Component Detail Report) представлена вся інформація з бази даних Multisim для певного компонента.

Звіт про з'єднання (Netlist Report) включає наступну інформацію для кожного з'єднання:

- Сторінка (ім'я файлу);
- Роз'єм (логічне ім'я роз'єму);
- Ім'я з'єднання.

Звіт про перехресні посилання (Cross Reference Report) – це детальний перелік усіх компонентів і їх розміщення на схемах.

Статистика схеми (Schematic Statistics Report) - це кількісний опис схеми:

- Компоненти – повне число віртуальних і реальних компонентів;
- Реальні компоненти – компоненти, які можна купити;
- Віртуальні компоненти – компоненти, які не можна купити;
- Вентилі (Gates) - повна кількість вентилів у схемі;
- Вузли - повна кількість з'єднань між роз'ємами;
- З'єднаних роз'ємів;
- Сторінок;
- Нез'єднаних роз'ємів;
- Повне число роз'ємів - кількість з'єднаних і без роз'ємів;
- Ієрархічних блоків - повна кількість ієрархічних блоків, включаючи копії;
- Унікальних ієрархічних блоків - повна кількість унікальних ієрархічних блоків;
- Total number of hierarchical blocks, unique or other wise. Кількість примірників (Instances) блоку дорівнює кількості його копій на схемі;
- Унікальних підсхем;
- Підсхем - повна кількість підсхем, включаючи копії.

Звіт про елементи, що незадіяні (Spare Gates Report) є списком вентилів, що не використовуються (gates) або багатосекційних компонентів.

Примітка: є оптимізатор вентилів (gate optimizer) у Multisim, який автоматично зводить багатосекційні компоненти до мінімального числа мікросхем. Щоб запустити його, виберіть пункт меню Інструменти/Перейменувати/Перенумерувати компоненти (Tools/Rename/Renumber Components) і запустити «Оптимізатор вентилів» (Gate Optimizer).

Графічні анотації

У Multisim є засоби для графічного оформлення вашої схеми. На панелі графічних анотацій (Graphic Annotation) є наступні

елементи: еліпси, дуги, текст, лінії, полілінії, прямокутники, багатокутники, компоненти та картинки. Щоб додати графічний елемент, не використовуючи панель інструментів, у контекстному меню виберіть пункт «Додати графічний об'єкт» (Place Graphic).

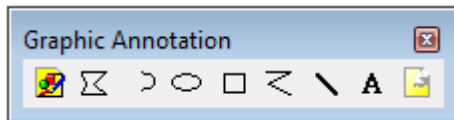


Рис. 1.23. Панель графічних анотацій

Вікно опису схеми

Можна додати текст не тільки в певне місце схеми, але й створювати опис для усієї схеми за допомогою «Вікна опису схеми» (Circuit Description Box). Можете додавати картинки також у це вікно, звукові та відеоеlementи.

У верхній частині існуючого вікна відображається вміст Вікна опису схеми, воно відкривається командою меню Вид/Вікно опису схеми (View/Circuit Description Box).

Запустіть редактор командою меню Інструменти/Редактор вікна опису (Tools/Description Box Editor). Щоб редагувати вікно опису схеми.

Блоки заголовків

Зручні блоки заголовків дозволяє вам створювати потужний редактор (title blocks). За необхідності, можна додавати блок заголовків на будь-яку сторінку схеми.

В залежності від вмісту і властивостей документа заповнюються автоматично поля блоку. Можете вибрати при створенні блоку або поле з шаблону, або створити своє. Існує можливість вибрати відповідний шрифт. Для редагування існуючого блоку заголовків або створення нового, виберіть пункт меню Інструменти/Редактор блоку заголовків.

У блоках заголовків може бути прямокутники, овали, картинки, текст, лінії, криві Безьє, дуги та інші елементи.

Виберіть пункт меню, щоб додати блок Розмістити/Блок заголовків (Place/Title Block). За допомогою пункту

контекстного меню можна автоматично пересунути блок в будь-який кут Пересунути (Move To). Двічі натисніть по ньому, щоб заповнити поля блоку.

Експорт схеми в Ultiboard та інші пакети

Команда швидкого експортування схеми в будь-яку встановлену версію Ultiboard є у Multisim. Виберіть пункт меню Експортувати/Експортувати в Ultiboard (Transfer/Transfer to Ultiboard), для того щоб запустити процес конструювання друкованої плати. Також інші пункти меню Transfer дозволяють провести пряме і зворотне коригування проекту.

Окрім передачі даних між Multisim і Ultiboard у розробників є можливість експортувати дані в інші пакети проектування друкованих плат.

Примітка: при передачі даних у пакети інших виробників може знадобитися суворя відповідність компонентів, що використовуються з баз даних.

Розділ II. Емулювання

2.1. Огляд та моделі

Вдала конструкція – це наслідок хорошої схеми. Насправді, чудові конструкції виходять тільки тоді, коли у вас є можливість їх емулювати. Є безліч засобів емуляції і функцій у Multisim, недоступних для інших систем проектування електроніки.

Емуляція приладу дозволяє знизити кількість циклів розробки і зменшити помилки під час створення прототипу.

Якщо схема перевіряється емулюванням під час її розробки, помітно знижується кількість циклів проектування.

У Multisim влаштований не тільки емулятор світового рівня SPICE, але й XSPICE, призначений для ефективного емулявання цифрових компонентів.

Патентовані засоби емуляції дозволяють тестувати схеми з компонентами, описаними на VHDL. Дозволяє включати в емуляцію змішаної схеми певні мікроконтролери пакет Multi MCU. Доступний цей пакет не у всіх версіях Multisim.

Multisim пропонує тисячі моделей SPICE, але все ж таки інколи існують ситуації, коли була б кращою ваша власна модель.


До Multisim входить засіб створення моделей «Конструктор моделей» (Model Makers), який згенерує модель автоматично на основі даних databook. Економлячи зусилля і ваш час, але потрібно добре тренуватись, щоб успішно працювати з ними.

Початкові налаштування Конструктора моделей відповідають певній моделі. Вони не фіксовані за допомогою даних databook, можна вибрати компоненти і числові значення, відповідні певному компоненту.

За допомогою майстра компонентів запускається конструктор моделей на 6-му кроці створення нового компонента. Під час редагування компонента з бази даних також його можна запустити: на закладці «Модель» (Model) вікна властивостей компонента (Component Properties) натисніть кнопку Редагувати/Додати (Edit/Add) та запустить конструктор моделей відповідної кнопки (Start Model Maker).

Можна знайти на сайтах виробника мікросхем моделі SPICE, також досвідчені користувачі часто створюють свої моделі.

2.2. Використання інтерактивного емулятора

Перед початком емуляції уважно усе перевірте. В усіх схемах повинно бути джерело і заземлення. Коли усе готово, натисніть F5 або кнопку запуску емулятора . Запуститься інтерактивна емуляція.

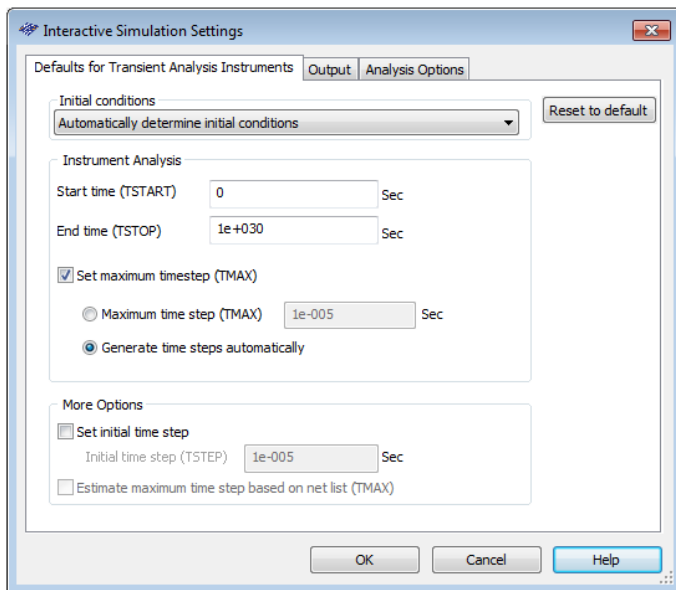


Рис. 2.1. Налаштування інтерактивної емуляції

Можна змінювати налаштування інтерактивної емуляції в меню Емуляція/Налаштування інтерактивної емуляції (Simulate/Interactive Simulation Settings). Деякі з налаштувань наведені нижче, на рис. 2.2. По замовчужанню встановлено час закінчення емуляції через 1e+30 секунд (близько 3,17e+13 мільярдів років). Крок у часі генерується автоматично.

Щоб подивитись результати, скористайтесь динамічним пробником. Натиснувши піктограму пробника і курсор миші

буде виконувати його роль, відображаючи наступні дані при наведенні на будь-який сегмент мережі:

- Напряга (миттєва, амплітудна, середньоквадратична та постійний зсув);
- Частота.

На віртуальних приладах відображаються також результати емуляції. Вони розглядаються в цьому розділі нижче.

У Multisim для аналізу SPICE є більш звичні засоби. Щоб їх запустити, натисніть на панелі кнопку Самописець/Аналітика (Grapher/Analyses List) або за допомогою пункту меню Емуляція/Аналіз (Simulate/Analyses). Більш детально аналіз обговорюється нижче.

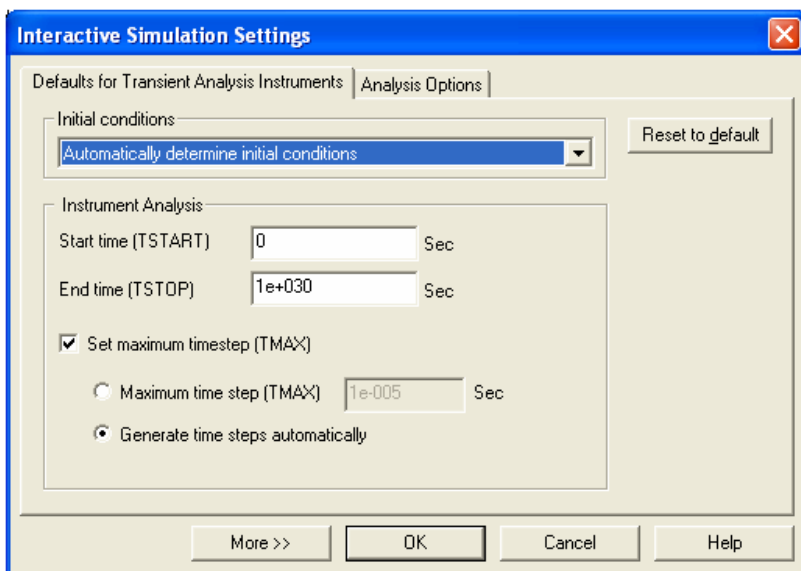


Рис. 2.2. Діалогове вікно. Інформація про помилку емуляції

2.3. Обробка помилок емуляції

Навіть у самих досвідчених користувачів під час емуляції SPICE+ може виникнути помилка. Для пошуку та виправлення помилок у Multisim слугує порадник емуляції (simulation advisor).

Таблиця 2.1. Загальні рішення помилок емуляції

Дія	Налаштування	За замовчуванням	Нове значення
Помилка: тимчасовий крок занадто маленький			
Змінити початкові умови	Початкові умови	Автоматичне визначення	Установіть нуль
Збільшіть максимальний крок за часом	TMAX	1×10^{-5}	1×10^{-3}
Збільшіть відносний допуск помилки (relative error tolerance)	RELTOL	0.001	0.01
Зменшіть опір шунта	RSHUNT	1×10^{12}	1×10^9
Змінити метод інтеграції (при високій потужності або в схемах з перемикачами)	METHOD	Трапецеїдальний (Trapezoidal)	Зубчастий (Gear)
Помилка: сингулярна матриця			
Перевірте з'єднання			
Зменшіть поріг діагонального елемента	Зменшіть поріг діагонального елемента	Зменшіть поріг діагонального елемента	Зменшіть поріг діагонального елемента
Збільшіть допустимий рівень заповнення	Збільшіть допустимий рівень заповнення	Збільшіть допустимий рівень заповнення	Збільшіть допустимий рівень заповнення

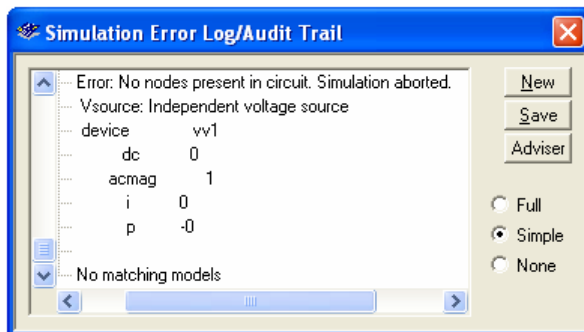


Рис. 2.3. Порадник емуляції

Якщо з'явиться повідомлення про помилку, як на рис. 2.3, запустіть «Порадника» та подивіться доступну інформацію. Найчастіше зустрічаються дві помилки: завдання часу (time step error) та сингулярна матриця (singular matrix). У табл. 2.1 наведені можливі шляхи вирішення цих помилок.

2.4. Віртуальні прилади

Віртуальні прилади - це модельні компоненти Multisim, які відповідають реальним приладам. У Multisim серед віртуальних приладів є осцилографи, генератори сигналів, локальні аналізатори та плотер Боде.

Віртуальні прилади – це простий і зрозумілий метод взаємодії зі схемою, майже не відрізняється від традиційного при створенні прототипу або тестуванні.

Розробники можуть створювати свої власні прилади буквально з нічого, які знайомі з National Instruments LabVIEW. Наприклад, можна створити власний генератор шуму для моделювання електромагнітних перешкод.

Віртуальні прилади LabVIEW можуть відправляти дані на вивід аналогових приладів, реєструвати реальні дані, користуватися ними під час емуляції. Таким чином, емуляційні дані можуть керувати реальними приладами. При створенні віртуальних приладів середовище розробки LabVIEW необхідне, а для використання вже створених – ні.

Щоб долучити віртуальний прилад, виберіть його з панелі «Приладів» (Instruments), рис. 2.4. Щоб подивитися лицьову панель приладу, двічі натисніть на піктограмку приладу. Терміналі приладу з'єднуються з елементами схеми так само, як і для інших компонентів.

Також у Multisim є емуляційні реально-існуючі прилади. До таких приладів відносяться Tektronix TDS 2024 Oscilloscope. Вони виглядають і діють точно у відповідності з технічним описом виробника.

У кожній схемі може бути багато приладів, а також копії одного приладу. Крім того, у кожному вікні схеми може бути свій набір приладів. Будь-яка копія приладу налагоджується та з'єднується окремо.



Рис. 2.4. Панель приладів

У цьому розділі розглянуті найбільш популярні пристрої. Повна та детальна інформація кожного приладу є в керівництві користувача Multisim (User Guide) й у файлі довідка (helpfile).

2.4.1. Мультиметр

Мультиметр призначений для виміру постійного/змінного струму чи напруги, опору чи затуханню між двома вузлами схеми. Підбирається автоматично діапазон вимірів мультиметру. Його струм і внутрішній опір близькі до ідеальних значень, але їх можна змінити.

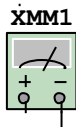


Рис. 2.5. Символ мультиметру

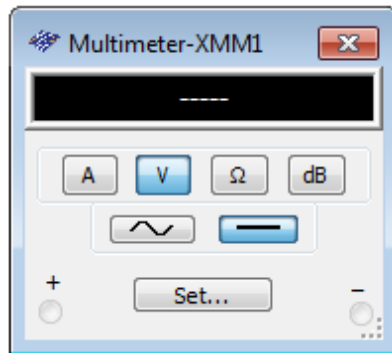


Рис. 2.6. Лицьова панель мультиметру

2.4.2. Генератор сигналів

Генератор сигналів (Functiongenerator) – це джерело напруги, яке може генерувати синусоїдні, пілкоподібні та прямокутні імпульси. Можна змінювати коефіцієнт заповнення, частоту та амплітуду, постійний зсув форму сигналу. Щоб відтворити

сигнали з частотами від декількох герц до аудіо- і радіочастотних досить діапазона генератора.

У генераторі сигналів є три термінали-джерела імпульсів. Загальний центральний термінал визначає положення нуля.

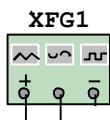


Рис. 2.7. Символ генератора сигналів

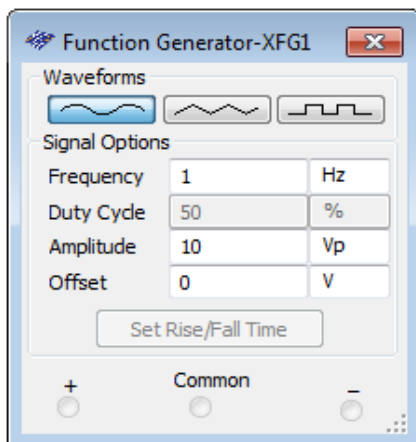


Рис. 2.8. Лицьова панель генератора сигналів

2.4.3. Осцилографи

Є декілька модифікацій осцилографів у Multisim, якими можна керувати як справжніми. Вони дозволяють встановлювати налаштування і часової розгортки напруги, вибирати рівень і тип запуску вимірювань. Дані спеціальних осцилографів Multisim можна переглянути після емуляції за допомогою самозаписувача (Grapher) з меню Вигляд/Плотер (View/Grapher).

У Multisim є наступні осцилографи:

- осцилограф змішаних сигналів Agilent 54622D;
- 2-канальний;
- 4-канальний;
- 4-канальний цифровий осцилограф із записом Tektronix TDS 2024.

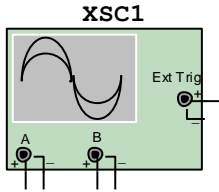


Рис. 2.9. Символ осцилографа

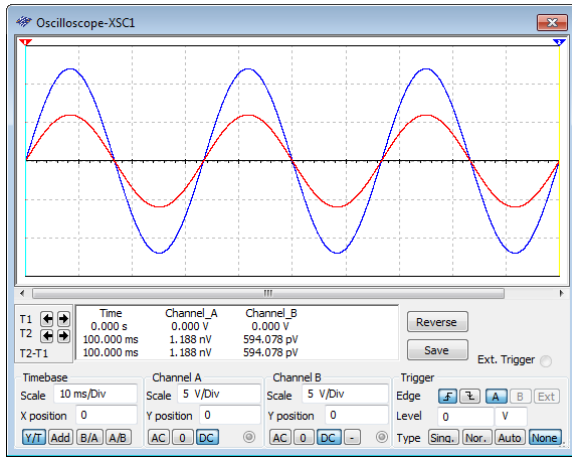


Рис. 2.10. Лицьова панель осцилографа

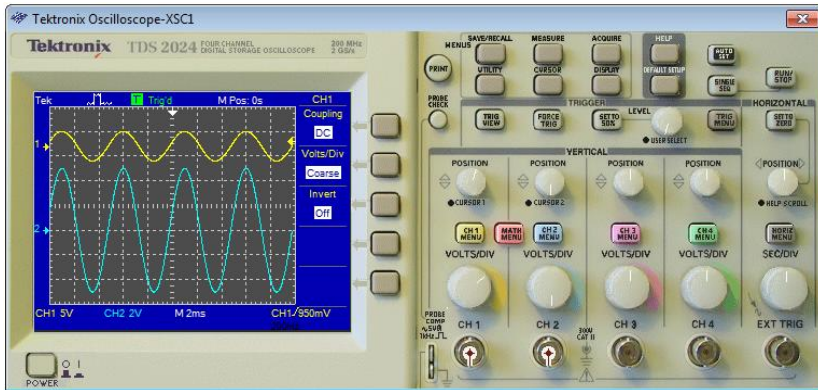


Рис. 2.11. Лицьова панель осцилографа Tektronix

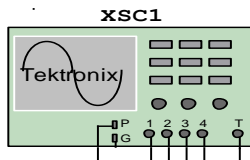


Рис. 2.12. Схематична діаграма осцилографа Tektronix

2.4.4. Плотер Бодє

Плотер Бодє відображає відносний фазовий чи амплітудний відгук вихідного та вхідного сигналу. Це особливо зручно при аналізі властивостей смугових фільтрів.

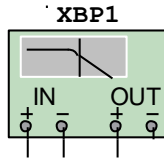


Рис. 2.13. Символ плотер Бодє

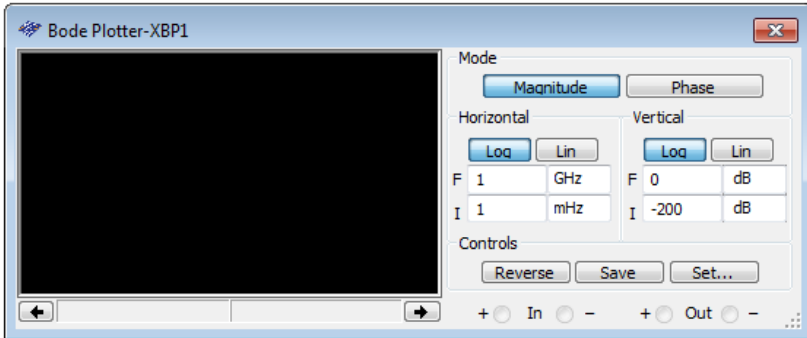


Рис. 2.14. Лицьова панель плотер Бодє

2.4.5. Спектральний аналізатор

Спектральний аналізатор (spectrum analyzer) служить для виміру амплітуди гармоніки із заданою частотою. Також він може вимірювати потужність сигналу і частотні компоненти, визначати присутність гармонік у сигналі.

Результати роботи спектрального аналізатора будуть відображатися не в часовій, а в спектральній області. Зазвичай сигнал – це функція часу, для її виміру використовується осцилограф. Деколи очікується синусоїдний сигнал, але він може

нести додаткові гармоніки. У результаті, неможливо виміряти рівень сигналу, тобто амплітуду основної і додаткових гармонік.

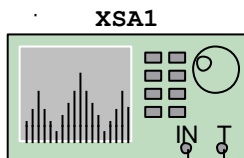


Рис. 2.15. Символ спектрального аналізатора

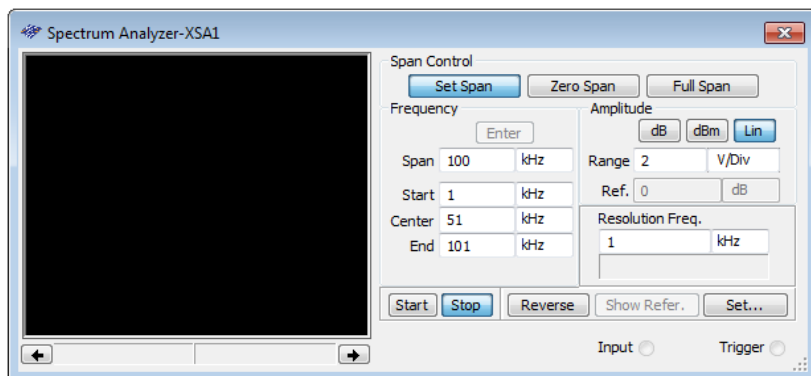


Рис. 2.16. Лицьова панель спектрального аналізатора

2.5. Прилади NI LabVIEW

До складу Multisim входять чотири різних віртуальних прилади NI LabVIEW: мікрофон (microphone), динамік (speaker), генератор сигналів (signal generator) та аналізатор сигналів (signal analyzer). Їх символи зображені на рис. 2.17, а лицьова панель на рис. 2.18.

Мікрофон (Microphone) – записує звук приладами аудіозапису комп'ютера і видає вхідні дані як джерело сигналу.

Динамік (Speaker) – програвє вхідні звукові дані на динаміку комп'ютера.

Генератор сигналів (Signal Generator) – генерує синусоїдний, трикутний, прямокутний і пилкоподібний сигнали.

Аналізатор сигналів (Signal Analyzer) – відображає часовий профіль, енергетичний спектр або біжучий середній вхідний сигнал.



Рис. 2.17. Символи приладів NI LabVIEW

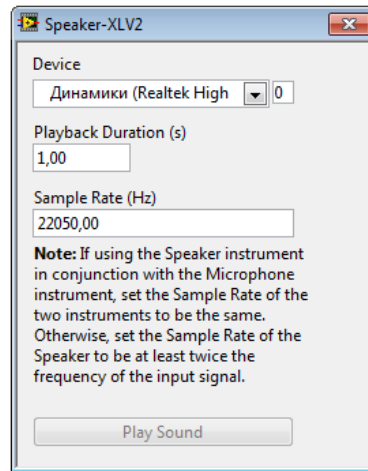


Рис. 2.18. Приклад лицьової панелі приладу

Необхідні прилади можна створити в графічному середовищі розробки NI LabVIEW. Цим приладам доступні всі можливості LabVIEW: збір даних, керування приладами, математичний аналіз тощо.

Наприклад, ви можете зареєструвати реальний сигнал за допомогою плати збору даних або модульного приладу NI та скористатися отриманими даними в емуляції схеми Multisim.

Також можна зробити прилад, який відображає дані емуляції й одночасно результати обчислень на підставі цих даних.

Прилади NI LabVIEW можуть використовуватися як пристрої вводу, так і виводу даних. Прилади вводу відображають або обробляють дані. Прилади виводу генерують дані, що стануть джерелом в емуляції. Один прилад NI LabVIEW не може бути одночасно приладом і вводу, і виводу даних.

Ще одна відмінність між приладами введення і виведення даних: перші постійно отримують дані під час роботи емуляції, другі генерують кінцевий набір даних і передають його в

Multisim. Ці дані використовуються в емуляції схеми. Прилади виведення даних не можуть постійно генерувати дані під час роботи емуляції. Для введення в схему нових даних, зупиніть емуляцію, змініть дані та перезапустіть емуляцію.

Прилади виводу даних надають творцеві або користувачеві можливість повторення вихідних даних. У налаштуваннях приладу LabVIEW необхідно вказати період повторення даних, в іншому випадку емулятор буде вважати, що надходить 0 В після закінчення даних. Якщо прилад налаштований на повтор даних, сигнал буде повторюватися до закінчення емуляції.

Прилади вводу даних дозволяють користувачеві або творцеві встановити частоту оцифрування. Ця частота реєстрації даних Multisim, аналогічна частоті оцифрування приладу збору даних або модульного приладу, що реєструє реальний сигнал. Під час вибору частоти оцифрування необхідно враховувати теорему Котельникова.

Зверніть увагу! Чим більше частота оцифрування, тим повільніше буде працювати емуляція.

Для створення і зміни приладів NI LabVIEW необхідне середовище розробки NI LabVIEW версії 8.0 або вище.

Для використання приладів NI LabVIEW, на комп'ютері повинен бути встановлений NI LabVIEW Run-Time Engine. Його версія повинна збігатися з версією LabVIEW, в якій був створений прилад. NI LabVIEW Run-Time Engine 8.0 як елемент Electronics Workbench Shared Components входить у комплект установки Multisim.

2.6. Аналіз

До Multisim входять безліч засобів аналізу даних емуляції, від простих до найскладніших, у тому числі і вкладених. Щоб розпочати аналіз, виберіть пункт меню Голос/Аналіз (Simulate/Analyses) і виберіть потрібну функцію. Список усіх функцій Multisim наведено на рис. 2.19. Крім вбудованих функцій аналізу, є можливість визначити свою функцію за допомогою команд SPICE.

Під час підготовки до аналізу, налаштуйте його параметри, наприклад діапазон частот для аналізатора змінного струму

(AC Analysis). Також необхідно вибрати вихідні канали (traces). Щоб не заплутатися під час перегляду результатів, імена каналів краще робити змістовними. Результати відображаються на графіках Multisim Grapher і зберігаються для подальшої обробки Postprocessor. Деякі результати зберігаються в контрольних записах (audittrail), які теж можна переглянути.

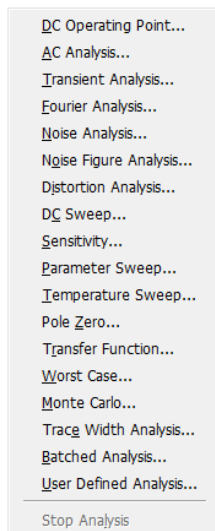


Рис. 2.19. Функції аналізу

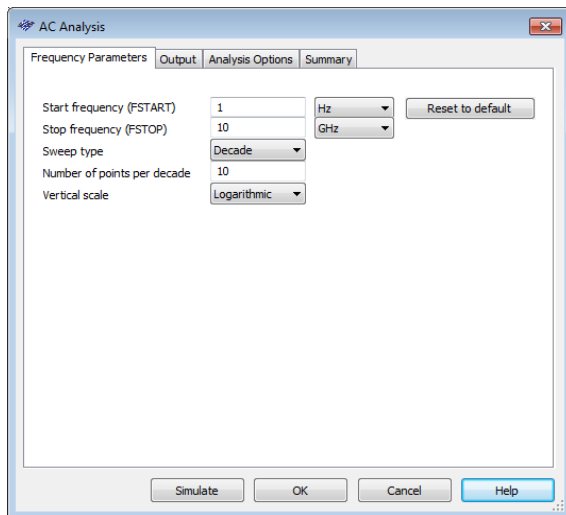


Рис. 2.20. Діалогове вікно налаштувань ACAnalysis

2.7. Плотер

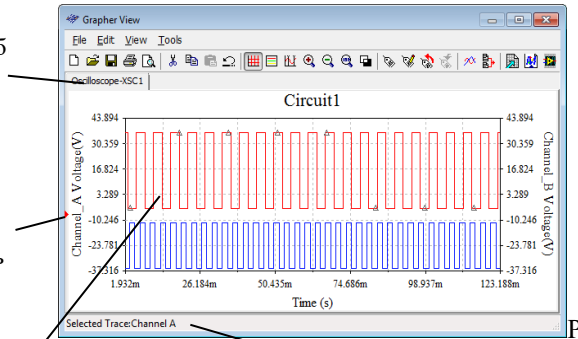
Плотер (Grapher) - основний інструмент перегляду результатів емуляції. Він відкривається з меню Вид/Плотер (View/Grapher) і автоматично при роботі емуляції. Різні частини вікна плотера перераховані на рис. 2.21.

Дані відображаються на графіку graph і в таблиці chart. Графік - це одна або кілька залежностей уздовж вертикальної або горизонтальної вісі. У таблиці наведені рядки і колонки текстових даних. Вікно розділене на кілька закладок, число яких залежить від працюючих функцій аналізу.

Ім'я закладки, натисніть мишкою, щоб відобразити. Тут з'явиться червона стрілка.

Область графіка (таблиці) на закладці. Червона стрілка, показує, що ця область активна.

Обраний графік виділений трикутниками на залежності і у смузі стану (Statusbar).



Якщо не виділений жоден графік, у смузі стану відобразиться обрана закладка.

Рис. 2.21. Вікно плотера

У кожній закладці є дві можливі активні зони, зазначені червоною стрілкою на лівому полі: всієї закладки, близько її імені, або активного графіка (таблиці). Деякі функції, наприклад, копіювання, вставки, вирізання впливають тільки на активну область, тому перевірте, яку область обрали перед виконанням такої дії.

Безліч налаштувань плотера знаходяться у вікні «Властивості». Можна змінювати масштаби, діапазони, заголовки, стилі ліній вісей та інші параметри. Щоб відкрити вікно налаштувань сторінки (Page Properties) або вікна стандартних властивостей, скористайтеся пунктами меню Редагувати/Налаштування сторінки (Edit/Page Properties) або Редагувати/Властивості (Edit/Properties), рис. 2.22 і 2.23 відповідно.

Курсори можна перетягувати за допомогою лівої кнопки миші. Налаштування пересування курсору задаються в його контекстному меню. Можна перемістити курсор на задане значення по вісі X, Y або до наступного мінімуму або максимуму в будь-якому напрямку (рис. 2.23). Курсори, легенди і лінії графіка можна приховати або відобразити за допомогою кнопок панелі (рис. 2.24).

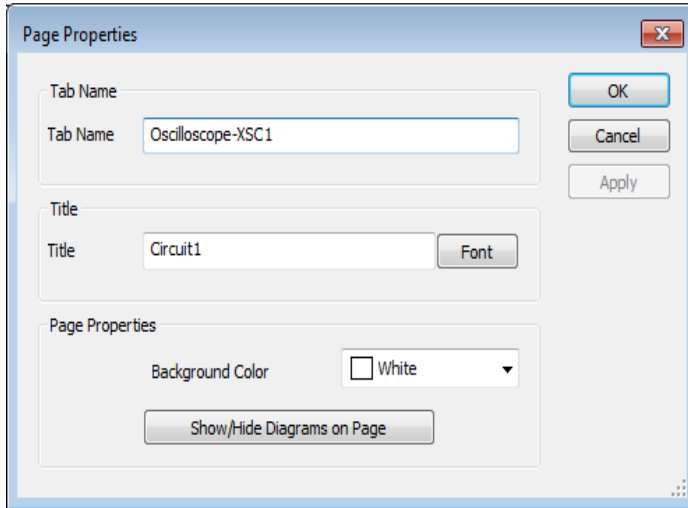


Рис. 2.22. Налаштування сторінки плотера

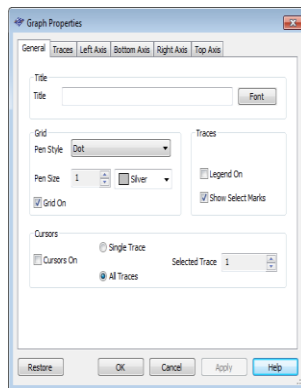


Рис. 2.23. Властивості графіка

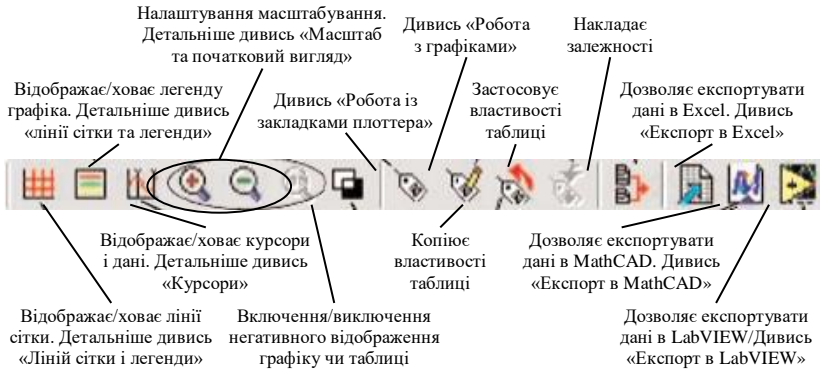


Рис. 2.24. Панель плотера

Результати можна експортувати в NI LabVIEW, Excel або MathCAD. Також їх можна зберегти в одному з форматів: дані LabVIEW (.LVM або .TDM), з поділом запитом (.CSV) і у вигляді тексту.

Щоб зберегти дані плотера, в меню Файл/Зберегти як (File/Save As) виберіть необхідний формат.

2.8. Створення компонентів

У Multisim є засоби створення та редагування компонентів, необхідних для схеми. Є два методи: за допомогою «Майстра компонентів» (Component Wizard) і діалогового вікна «Властивості компонента» (Component Properties).

Майстер компонентів відкривається в меню Інструменти/Майстер компонентів (Tools/Component Wizard). У ньому можна повністю описати компонент: вказати його символ, модель SPICE (рис. 2.25).

Щоб відчинити діалогове вікно властивостей компонентів, двічі натисніть по розміщеному компоненту, відкрийте закладку «Значення» (Value) та натисніть «Редагувати компонент» (Edit Component) у кнопці DB (рис. 2.26).

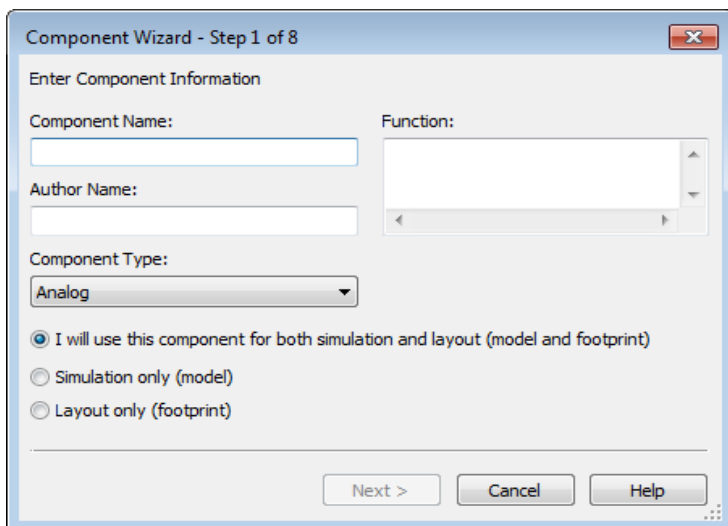


Рис. 2.25. Майстер компонентів

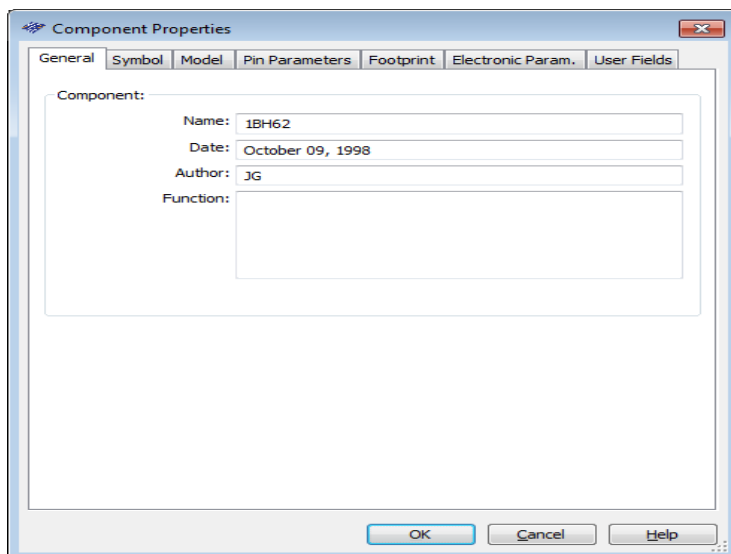


Рис. 2.26. Діалогове вікно властивостей компоненту

Розділ III. Інтеграція з National Instruments

3.1. Огляд

Multisim використовується в коледжах та університетах всього світу, він став необхідним інструментом навчального процесу. У Multisim студенти знайомляться з теорією схемотехніки за допомогою інтуїтивно зрозумілих методів.

Продукція Electronics Workbench застосовується на всіх рівнях: від початкового до професійного, тому рівень освіти студентів буде постійно зростати та дозволить їм переходити на більш складні задачі, не вивчаючи для кожної нове середовище.

3.2. LabVIEW

National Instruments LabVIEW – це середовище графічного програмування, яке можна використати для автоматизації задач тестувань і вимірювань при перевірці схем. Дані Multisim, збережені у форматах .LVM або .TDM, можна завантажити в LabVIEW за допомогою технології «Експрес ВП». Після цього дані емуляції можна накласти на отримані результати для перевірки схеми.

Завантаження файлів даних .LVM та .TDM

Щоб завантажити дані Multisim з файлів .LVM або .TDM, використовуйте експрес ВП. Прочитати файл вимірювань (Read from Measurement File). Цей ВП знаходиться на палітрі Програмування/Запис та зчитування файлів (Programming/File IO). Подібна інформація про цей ВП знаходиться в системі допомоги LabVIEW. ВП можна налаштувати на зчитування або з .LVM, або з .TDM файлів.

Примітка: тільки для .LVM файлів. На виході EOF? (кінець файлу?) буде ІСТИНА, якщо при зчитуванні досягнуто кінець файлу. Цей індикатор корисний, якщо дані зберігались після аналізу Бодє або іншого графіка з більш ніж однією залежністю.

Просто помістіть експрес ВП зчитування файлу вимірювань у цикл і з'єднайте вихід EOF? з терміналом виходу з циклу.

На замітку: тільки для .TDM файлів. Щоб завантажити в Lab VIEW .TDM файл, що містить декілька графіків, необхідні експрес ВП низького рівня. Ділянка коду для завантаження декількох графіків показана на рис. 3.1.



Зчитує дані з файлу вимірювань текстового (.lvm) або бінарного (.tdm) формату

Рис. 3.1. ExpressVI Прочитати файл вимірювань

3.3. Signal Express

Signal Express – це інноваційний засіб налаштування вимірювань на основі декількох кроків роботи з мишкою, які не потребують розробки програмного коду. На відміну від традиційних інструментів, в **Signal Express** поєднується оптимальний баланс функціональності вимірювань та простота використання, що дозволяє розробникам стандартизувати створення різних додатків:

- Моделювання схем
- Перевірка схем
- Аналіз
- Перевірка приладів
- Автоматичний пошук збоїв

Експорт даних Multisim в Signal Express

Щоб передати дані емуляції в **Signal Express** додайте відповідний крок: Додати крок/Аналоговий/Завантажити та зберегти Сигнал/Завантажити з .LVM (Add Step/Analog/Load and save Signals/Load from .LVM). У полі «Область» (Domain) вкажіть тимчасову або спектральну область записаних даних. Закрийте вікно та запусить робочий сигнал **Signal Express**, щоб завантажити дані.

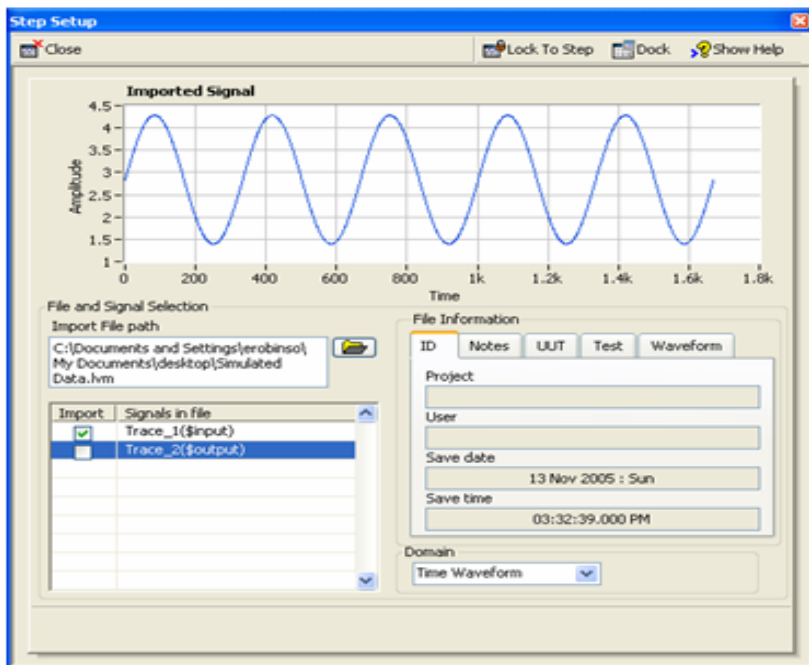


Рис. 3.2. Signal Express, крок завантаження із .LVM

3.4. ELVIS

National Instruments ELVIS – це ідеальний прилад для будь-якої електротехнічної лабораторії, в якій є Multisim. В ELVIS є середовище розробки макетних плат з інтегрованими приладами, включаючи генератор сигналів, цифровий мультиметр,

осцилограф і джерело струму змінної потужності. Макетна плата знімається, це дозволяє студентам виконувати частину лабораторної роботи окремо від модуля ELVIS.

В ELVIS є програмне забезпечення на базі LabVIEW для взаємодії з віртуальними приладами. У ці пристрої можна додати завантаження даних Multisim для порівняння результатів емуляції та вимірювань.

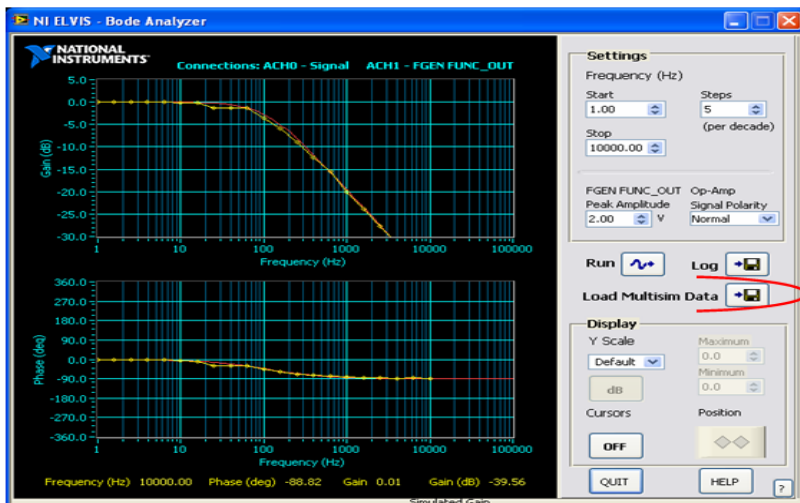


Рис. 3.3. Аналізатор Бодє в ELVIS і порівняння з даними Multisim

3.5. Створення прототипів

Віртуальні тривимірні компоненти

Увесь набір компонентів Multisim призначений для студентів, які зовсім або майже не працювали з альтернативними електротехнічними компонентами. На схемі ці компоненти виглядають як справжні. Вони розташовані в «Основній групі» (Basic group) «Головної бази даних» (Master Database) у сімействі 3D_VIRTUAL.

Анімовані компоненти

Анімовані компоненти змінюються під час роботи схеми. До них відносяться світлодіоди, 7-сегментні дисплеї та деякі інші компоненти, наприклад, вимикачі та потенціанометри. Анімовані компоненти знаходяться в різних розділах баз даних Multisim.

Параметричні компоненти

Ці компоненти імітують властивості справжніх. Рівень параметрів може задати користувач у параметрах компонента. Якщо потужність, яка розглядається віртуальним резистором перевищить встановлений поріг, то він перегорить та розірве кільце. Параметричні компоненти розташовані в «Основній групі» (Basic group) «Головної бази даних» (Master Database) в структурі RATED_VIRTUAL.

Тривимірні макетні плати

Це ще один засіб Multisim, на якому студенти вчаться важливим елементам створення прототипів.

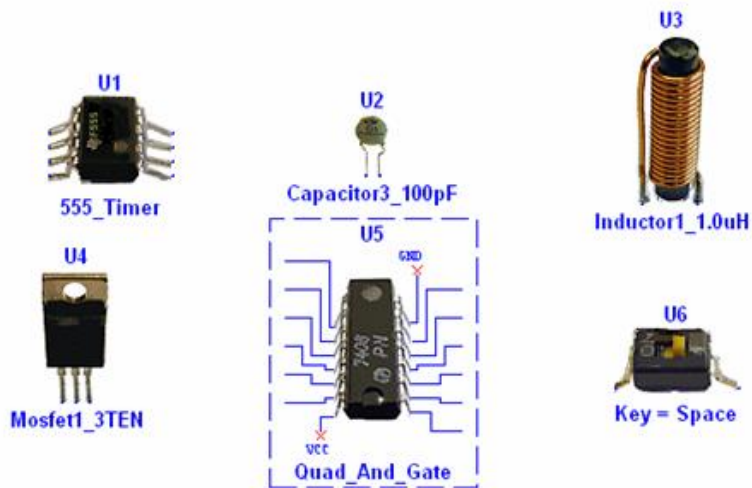


Рис. 3.4. Віртуальні тривимірні компоненти

Якщо елементи на платі з'єднані правильно, то відповідно з'єднання та компоненти на схемі змінять колір на зелений. Також у плату входять наступні засоби: перевірка дотримання проектних норм (Design Rules Check, DRC) та перевірка з'єднань (Connectivity Check).

Тривимірний віртуальний ELVIS

Окрім стандартної плати студенти можуть створити схему NIELVIS з відповідним тривимірним зображенням. Віртуальні пристрої ELVIS, наприклад, генератор сигналів, осцилограф та джерело живлення також мають моделі. Створення схеми ELVIS виконується з меню Файл/Новий/Схема ELVIS (File/New/ELVIS Schematic).

Щоб змінити віртуальний пристрій ELVIS, двічі натисніть на відповідному терміналі.

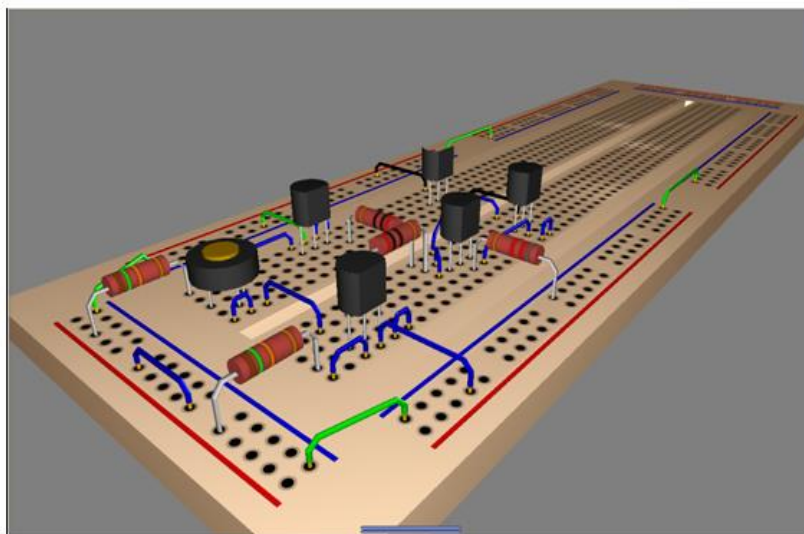


Рис. 3.5. Тривимірна віртуальна плата

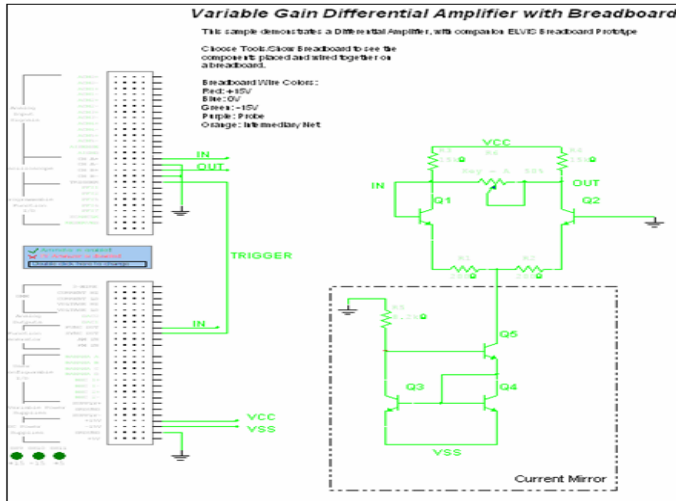


Рис. 3.6. Схема 3D ELVIS



Рис. 3.7. Віртуальний 3D ELVIS

3.6. Пошук несправностей

Збій схеми

Внесені несправності можна приховати. Щоб додати неполадку, двічі клацніть на компонент та відкрийте закладку «Несправності» (Faults).

В якості несправності можна задати відсутність контакту на терміналі, коротке замикання двох терміналів або резистивні втрати в омах.

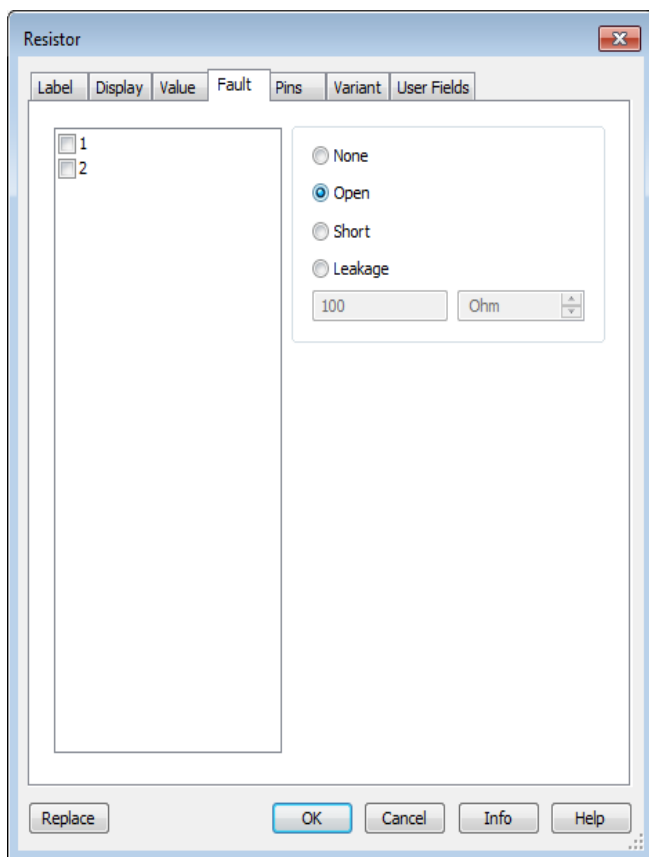


Рис. 3.8. Діалогове вікно обмежень схеми

Чорний ящик

В якості чорного ящика може бути задана підсхема. Створення підсхем розглядалось у розділі 1.

Примітка: не варто використовувати в якості чорного ящика ієрархічні блоки, тому що вони зберігаються в окремому файлі.

Обмеження схем

Обмеження схем – дуже важливий елемент створення задач у чорному ящику чи пошуку несправностей. Вони дозволяють викладачу бачити підсхеми, приховувати несправності та обмежувати число доступних компонентів та приладів. Наприклад, можна використовувати осцилограф для вивчення амплітудної передавальної характеристики схеми, адже плотера Бодє або аналізатора змінного струму може не бути поруч.

Обмеження загальні на схему відкриваються в меню «Опції» (Options). Доступ до них захищено паролем.

Розділ IV. Лабораторний практикум

Лабораторна робота № 1


ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ПРОГРАМОЮ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОНИХ КІЛ MULTISIM

Мета: вивчити структуру та основні можливості програми схемотехнічного моделювання **Multisim**. Отримати практичні навички проведення експериментальних досліджень на ЕОМ та обробки їх результатів.

План виконання лабораторної роботи

1. Вивчіть опис аналогової частини програми. При цьому особливу увагу зверніть на розділи:

- 1.1. Побудова та випробування схеми.
- 1.2. Компоненти.
- 1.3. Інструменти.
- 1.4. Опорна довідка.

2. Запустіть програму Multisim. Відкрийте опорне меню File/Open Samples чи натисніть кнопку стандартної панелі , де зберігаються приклади схем. Вивчіть роботу таких електричних схем:

- 2.1. kirch_cu.ms10 – перевірка першого закону Кірхгофа;
- 2.2. thevenin.ms10 – перевірка теореми Тевеніна (принципу еквівалентного генератора);
- 2.3. lissajou.ms10 – схема визначення співвідношення між частотами двох джерел синусоїдного струму методом фігур Ліссажу;
- 2.4. rectfier.ms10 – схема двонапівперіодного випрямляча;
- 2.5. wien.ms10 – фільтр Вейна.

3. Зробіть висновки про роботу та призначення кожного розглянутого кола.

Проаналізуйте, які вимірювальні прилади використовувались і як вони з'єднуються. Майте на увазі, що схема буде працювати лише за наявності в колі точки заземлення.

Контрольні запитання та завдання

1. Які основні можливості програми схемотехнічного моделювання Multisim?
2. Якими вимірювальними приладами можна користуватись при моделюванні електричних схем у вказаній програмі?
3. Які закони та принципи перевірялись у п.2 роботи? Сформулюйте та поясніть.
4. У чому суть методу фігур Ліссажу із визначення відношення частот двох джерел ного струму?
5. Накресліть схему двопівперіодного випрямляча та поясніть його роботу.

Лабораторна робота № 2

ЗМІШАНЕ З'ЄДНАННЯ ОПОРІВ

Мета роботи: відпрацювання практичних навичок проведення експерименту; дослідження зміни струмів та напруг в Т-подібному колі при вимірюванні опорів на різних ділянках кола.

Пояснення до роботи: під час виконання роботи необхідно добре уявляти, які особливості реалізуються в електричному колі при змішаному з'єднанні опорів.

1. Теоретична частина

Німецький фізик Георг Ом (1787 – 1854) експериментально дослідив, що сила струму I , яка тече по однорідному металевому провіднику, пропорційна до напруги U між кінцями цього провідника

$$I = \frac{U}{R}. \quad (4.2.1)$$

Величину R називають електричним опором провідника. Електричний опір вимірюється в *Омах* (Ω). Електричний опір 1 *Ом* має така частина кола, на якій при силі струму 1 *А* напруга дорівнює 1 *В* (V).

Опір провідника залежить від його довжини l і площі поперечного перерізу S , а також від матеріалу

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (4.2.2)$$

Величину ρ називають питомим опором матеріалу. Одиниці виміру питомого опору *Ом·м* ($\Omega \cdot m$). Провідники в схемах

можуть з'єднуватись послідовно, паралельно та за схемою змішаного з'єднання.

Розглянемо схему послідовного з'єднання провідників (рис. 4.2.1).

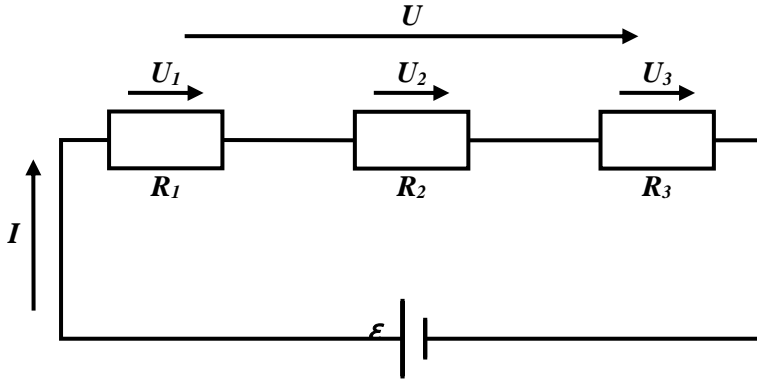


Рис. 4.2.1

Напруга на такій ділянці кола складається з напруг на кожному провіднику:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (4.2.3)$$

Запишемо закон Ома для ділянки кола:

$$U = RI, \quad U_1 = R_1 I, \quad U_2 = R_2 I, \quad U_3 = R_3 I, \quad (4.2.4)$$

де R – повний опір кола, I – загальний струм, що протікає в колі.

З (4.2.3) і (4.2.4) одержуємо

$$RI = R_1 I + R_2 I + R_3 I,$$

звідки повний опір кола послідовно з'єднаних провідників:

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Отже, повний опір послідовно з'єднаних провідників дорівнює сумі всіх опорів провідників:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (4.2.5)$$

де n – кількість послідовно з'єднаних провідників; R_i – величина опору кожного провідника.

Розглянемо схему паралельного з'єднання провідників, зображену на рис. 4.2.2.

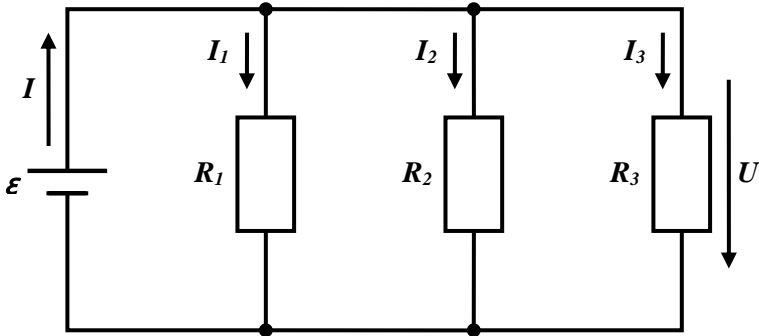


Рис. 4.2.2

Повний струм I :

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (4.2.6)$$

За законом Ома, для ділянок кола:

$$U = RI, \quad U = R_1 I, \quad U = R_2 I, \quad U = R_3 I, \quad (4.2.7)$$

З виразів (4.2.6) і (4.2.7) отримуємо:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3},$$

звідки

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (4.2.8)$$

У разі паралельного з'єднання n провідників величина, обернена до опору кола, дорівнює сумі обернених величин опорів усіх паралельно з'єднаних провідників:



$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, \quad (4.2.9)$$

При змішаному з'єднанні провідників для кожної ділянки кола використовують формули для послідовного та паралельного з'єднання провідників, де спочатку на ділянці кола використовують формули для всіх паралельно з'єднаних провідників, а потім цю ділянку кола замінюють розрахованим опором провідника і далі використовують формули для послідовно з'єднаних провідників.

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочавши виконання даної лабораторної роботи необхідно запустити програму MULTISIM.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі з параметрами елементів згідно з варіантом (табл. 4.2.1).

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку .

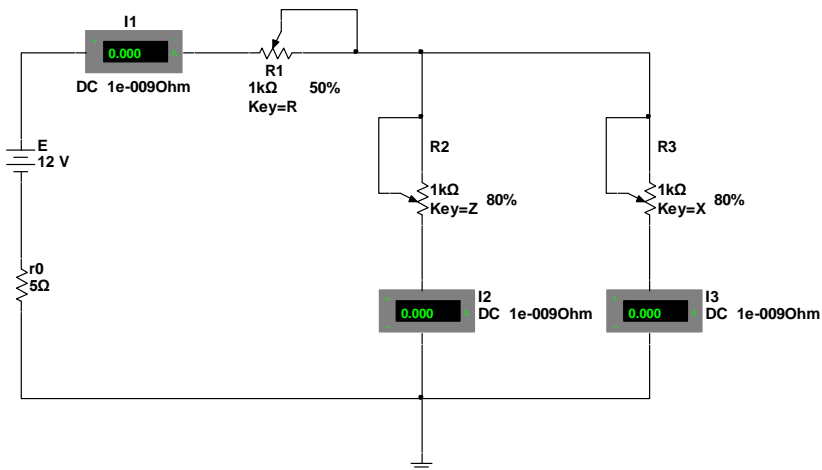


Рис. 4.2.3

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: Увімкніть джерело постійного струму і виконайте вимірювання струмів I_1, I_2, I_3 та напруг, результати дослідів запишіть у таблицю 4.2.1.

3.2. Дослід 2: Змініть значення опорів електричного кола згідно зі значеннями таблиці 4.2.1 і повторіть п. 4.1.

3.3. Дослід 3: Змініть значення опорів електричного кола згідно зі значеннями таблиці 4.2.1 і повторіть п. 4.1.

4. Обробка і аналіз результатів

1. За значеннями E, R_1, R_2, R_3 проведіть розрахунок струмів на усіх вітках кола та напруг на опорах.

$$R = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}; \quad I_1 = \frac{E}{R + r_0}; \quad U_1 = I_1 \cdot R_1;$$

$$U_2 = U_3 = I_1 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}; \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_3}{R_3}$$

Таблиця 4.2.1

Дос- ліди	Виміряні величини											
	E В	r_0 Ом	R_1 кОм	R_2 кОм	R_3 кОм	I_1 мА	I_2 мА	I_3 мА	U_1 В	U_2 В	U_3 В	U В
1			N	N	N							
2			N	$2 + N$	N							
3			$0.5 + N$	$2 + N$	N							
	Розраховані величини											

N – номер варіанта.

2. Порівняйте розраховані та експериментальні значення величин.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунок за схемою.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
2. Як виглядає закон Ома для повного кола?
3. Як розрахувати опір послідовно з'єднаних резисторів?
4. Як розрахувати опір паралельно з'єднаних резисторів?
5. Який порядок розрахунку змішаного з'єднання резисторів?
6. Як підключаються амперметр та вольтметр і які величини вони вимірюють?

Лабораторна робота № 3

РОБОТА ДЖЕРЕЛА ЕРС У ГЕНЕРАТОРНОМУ ТА АКУМУЛЯТОРНОМУ РЕЖИМАХ

Мета роботи: набуття практичних навичок дослідження роботи джерел електрорушійної сили в режимах генератора та акумулятора електричної енергії.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре уявляти, які особливості реалізуються в електричному колі при зустрічному та узгодженому з'єднанні джерел енергії в електричному колі.

1. Теоретична частина

Система заряджених тіл є носієм енергії. Ця енергія надається системі джерелами в процесі утворення зарядів і може бути знову повернена джерелам або перетворена в інші види енергії. Для одержання виразу енергії розглянемо роботу, яку необхідно виконати для перенесення заряду q з точки a до точки b провідного середовища однакового поперечного перерізу.

Робота, яка виконується силами електричного поля при перенесенні заряду q на шляху $d\mathbf{l}$ провідного середовища, дорівнює

$$dA = (\vec{F} d\vec{l}) = qdu . \quad (4.3.1)$$

Рівняння (4.3.1) можна подати ще так:

$$dA = qdu = uidt . \quad (4.3.2)$$

Повну роботу на шляху $a - b$ провідного середовища отримаємо після інтегрування рівняння (4.3.2) в межах від a до b :

$$A_{ab} = \int_a^b dA = \int_a^b qdu = qu_{ab}. \quad (4.3.3)$$

Швидкість виконання роботи, тобто швидкість перетворення електромагнітної енергії за одиницю часу, називається миттєвою потужністю:

$$p = \frac{dA}{dt}. \quad (4.3.4)$$

У колі постійного струму $A = qU$, $q = It$, тоді

$$p = \frac{A}{t} = UI. \quad (4.3.5)$$

Одиницею вимірювання потужності є *ват* [W]:

$$[P] = [U][I] = 1B \cdot A = 1Bm$$

Робота сторонніх сил по переміщенню одиничного додатного заряду називається електрорушійною силою \mathcal{E} (ЕРС). Тоді закон Ома для повного кола – сила струму в колі дорівнює відношенню електрорушійної сили джерела до суми опорів зовнішньої R і внутрішньої r ділянок кола:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (4.3.6)$$

Джерело напруги працює в *режимі генератора*, якщо $P > 0$. Умовою цього є узгоджений напрям ЕРС та струму на даній ділянці ($\mathcal{E} \uparrow \uparrow I$).

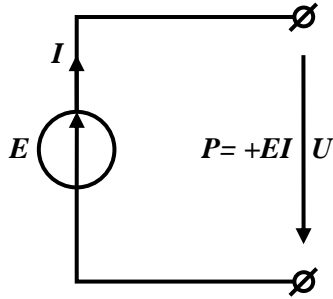


Рис. 4.3.1

Джерело напруги працює в режимі акумулятора (споживача), якщо $P < 0$, що має місце при зустрічному напрямку ЕРС та струму даної ділянки ($E \uparrow \downarrow I$).

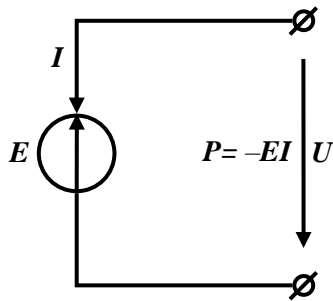




Рис. 4.3.2

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочавши до виконання даної лабораторної роботи необхідно запустити програму Multisim (рис. 4.3.3).

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 4.3.4). Внутрішні опори джерел ЕРС на схемі представлені резисторами, відповідно, r_{01} та r_{02} . Навантаження на схемі представлено резистором R_H . Коректна робота електричної схеми вимагає її заземлення.

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку .

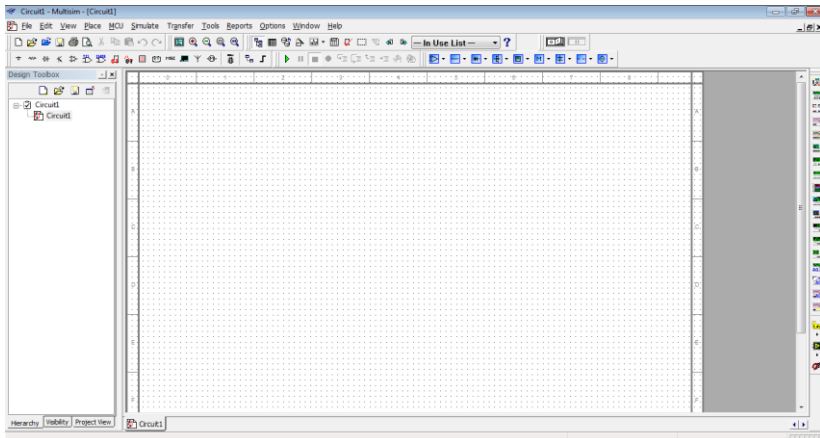
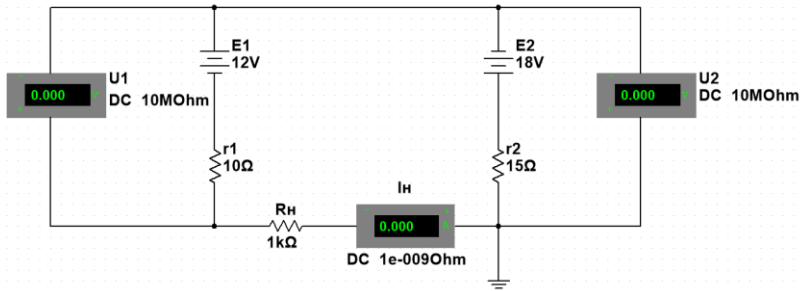


Рис. 4.3.3

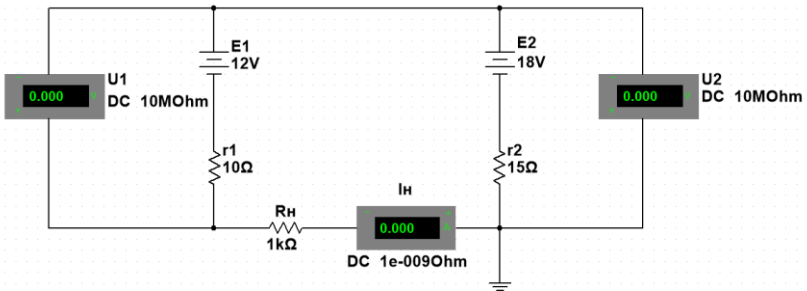
3. Порядок виконання роботи

3.1. Використовуючи універсальний вольтметр програмної оболонки, необхідно виміряти напруги E_1 ; E_2 ; R_H та струм у колі для першої схеми із зустрічним включенням джерел ЕРС (рис. 4.3.4,а).

3.2. Далі необхідно провести аналогічні вимірювання напруг на E_1 , E_2 і R_H та струму в колі для схеми з узгодженим включенням джерел ЕРС (рис. 4.3.4,б).



а)



б)

Рис. 4.3.4. Схема експерименту:
а – узгоджене включення; б – зустрічне включення.

4. Обробка і аналіз результатів

Провести розрахунки, результати занести в таблицю 4.3.3.

1) $U_0 = E - U$ (генератор); 2) $U_0 = U - E$ (акумулятор);

3) $P = I_{(ексн)} \cdot U$; 4) $r_0 = \frac{U_0}{I_{(ексн)}}$;

$$5) I_{(розр)} = \frac{E_1 \pm E_2}{r_{01} + r_{02} + r_H}; \quad 6) U_H = I_{(розр)} \cdot r_H;$$

$$7) P_H = U_H \cdot I; \quad 8) P_0 = U_0 \cdot I; \quad 9) \eta = \frac{P_H}{P_1 + P_2},$$

де U_0 розраховується окремо для режимів генератора та акумулятора.

Таблиця 4.3.3

З'єднання джерел	ДОСЛІДНІ ДАНІ							
	E_1 В	U_1 В	E_2 В	U_2 В	U_H В	I_H мА	r_{01} Ом	r_{02} Ом
Узгоджене з'єднання							$10 + N$	$15 + N$
Зустрічне з'єднання							$10 + N$	$15 + N$

З'єднання джерел	РОЗРАХУНКОВІ ДАНІ											
	U_{01} В	U_{02} В	r_{01} Ом	r_{02} Ом	I мА	U_H В	P_1 мВт	P_2 мВт	P_{01} мВт	P_{02} мВт	P_H мВт	η
Узгоджене з'єднання												
Зустрічне з'єднання												

N – номер варіанта.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схеми дослідження. Таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунок зустрічного і узгодженого з'єднання джерел ЕРС.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. За якої умови джерело електричної енергії буде працювати в генераторному режимі?
2. За якої умови джерело електричної енергії буде працювати в акумуляторному режимі?
3. Як визначається потужність електричного струму?
4. Сформулюйте узагальнений закон Ома.
5. Назвіть одиниці вимірювання струму, напруги, опору, провідності, потужності та енергії.

Лабораторна робота № 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНІВ КІРХГОФА

Мета роботи: відпрацювання практичних навичок проведення експерименту; дослідження зміни струмів та напруг у розгалуженому електричному колі.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти суть законів Кірхгофа.

1. Теоретична частина

Електричні схеми характеризуються електричними вузлами та вітками.

Вузол – це точка електричного кола, в якій з'єднані три або більше віток. Кількість вузлів у електричному колі позначимо літерою n .

Вітка – це частина електричної схеми з одним струмом між двома вузлами. У гілці всі елементи з'єднані послідовно і проходить тільки один струм. Кількість віток в електричному колі позначимо літерою m .

Закони Кірхгофа є основними законами електротехніки, які однозначно визначають співвідношення між ЕРС, струмами та напругами електричного кола.

Перший закон Кірхгофа випливає з принципу неперервності електричного струму і є його наслідком для замкненої поверхні S , що охоплює вузол електричного кола, в якому збігаються струми і провідності віток.

Згідно з принципом неперервності електричного струму для електричних кіл постійного струму, отримуємо:

$$\sum_k I_k = 0. \quad (4.4.1)$$

Перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів віток, які належать до даного вузла електричного кола, дорівнює нулю.

Для запису рівняння за першим законом Кірхгофа необхідно спочатку позначити стрілками напрямки струмів у вітках схеми. Наприклад припустимо, що $I > 0$, якщо його стрілка спрямована до вузла, та $I < 0$, якщо від вузла. Тоді рівняння за цим законом для вузла (рис. 4.4.1) запишемо так:

$$I_1 + I_2 - I_3 + \dots + I_p = 0. \quad (4.4.2)$$

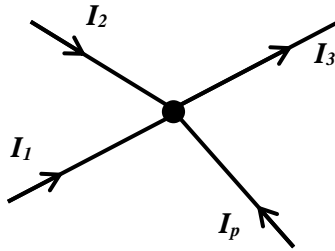


Рис. 4.4.1. Напрямки струмів у вузлі

Розглянемо замкнений контур (рис. 4.4.2) деякого електричного кола. У загальному випадку в контурі діє кілька джерел електроенергії з ЕРС: E_1, E_2, E_3, \dots . У вітках цього контуру проходять струми I_1, I_2, I_3, \dots . У вузлах a, b, c, \dots відгалужуються струми I_a, I_b, I_c, \dots . Позначимо через R_1, R_2, R_3, \dots опори віток, при чому ці опори враховують внутрішні опори джерел енергії E_1, E_2, E_3, \dots .

Тоді

$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{k=1}^n E_k. \quad (4.4.3)$$

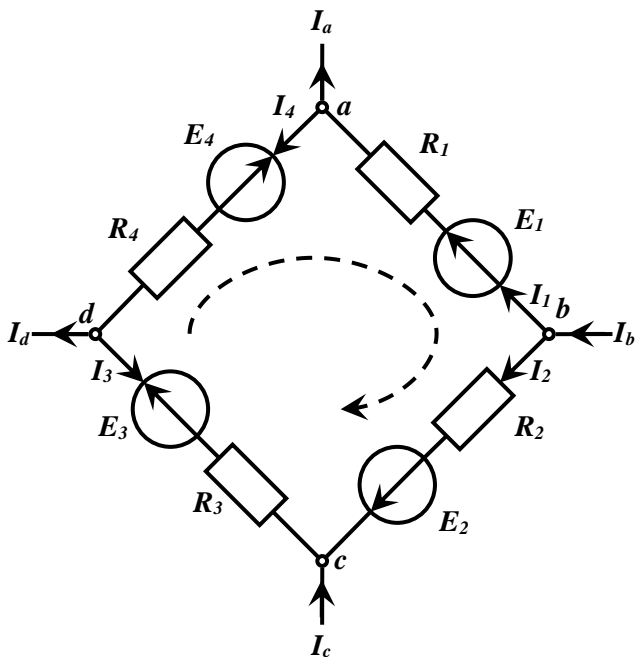


Рис. 4.4.2

Рівняння (4.4.3) виражає **другий закон Кірхгофа**: алгебраїчна сума спадів напруг на всіх елементах замкнутого контура дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі.

Для наведеного прикладу спочатку оберемо додатний напрям обходу контуру – за годинниковою стрілкою, тоді

$$-I_1R_1 + I_2R_2 - I_3R_3 - I_4R_4 = -E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочавши виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі:

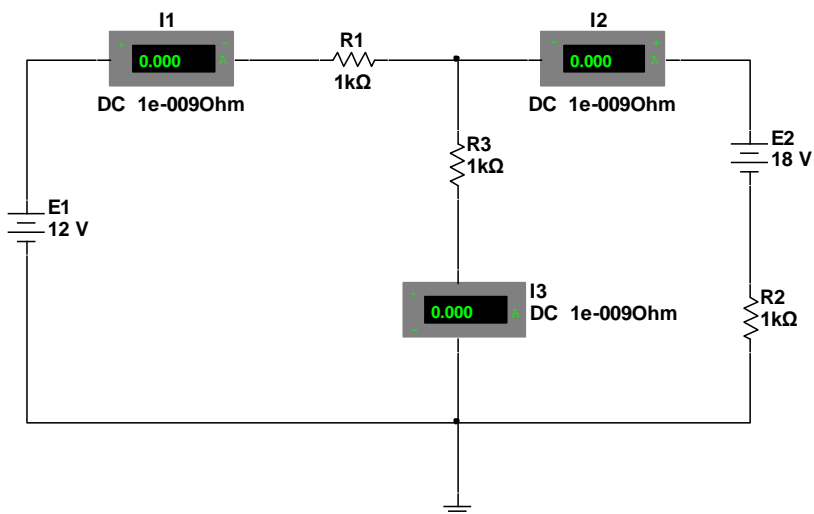




Рис. 4.4.3

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку .

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1. Виміряти і записати значення E_1 та E_2 в таблицю 4.4.1.

3.2. Дослід 2. Увімкнути схему й виміряти струми та напруги на опорах. Дані вимірювань занести в таблицю 4.4.1.

Таблиця 4.4.1

	Величини										
	E_1 В	E_2 В	R_1 кОм	R_2 кОм	R_3 кОм	I_1 мА	I_2 мА	I_3 мА	U_1 В	U_2 В	U_3 В
Дослід	12	18	$1 + N$	$2 + N$	$3 + N$						
Розрахунок	***	***	***	***	***						

*** – вказані комірочки не заповнюються

N – номер варіанта

4. Обробка і аналіз результатів

1. Здійснити перевірку першого закону Кірхгофа для всіх вузлів кола.
2. Здійснити перевірку другого закону Кірхгофа для двох контурів.
3. За даними E_1 та E_2 і відомими значеннями опорів розрахувати на основі законів Кірхгофа струми I_1, I_2, I_3 , занести їх у таблицю і порівняти з експериментальними даними.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця.
3. Розрахунок за схемою.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте та запишіть перший закон Кірхгофа.
2. Сформулюйте та запишіть другий закон Кірхгофа.
3. Як розрахувати електричне коло, використовуючи закони Кірхгофа?
4. Поясніть, як було розраховане досліджуване електричне коло.
5. Поясніть отримані результати та розбіжності між експериментальними та теоретичними даними.

Лабораторна робота № 5

МЕТОД НАКЛАДАННЯ

Мета роботи: перевірити на досліді, що струм у довільній вітці складного кола дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створених кожною ЕРС окремо.

Пояснення до роботи: студент при виконанні роботи повинен добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі і в чому полягає метод накладання при розрахунку електричного кола.

1. Теоретична частина

Якщо коло має кілька джерел живлення, то для його розрахунку можна застосовувати *метод накладання (суперпозиції)*. Цей метод використовує принцип незалежності дії ЕРС. Струми, які створюються кількома ЕРС, є алгебраїчною сумою струмів, що створюються кожним джерелом окремо. Цей метод має змогу замінити обчислення складних кіл розрахунком елементів кіл з одним джерелом живлення в кожному.

Обчислення складних кіл із кількома джерелами живлення можна здійснити в такий спосіб:

а) складне коло замінюють кількома елементарними колами, кожне з яких має одне джерело, інші замінюють опорами, що дорівнюють опорам внутрішніх джерел;

б) обчислюють елементарні кола, визначаючи величини та напрямки часткових струмів у кожній вітці;

в) у кожній вітці знаходять справжні струми як алгебраїчну суму відповідних часткових струмів.

Наприклад, розглянемо коло, наведене на рис. 4.5.1.

Спочатку розглянемо коло, в якому залишимо джерело E_1 , а замість джерела E_2 встановимо перемичку (рис. 4.5.1,а), оскільки внутрішній опір цієї ЕРС дорівнює нулю.

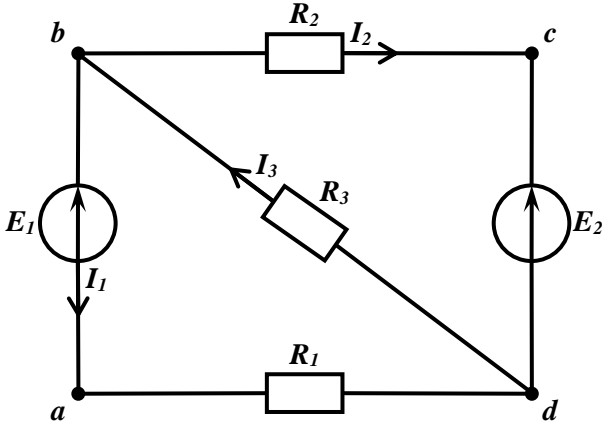


Рис. 4.5.1

Усі часткові струми у вітках позначимо зі штрихом. Тоді, за законом Ома, можна записати:

$$I_1' = \frac{-E_1}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}}; \quad I_3' = -\frac{E_1 + I_1' R_1}{R_3}; \quad I_2' = I_3' - I_1'.$$

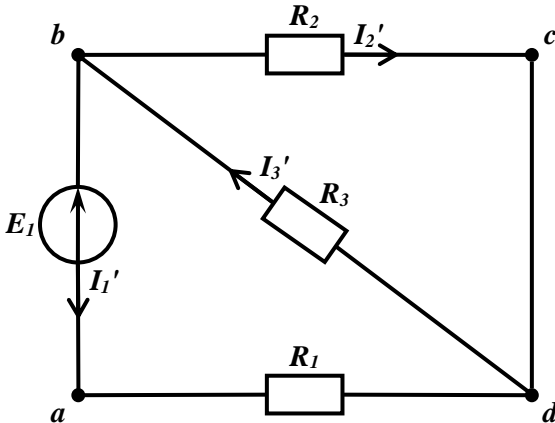


Рис. 4.5.1, а

Далі можна розглянути коло без джерела E_1 , але врахувати його внутрішній опір R_1 (рис. 4.5.1,б). Часткові струми позначимо двома штрихами:

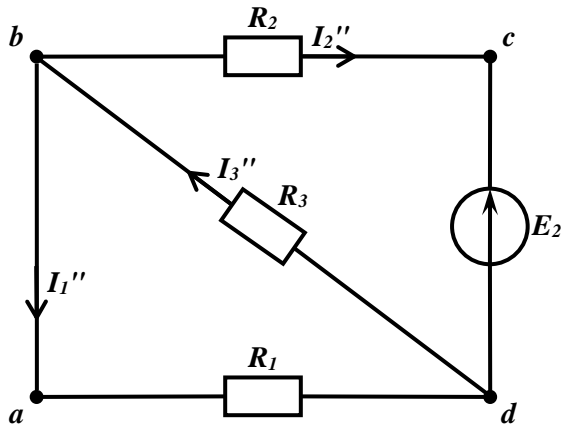


Рис. 4.5.1, б

$$I_2'' = \frac{-E_2}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}}$$

$$I_3'' = -\frac{E_2 + I_2'' R_2}{R_3};$$

$$I_1'' = I_3'' - I_2''.$$

Справжні струми є сумою відповідних часткових струмів електричних кіл, тобто:

$$I_1 = I_1' + I_1'',$$

$$I_2 = I_2' + I_2'',$$

$$I_3 = I_3' + I_3''.$$

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи до виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 4.5.2).

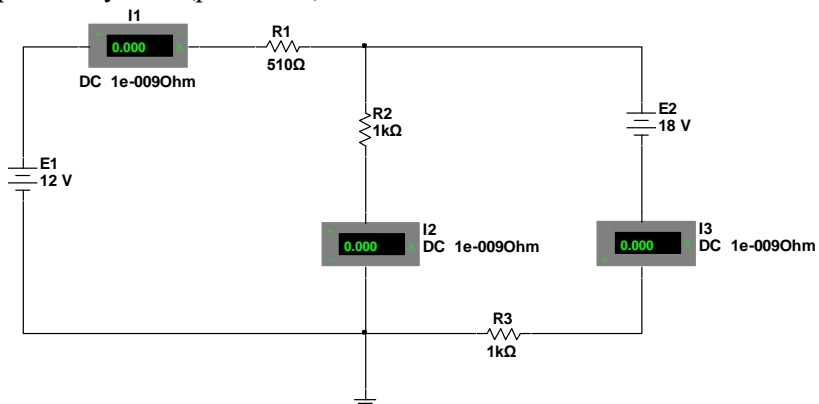




Рис. 4.5.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку .

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1. Увімкнути схему й виміряти струми I_1, I_2, I_3 .

3.2. Дослід 2. Вимкнути джерело E_2 і виміряти часткові струми I'_1, I'_2, I'_3 .

3.3. Дослід 3. Вимкнути джерело E_1 і виміряти часткові струми I''_1, I''_2, I''_3 .

Результати вимірювань занести в таблицю 4.5.1.

Примітка: При проведенні експерименту внутрішнім опором джерел нехтуємо. При вимірюванні струмів зверніть увагу на напрям струмів!

Таблиця 4.5.1

	E_1 В	E_2 В	R_1 кОм	R_2 кОм	R_3 кОм	I_1 мА	I_2 мА	I_3 мА
Результати досліджу			N	$N + 1$	$N + 5$			
Розрахунок за дослідними даними	***	***	***	***	***			
Розрахунок за початковими даними								

	I'_1 мА	I'_2 мА	I'_3 мА	I''_1 мА	I''_2 мА	I''_3 мА
Результати досліджу						
Розрахунок за дослідними даними	***	***	***	***	***	***
Розрахунок за початковими даними						

*** – вказані комірочки не заповнюються

N – номер варіанта

4. Обробка і аналіз результатів

1. Користуючись методом накладання провести розрахунок струмів у вітках за початковими та дослідними даними.
2. Порівняти розраховані та дослідні дані.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте принцип накладання.
2. Який порядок розрахунку електричних кіл методом накладання?
3. Яке призначення та характеристики використаних у роботі елементів електричного кола?
4. Сформулюйте та запишіть закони Кірхгофа.
5. Поясніть отримані результати та розбіжності між експериментальними та теоретичними даними.

Лабораторна робота № 6

КОЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗІ ЗМІННИМ ОПОРОМ НАВАНТАЖЕННЯ

Мета роботи: набуття практичних навичок дослідження роботи джерел електрорушійної сили в режимах генератора та акумулятора електричної енергії.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре уявляти, які особливості реалізуються в електричному колі при зустрічному та узгодженому з'єднанні джерел енергії в електричному колі.

1. Теоретична частина

Розрізняють характерні режими роботи джерел живлення:

- номінальний;
- неробочий (або режим холостого ходу);
- короткого замикання;
- узгоджений.

Режим роботи визначається співвідношенням між опором навантаження R_H та внутрішнім опором джерела живлення R (рис. 4.6.1).

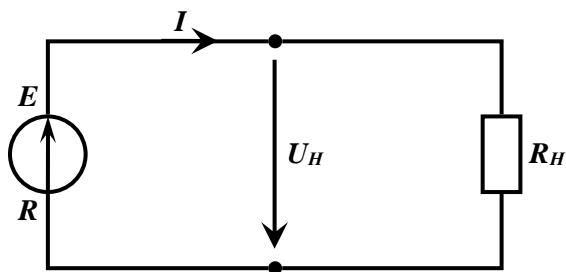


Рис. 4.6.1

Номінальний режим гарантує оптимальні параметри джерела живлення, досить високий ККД, надійність і довговічність.

Неробочий режим – це режим, за якого зовнішнє коло розімкнене. Напруга на клемх джерела максимальна і дорівнює ЕРС, струм у колі відсутній. Цей режим також називають холостим ходом (XX).

Режим короткого замикання (КЗ) реалізується тоді, коли опір навантаження дорівнює нулю ($R_H = 0$). Напруга на приймачі енергії відсутня, струм короткого замикання дуже великий.

Узгоджений режим – це такий режим, за якого у навантаження передається максимальна потужність від джерела. При цьому ККД передачі нижчий за ККД у номінальному режимі.

Режими роботи джерел живлення визначаються співвідношеннями опорів зовнішнього та внутрішнього кіл. Передавання потужності в навантаження характеризують такі величини:

P – потужність, що розвиває джерело живлення;

P_H – потужність, що передається у навантаження;

η – ККД передавання потужності.

Використовуючи закон Ома для розглянутого кола

$$I = \frac{E}{R + R_H},$$

потужність, що розвиває джерело живлення, можна описати співвідношенням

$$P = EI = \frac{E^2}{R + R_H}.$$

Дослідження залежності $P = P(R_H / R)$ у різних режимах роботи показують:

а) у режимі XX ($R_H \rightarrow \infty$) $I = 0$, $P = 0$;

б) у режимі КЗ ($R_H = 0$) $I = I_K = \frac{E}{R}$, $P = \frac{E^2}{R}$;

в) в узгодженому режимі, коли $R_H = R$, $P = \frac{E^2}{2R}$.

Залежність $P = P(R_H / R)$ наведена на (рис. 4.6.2). Вісь ординат у цьому разі характеризує режим короткого замикання, а неробочий режим (НР) визначається нескінченністю на вісі абсцис.

Коли зовнішній та внутрішній опори однакові ($R_H / R = 1$), джерело розвиває половину максимальної потужності.

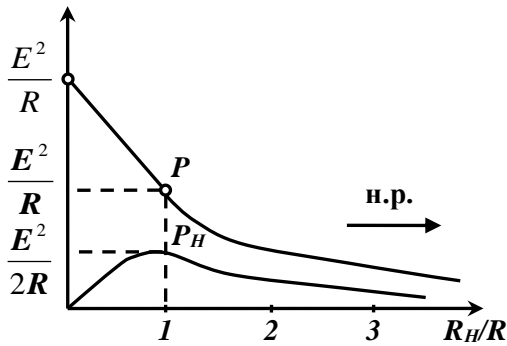


Рис. 4.6.2

Потужність, що передається до навантаження.

$$P_H = I^2 R_H = \frac{E^2 R_H}{(R + R_H)^2}.$$

У граничних режимах:

а) неробочому ($R_H \rightarrow \infty$), $P_H = 0$;

б) короткого замикання ($R_H = 0$), $P_H = 0$.

Дослідимо $P = P(R_H / R)$ на екстремум, для чого продиференціюємо вираз за R_H і частинну похідну прирівняємо до нуля. Тоді отримаємо умову $R_H = R$, при цьому $R_H = \frac{E^2}{4R}$. Отже, максимальна потужність передається до навантаження, коли $R_H = R$. Цей режим називається *узгодженим* (УР). Залежність $\eta = \eta(R_H / R)$ визначається співвідношенням

$$\eta = \frac{P_H}{P} = \frac{R_H}{R + R_H} = \frac{1}{1 + \frac{R_H}{R}}.$$

У граничних режимах:

- а) неробочому ($R_H \rightarrow \infty$) $\eta \rightarrow 1$;
- б) короткого замикання ($R_H = 0$) $\eta = 0$;
- в) узгодженому $R_H = R, \eta = 0,5$.

Отже номінальний режим забезпечується, коли $R_H > R$. У цьому режимі значна частина потужності передається в навантаження при досить великому ККД ($\eta > 0,5$).



Режими роботи джерела визначаються співвідношенням R_H / R . Якщо джерело живлення має дуже малий внутрішній опір ($R \rightarrow \infty$), то таке джерело підтримує порівняно сталу напругу на навантаженні й називається *джерелом ЕРС*.

Є джерела живлення, що мають дуже великий внутрішній опір. Струм у колі з таким джерелом майже не залежить від опору навантаження й підтримується порівняно сталим. Таке джерело називається *джерелом струму*.

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану наведену нижче схему на робочому полі, $r_0 = N$ кОм, а N – номер варіанта.

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку .

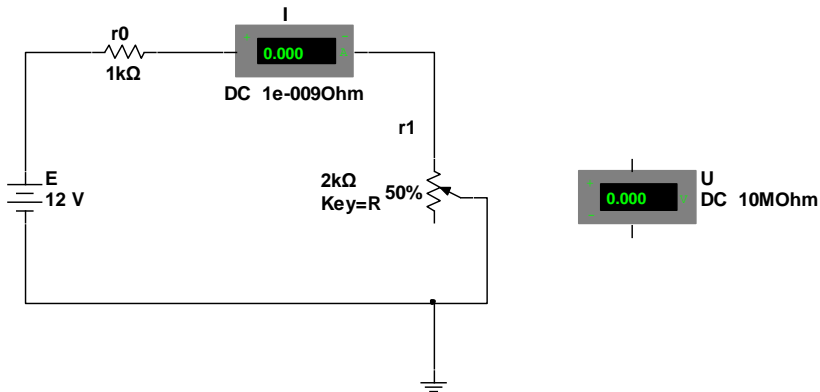


Рис. 4.6.3

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: При $r_1 = 0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 . Результати вимірювань занести в таблицю 4.6.1.

3.2. Дослід 2: При $r_1 = 0.5r_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 . Результати вимірювань занести в таблицю 4.6.1.

3.3. Дослід 3: При $r_1 = r_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 . Результати вимірювань занести в таблицю 4.6.1.

3.4. Дослід 4: При $r_1 = 2r_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 . Результати вимірювань занести в таблицю 4.6.1.

3.5. Дослід 5: При $r_1 = 3r_0$ провести вимірювання струму і напруг U_0, U_1 . Результати вимірювань занести в таблицю 4.6.1.

Таблиця 4.6.1

№ досліду	Результати дослідів				Розраховані величини					
	E <i>B</i>	I <i>mA</i>	U_0 <i>B</i>	U_1 <i>B</i>	r_0 <i>кОм</i>	r_1 <i>кОм</i>	P <i>Bm</i>	P_0 <i>Bm</i>	P_1 <i>Bm</i>	к.к.д. %
1. $r_1 = 0$										
2. $r_1 = 0.5r_0$										
3. $r_1 = r_0$										
4. $r_1 = 2r_0$										
5. $r_1 = 3r_0$										

4. Обробка і аналіз результатів

1. Розрахувати потужності P, P_0, P_1 та к.к.д. передачі енергії.

2. Побудувати графічні залежності напруг U_1, U_0 , потужностей P, P_0, P_1 і к.к.д від струму.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Досліджувані схеми. Таблиця. Графіки
3. Розрахункові формули. Розрахунок за схемою.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. Яка умова передачі максимальної потужності від джерела до навантаження?
2. Як визначається коефіцієнт корисної дії передачі енергії від джерела до навантаження?
3. Що таке умова узгодженого навантаження і чому дорівнює к.к.д. при цій умові?
4. Поясніть порядок розрахунку досліджуваного кола.
5. Поясніть з яких міркувань обирають опір навантаження.

Лабораторна робота № 7

ВИВЧЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗАРЯДКИ І РОЗРЯДКИ КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: дослідна перевірка теоретичних положень про перехідні процеси в RC - колі.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі у перехідних процесах.

1. Теоретична частина

Перехідні процеси виникають у колах під час переходу від одного усталеного режиму до іншого. Зміна режиму електричного кола відбувається внаслідок зміни його структури (вмикання, вимикання, коротке замикання віток – однієї або певної їх сукупності). Ці зміни називають комутаціями електричних кіл.

Дослідження перехідного процесу в електричному колі полягає у знаходженні закону зміни перехідної величини та тривалості перехідного процесу.

Закони комутації впливають із закону збереження енергії, накопиченої в реактивних елементах електричного кола (конденсаторах або котушках).

Розглянемо електричне коло (рис. 4.7.1).

За другим законом Кірхгофа, рівняння електричної рівноваги для цього кола після замикання ключа має вигляд

$$Ri + u_c = E .$$

З урахуванням того, що струм через конденсатор дорівнює $i = C \frac{du_c}{dt}$, це рівняння запишемо так:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E . \quad (4.7.1)$$

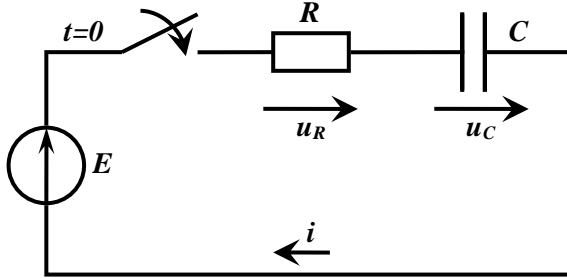


Рис. 4.7.1

У такому колі напруга конденсатора в момент комутації не може змінитися стрибком. Для обґрунтування підемо від зворотного, тобто припустимо, що напруга після замикання ключа змінилася стрибком. Тоді похідна $\frac{du_C}{dt}$ у цей момент часу прямує до нескінченності. Звідси випливає, що струм, через конденсатор теж нескінченно зростає $i = C \frac{du_C}{dt} \rightarrow \infty$, що не відповідає рівнянню електричної рівноваги (4.7.1). Отже, припущення про стрибкоподібну зміну напруги конденсатора в момент комутації суперечить другому закону Кірхгофа. На підставі цього можна сформулювати другий закон комутації.

Напруга на конденсаторі безпосередньо до комутації $u_C(0_-)$ дорівнює напрузі на конденсаторі безпосередньо після комутації $u_C(0_+)$:

$$u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Закони комутації можна також пояснити на підставі таких міркувань. Струми та напруги в електричних колах не можуть досягати нескінченних значень. Отже, миттєва потужність p завжди має скінченне значення. Звідси випливає, що в елементах

електричних кіл енергія електричного і магнітного полів не може змінюватися стрибком, тобто потужність $P = \frac{dW}{dt}$ матиме скінченне значення при $\Delta t \rightarrow 0$, а зміна енергії елементів кола $\Delta W = W(0_+) - W(0_-)$ прямуватиме до нуля і дорівнюватиме:

$$W(0_+) = W(0_-). \quad (4.7.2)$$

Оскільки енергія електричного поля:

$$W_E = \frac{Cu_C^2}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

то рівняння (4.7.2) можна записати в такому вигляді:

$$u_C(0_+) = u_C(0_-); \quad (4.7.3)$$



$$q_C(0_+) = q_C(0_-). \quad (4.7.4)$$

Рівняння (4.7.3) і (4.7.4) виражають закони комутації, отримані нами вище. Отже, другий закон комутації можна сформулювати ще й так: напруга та заряд конденсатора в момент комутації за своїми значеннями незмінні.

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 4.7.2), де $C = (500 + 10N)\mu F$, N – номер варіанта.

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку .

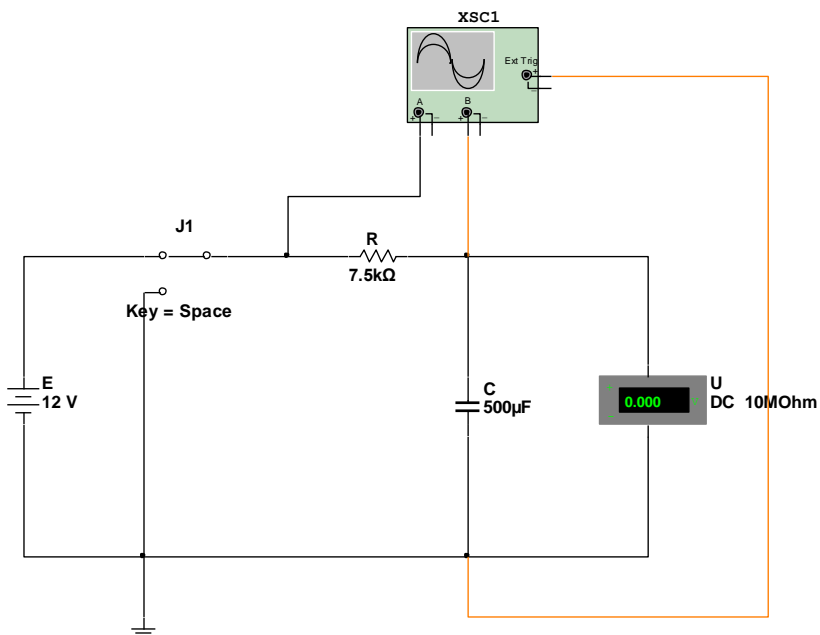



Рис. 4.7.2

3. Порядок виконання роботи

3.1. За даними значеннями R та C обчислити постійні часу τ , 2τ , 3τ , 4τ , 5τ ($\tau = RC$) у секундах, значення занести в таблицю 4.7.1.

3.2. Дослід 1: Увімкнути джерело ЕРС і одночасно спостерігати перехідний процес на осцилографі. Подвійним натисканням лівої клавіші мишки по зображенню осцилографа розкрийте його вікно. Установіть для обох каналів A і B масштаб 5v/div , зміщення (Y position) – 0, масштаб по вісі часу $Timebase$ – 1s/div і режим відкритого входу DC . Для виконання моделювання увімкніть кнопку живлення схеми. Для зупинки без виходу з режиму моделювання натисніть кнопку . Для зміни швидкості перебігу часу моделювання у вкладці головного меню *Simulate* натисніть *Interactive Simulation Setting*, у вікні, що відкрилось встановіть прапорець навпроти параметру *Maximum*

time step (TMAX) і задайте значення цього параметру – 0.001. Для побудови осцилограми напруги на ємності зупиніть процес моделювання і запишіть значення напруги у моменти часу, розраховані у пункті 2.1.

3.3. Дослід 2: Знайти напруги зарядки на ємності для моментів часу τ , 2τ , 3τ , 4τ , 5τ де $\tau = RC$ – постійна часу кола.

3.4. Дослід 3: Переводячи перемикач у режим "виключено" визначити напругу на ємності при розрядці.

Таблиця 4.7.1

Час, с	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$u_3(t)$, В						
$u_p(t)$, В						
$i_3(t)$, мА						
$i_p(t)$, мА						

4. Обробка і аналіз результатів

1. Дані вимірів та розрахунків внести в таблицю 4.7.1.
2. За дослідними даними розрахувати струм зарядки $i_3(t)$ для $t = \tau$, 2τ , 3τ , 4τ , 5τ і струм розрядки $i_p(t)$ конденсатора, розраховані дані занести в таблицю 4.7.1.

$$i_3 = \frac{E - u_3}{R}, \quad i_p = -\frac{u_p}{R}$$

3. Побудувати графіки $u_3(t)$, $i_3(t)$ в одних координатах.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Схема дослідження.
3. Розрахункові формули.
4. Таблиця з даними вимірів та розрахунків, графіки.
5. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте закони комутації.
2. Які фізичні причини виникнення перехідних процесів?
3. Як зміняться криві зарядки при:
 - а) збільшенні ємності C у два рази?
 - б) збільшенні опору R у два рази?
4. Як ще можна сформулювати закони комутації?
5. Що таке постійна часу кола?

Лабораторна робота № 8

ПОСЛІДОВНЕ RC -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ НОГО СТРУМУ

Мета роботи: відпрацювання практичних навичок та перевірка на досліді теоретичних положень про розподіл напруг і фазових зсувів у RC -колі.

Пояснення до роботи: під час виконання роботи треба добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі ного струму.

1. Теоретична частина

У будь-якій електричній установці між проводами і землею (в лініях електропередавання) та іншими елементами струмопровідних конструкцій утворюються ємності. У силових установках конденсатори використовують для підвищення коефіцієнта потужності; у радіотехніці конденсатори застосовують у коливних контурах, фільтрах тощо.

Розглянемо коло ного струму, в якому послідовно з'єднані резистивний елемент (R) і конденсатор (C) (рис. 4.8.1).

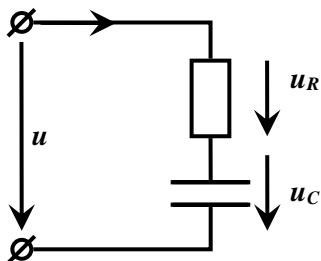


Рис. 4.8.1

До кола (рис. 4.8.1) прикладемо ну напругу

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U),$$

відповідно струм у колі теж буде ним:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_I).$$

Оберемо початкову фазу напруги ψ_U так, щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю ($\psi_I = 0$).

Тоді, за другим законом Кірхгофа, повна напруга в колі буде

$$u = u_R + u_C = U_{mR} \sin \omega t + U_{mC} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.8.1)$$

Після нескладних математичних перетворень запишемо максимальне значення напруги, прикладеної до кола

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + U_{mC}^2}, \quad (4.8.2)$$

де $U_m = \sqrt{2}U$, U – діюче значення напруги.

Виразивши в рівнянні (4.8.2) напруги елементів через струм і їх опори, отримаємо

$$U = I \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = I \cdot Z. \quad (4.8.3)$$

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (4.8.4)$$

називається *повним опором* ділянки кола.

Звідси отримаємо закон Ома для кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}. \quad (4.8.5)$$

Залежність кута зсуву фаз від параметрів знаходиться за співвідношенням

$$R = Z \cos \varphi. \quad (4.8.6)$$

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 4.8.2), де $C = (3 + N) \mu F$, N – номер варіанта.

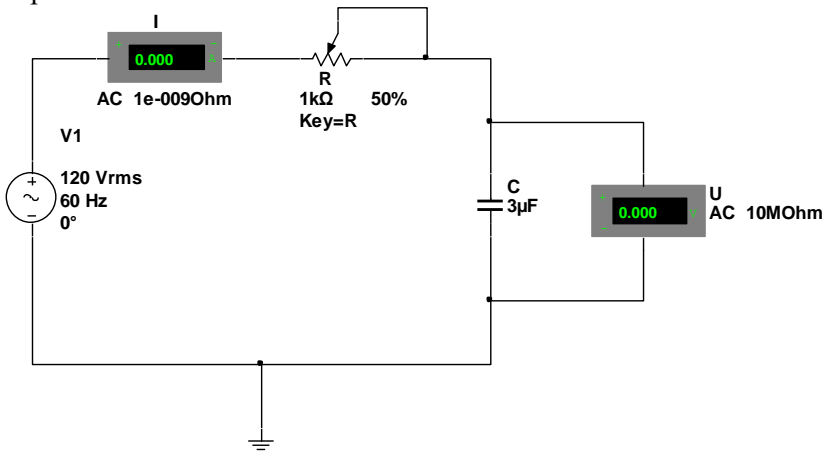




Рис. 4.8.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Не забудьте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно увімкнути *Mode AC*,

двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна.

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: вимірювання. Увімкнути джерело і провести вимірювання відповідно до таблиці 4.8.1. Вимкнути джерело. Занести отримані дані в таблицю.

3.2. Дослід 2: Змінити значення параметрів схеми (відповідно до таблиці) і повторити вимірювання. Занести отримані дані в таблицю.

3.3. Провести розрахунок величин

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2};$$

$$I = \frac{U}{Z}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

Отримані дані занести в таблицю.

Таблиця 4.8.1

Дослід	Виміряні величини						Розраховані величини			
	C , мкФ	R , кОм	U , В	I , мА	U_R , В	U_C , В	X_C , кОм	Z , кОм	I , мА	$\cos \varphi$
$R = 0, C$	$3+N$	0								
R, C	$3+N$	N								

4. Обробка і аналіз результатів

1. Дані вимірювань та розрахунків внести в таблицю 4.8.1.
2. За дослідними даними переконатись, що $U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$.

3. Побудувати векторні діаграми напруг у вибраному масштабі.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Схема дослідження. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
3. Векторні діаграми.
4. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. Дайте означення ємності конденсатора.
2. Як зміниться кут зсуву фаз при зменшенні ємності конденсатора C ?
3. На який кут струм конденсатора випереджає за фазою напругу?
4. Які одиниці виміру ємності конденсатора?
5. Запишіть закон Ома для кола змінного струму?

Лабораторна робота № 9

ПОСЛІДОВНЕ RL -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: відпрацювання практичних навичок та перевірка на досліді теоретичних положень про розподіл напруг і фазових зсувів у RL -колі синусоїдного струму.

Пояснення до роботи: під час виконання роботи слід добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі.

1. Теоретична частина

Розглянемо коло синусоїдного струму, в якому послідовно з'єднані резистивний елемент (R) і котушка з індуктивністю L (рис. 4.9.1).

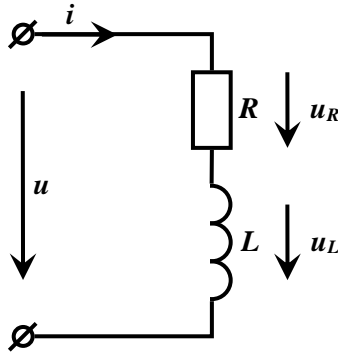


Рис. 4.9.1

До кола прикладемо синусоїдну напругу

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_U),$$

відповідно струм у колі теж буде синусоїдним:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_I).$$

Оберемо початкову фазу напруги ψ_U так, щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю ($\psi_I = 0$).

Тоді, за другим законом Кірхгофа, повна напруга в колі буде

$$u = u_R + u_L = U_{mR} \sin \omega t + U_{mL} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (4.9.1)$$

Після нескладних математичних перетворень запишемо максимальне значення напруги, прикладеної до кола

$$U_m = \sqrt{U_{mR}^2 + U_{mL}^2}, \quad (4.9.2)$$

де $U_m = \sqrt{2}U, U$ – діюче значення напруги.

Виразивши в рівнянні (4.8.2) напруги елементів через струм і їх опори, отримаємо

$$U = I \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = I \cdot Z. \quad (4.9.3)$$

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + X_L^2} \quad (4.9.4)$$

називається *повним опором* ділянки кола.

Звідси отримаємо закон Ома для кола змінного струму:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (4.9.5)$$

Залежність кута зсуву фаз від параметрів знаходиться за співвідношенням

$$R = Z \cos \varphi.$$

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 4.9.2), де $L = (8 + N) \mu\text{H}$, N – номер варіанта.

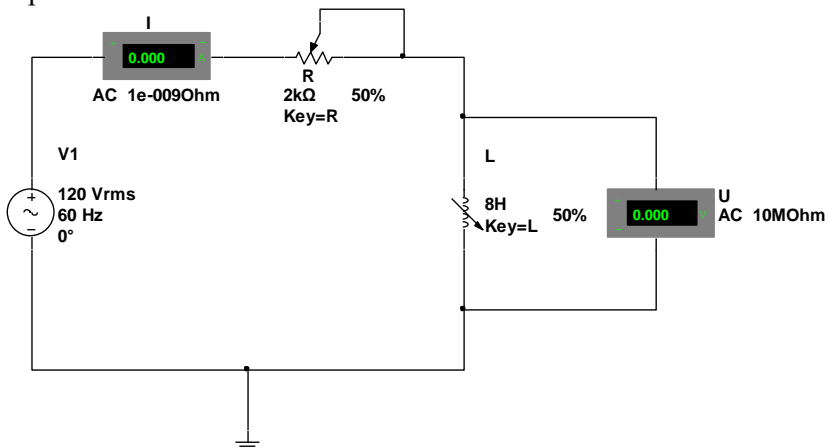




Рис. 4.9.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Не забудьте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно увімкнути *Mode AC*, двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна.

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: Встановіть значення індуктивності $I_{\text{макс}}$, увімкніть джерело і проведіть вимірювання відповідно до таблиці 4.9.1. Вимкніть джерело.

3.2. Дослід 2: Провести дослід, керуючись пунктом 2 таблиці.

3.3. Дослід 3: Спостерігайте за зміною величин при введенні осердя в котушку індуктивності. Проведіть вимірювання відповідно до третього пункту таблиці 4.9.1.

Таблиця 4.9.1

№	Дослід	Виміряні величини						Розраховані величини				
		U В	I мА	U_R В	U_L В	R кОм	L Гн	X_L кОм	R кОм	Z кОм	I мА	$\cos \varphi$
1	$R = 0,$ L_{max}											
2	$R,$ L_{max}											
3	$R,$ $L = 0.5L_{max}$											

4. Обробка і аналіз результатів

- Дані вимірювань та розрахунків внести в таблицю 4.9.1.
- Провести розрахунок наступних величин $R, X_L, Z, \cos \varphi$. Результати розрахунків записати у таблицю.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL; \quad R = \frac{U_R}{I}; \quad Z = \sqrt{R^2 + X_L^2};$$

$$I = \frac{U}{Z}; \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

- За дослідними даними перевірити, що

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}.$$

- Побудувати векторні діаграми напруг.

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи.
2. Схеми дослідів. Таблиця з даними вимірювань та розрахунків.
3. Розрахункові формули, розрахунки величин.
4. Векторні діаграми. Пояснення до результатів дослідів.
5. Короткі висновки про виконану роботу.

Контрольні запитання та завдання

1. Запишіть закон Ома для кола змінного струму.
2. Як зміниться кут зсуву фаз при зменшенні індуктивності котушки L ?
3. На який кут напруга на котушці за фазою випереджає струм?
4. Яка величина називається індуктивним опором?
5. В яких одиницях вимірюється індуктивність?

Лабораторна робота № 10

ПОСЛІДОВНЕ LC -З'ЄДНАННЯ. РЕЗОНАНС НАПРУГ

Мета роботи: дослідження процесів у послідовному LC -колі при різних співвідношеннях їх опорів.

Пояснення до роботи: під час виконання роботи потрібно добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі.

1. Теоретична частина

До кола (рис. 4.10.1) прикладемо синусоїдну напругу:

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

відповідно струм у колі теж буде синусоїдним

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

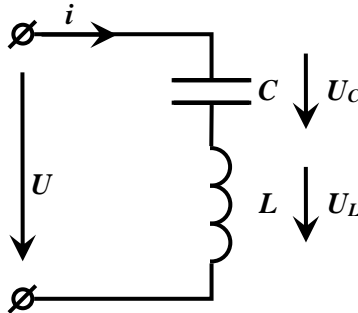


Рис. 4.10.1

Для спрощення викладу підберемо таку початкову фазу напруги ψ_u , щоб початкова фаза струму дорівнювала нулю $\psi_i = 0$. Тоді початкова фаза напруги дорівнюватиме $\psi_u = \varphi$. З урахуванням цього, вирази для струму і напруги матимуть вигляд:

$$i = I_m \sin \omega t; \quad u = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (4.10.1)$$

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа для миттєвих значень напруг

$$u = u_L + u_c. \quad (4.10.2)$$

Після нескладних перетворень, отримаємо закон Ома для кола змінного струму

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{X_L - X_C} = \frac{U}{\omega L - \frac{1}{\omega C}}. \quad (4.10.3)$$

Явище, в якому струм у колі, за наявності у ньому реактивних елементів (індуктивності та ємності), збігаються за фазою з напругою, прикладеною до цього кола, називають *резонансом*.

Необхідною умовою резонансу напруг є послідовне з'єднання індуктивного та ємнісного елементів.

Резонанс настане, якщо виконується умова:

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

$$\omega^2 LC = 1 \quad (4.10.4)$$

Явище, яке виникає при послідовному з'єднанні індуктивних та ємнісних елементів, за умови $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, називається *резонансом напруг*.

Як впливає з рівняння (4.10.4), резонансу в колі можна досягнути, змінюючи частоту, індуктивність та ємність.

Частоти $\omega_0, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ називають *резонансними*. Вони є власними частотами контуру.

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі:

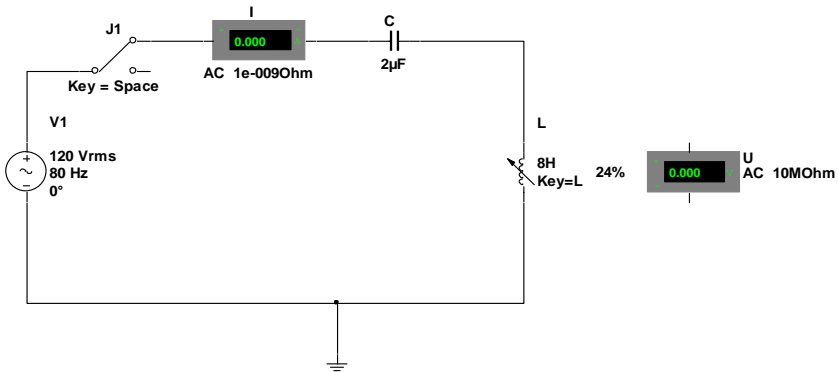




Рис. 4.10.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Не забудьте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно *Mode AC*, двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна.

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: Провести дослід відповідно таблиці 4.10.1.:

а) переміщуючи осердя котушки, досягніть резонансу напруг за максимальним значенням струму в колі I (за умови $X_L = X_C$),

б) зменшуючи L , встановіть значення I у два рази менше від резонансного значення ($X_L = X_C$),

в) налаштуйте коло в резонанс і, продовжуючи збільшувати L , отримайте зменшення струму, порівняно з резонансним у два рази ($X_L < X_C$).

4. Обробка і аналіз результатів

1. Дані вимірювань та розрахунків внести до таблиці 4.10.1.

2. Провести розрахунок величин x_L , x_C , Z_K , $\cos \varphi$, L , Z , U_K , U_L , (за вихідними даними). Результати розрахунків внести до таблиці 4.10.1.

Примітка: під час розрахунку x_L врахувати активний опір котушки r_K , який вимірюють у резонансному режимі, коли $x = x_L - x_C = 0$.

$$r_K = \frac{U^P}{I^P}; \quad Z_K = \frac{U_K^P}{I^P}; \quad x_L = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2}; \quad x_C = \frac{U_C}{I};$$

$$L = \frac{x_L}{2\pi f}; \quad Z = \sqrt{r_K^2 + (x_L - x_C)^2}; \quad U_K = I r_K;$$

$$U_L = I x_L; \quad U_C = I x_C; \quad \cos \varphi = \frac{r_K}{Z}.$$

Зміст звіту

1. Найменування і мета роботи
2. Схема дослідження, таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунок величин для досліду.
4. Векторна діаграма для усіх дослідів.
5. Короткі висновки про виконану роботу.

Таблиця 4.10.1

№	ДОСЛІД	Виміряні величини					Розраховані величини								
		U , В	U_k , В	U_c , В	I , мА	r_k , Ом	Z_k , кОм	X_c , кОм	X_L , кОм	L , Гн	Z , кОм	U_k , В	U_L , В	U_c , В	$\cos\varphi$
1	$X_L = X_c$														
2	$X_L < X_c$						**	**	**	**	**	**	**	**	**
3	$X_L > X_c$						**	**	**	**	**	**	**	**	**

$C = N, \mu F, N$ – номер варіанта

** – вказані комірки не заповнюються

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке резонанс напруг?
2. У скільки разів зростають U_C і U_L при резонансі?
3. Чому дорівнює активна потужність при резонансі?
4. Які одиниці вимірювання індуктивності котушки?
5. Вкажіть одиниці вимірювання ємності конденсатора

Лабораторна робота № 11

ПАРАЛЕЛЬНЕ RC -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: відпрацювання практичних навичок і дослідна перевірка теоретичних положень про розподіл струмів у колах із паралельним з'єднанням резистивного та ємнісного елементів.

1. Теоретична частина

На рис. 4.11.1 зображено схему електричного кола з паралельним з'єднанням елементів R і C . У цьому колі напруги на кожній вітці схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює сумі струмів віток.

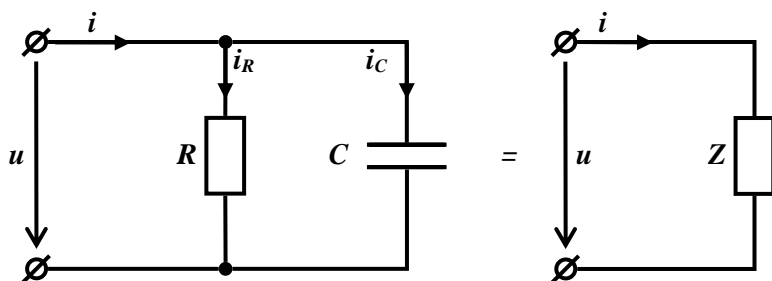


Рис. 4.11.1

Нехай напруга джерела змінюється за синусоїдним законом з початковою фазою $\psi_U = 0$. Тоді струм у нерозгалуженій частині кола і теж змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_i = \psi_U - \varphi = -\varphi$:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Струми у паралельних вітках схеми визначимо за відповідними виразами:

$$I_m^R = \frac{U_m}{R} \quad \text{і} \quad I_m^C = \frac{U_m}{x_C}.$$

Тоді миттєві значення:

$$i_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t, \quad i_C = \frac{U_m}{x_C} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, струм до розгалуження дорівнює:

$$i = i_R + i_C = U_m g \sin \omega t + U_m b_C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

де $g = \frac{1}{R}$ – активна провідність ($[g] = 1 \text{ См}$); $b_C = \frac{1}{x_C}$ – реактивна ємнісна провідність ($[b_C] = 1 \text{ См}$);

$$I_m = \sqrt{(I_m^R)^2 + (I_m^C)^2} \text{ – максимальне значення струму;}$$

$$\varphi = \text{arctg} \left(\frac{b_C}{g} \right).$$

Діюче значення струму джерела

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}. \quad (4.11.1)$$

Виразивши в рівнянні (4.11.1) струми паралельних віток через напругу і відповідні провідності, отримаємо:

$$I = Uy = U\sqrt{g^2 + b_c^2}.$$

Величину

$$y = \sqrt{g^2 + b_c^2}$$

називають *повною провідністю кола*.

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі (рис. 4.11.2), де $C = N\mu F$, N – номер варіанта.

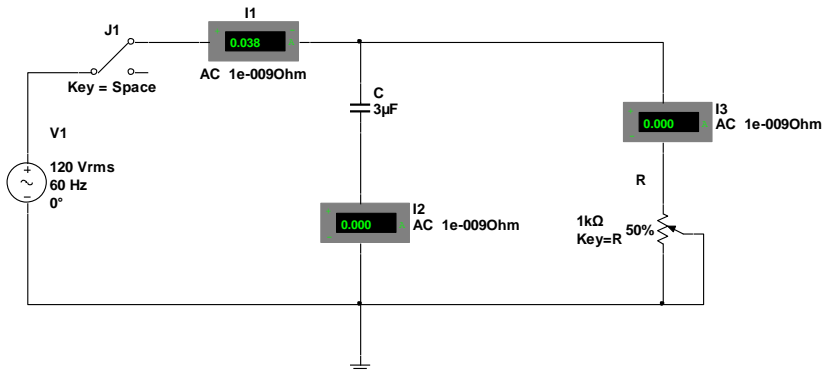




Рис. 4.11.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Пом'ятайте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно, двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна, що відкрилось, увімкнути *Mode AC*.

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: Провести дослід відповідно до пункту першого таблиці 4.11.1.

3.2. Дослід 1: Параметри елементів для проведення цього досліді слід брати з пунктів 2 і 3 табл. 4.11.1.

Таблиця 4.11.1

№	Дослід	Виміряні величини					Розраховані величини					
		C , мкФ	R , кОм	U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	x_c , кОм	b , См	g , См	y , См	I_1 , мА
1	$R = 1\text{кОм}$											
2	$R = 0.5\text{кОм}$											
3	$R = 875\text{Ом}$											

4. Обробка і аналіз результатів

- Дані вимірювань внести до таблиці 4.11.1.
- Провести розрахунок величин x_c, b, g, y, I_1 :

$$x_c = U / I_2; b = \frac{1}{x_c}; g = \frac{1}{R}; y = \sqrt{g^2 + b^2}; I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}$$

- Результати розрахунків внести до таблиці 4.11.1.
- Порівняти I_1 розрахований і дослідний.
- За дослідними даними переконатись, що $I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}$.

Зміст звіту

- Найменування та мета роботи.
- Схема досліджень, таблиця.
- Розрахункові формули.
- Векторні діаграми (в масштабі).
- Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке коло синусоїдного струму?
2. Записати формулу активної провідності.
3. Яку величину називають повною провідністю кола?
4. Поясніть, чому в усіх дослідах струм I_2 однаковий.
5. Як і чому змінюються I_1, I_2, I_3 при збільшенні R у 2 рази?

Лабораторна робота № 12

ПАРАЛЕЛЬНЕ RL -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: відпрацювання практичних навичок і перевірка на досліді теоретичних положень про розподіл струмів у колах із паралельним з'єднанням резистивного та індуктивного елементів.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі.

1. Теоретична частина

На рис. 4.12.1 зображено схему електричного кола з паралельним з'єднанням елементів R і L . У цьому колі напруги на кожній вітці схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює сумі струмів віток.

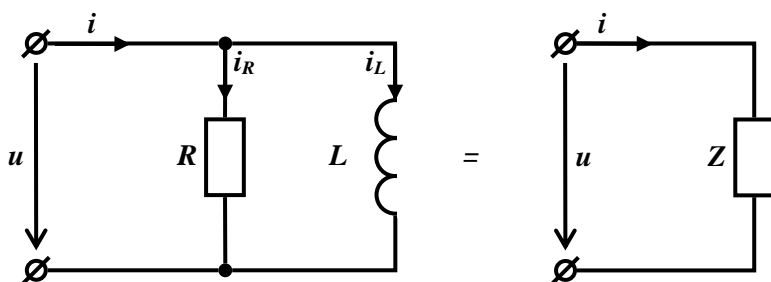


Рис. 4.12.1

Нехай напруга джерела змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_U = 0$. Тоді струм у нерозгалуженій частині кола і теж змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_i = \psi_U - \varphi = -\varphi$:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Струми у паралельних вітках схеми визначимо за відповідними виразами:

$$I_m^R = \frac{U_m}{R} \quad \text{і} \quad I_m^L = \frac{U_m}{x_L}.$$

Тоді миттєві значення:

$$i_R = \frac{U_m}{R} \sin \omega t, \quad i_L = \frac{U_m}{x_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, струм джерела дорівнює:

$$i = i_R + i_L = U_m g \sin \omega t + U_m b_L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

де $g = \frac{1}{R}$ активна провідність ($[g] = 1 \text{ См}$); $b_L = \frac{1}{x_L}$ – реактивна індуктивна провідність ($[b_L] = 1 \text{ См}$);

$$I_m = \sqrt{(I_m^R)^2 + (I_m^L)^2} \text{ – максимальне значення струму,}$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{b_L}{g}\right).$$

Діюче значення струму джерела

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}. \quad (4.12.1)$$

Виразивши в рівнянні (4.12.1) струми паралельних віток через напругу і відповідні провідності, отримаємо:

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + b_L^2} .$$

Величина

$$y = \sqrt{g^2 + b_L^2}$$

називається *повною провідністю кола*.

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі:

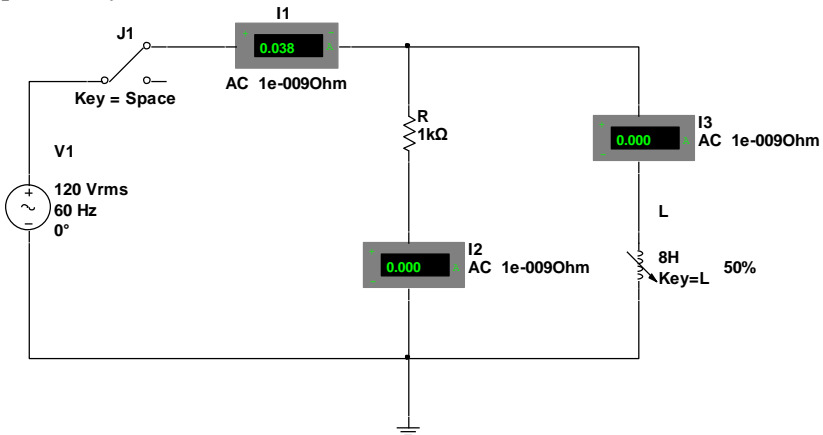




Рис. 4.12.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Пам'ятайте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно увімкнути *Mode AC*, двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна.

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: Провести досліди відповідно до таблиці 4.12.1.

3.2. Дослід 1: Спостерігати за зміною вимірних величин при введенні осердя в катушку L .

Таблиця 4.12.1

№	Дослід	Виміряні величини				Розраховані величини			
		U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	g_2 , См	b_3 , См	y , См	I_1 , мА
1	R, L_{\max}								
2	$0.5R, L_{\max}$					***	***	***	***
3	$R, 0.1L_{\max}$								

*** – відмічені комірки не заповнюються.

При проведенні досліду $R = N, \text{кОм}, N$ – номер варіанта.

4. Обробка і аналіз результатів

1. Дані вимірювань внести до таблиці 4.12.1.
2. Провести розрахунок величин b_3, g_2, y, I_1 (за дослідними даними). Результати розрахунків внести до таблиці 4.12.1.

$$g_2 = \frac{I_2}{U}; \quad b_3 = \frac{I_3}{U}; \quad y = \sqrt{g_2^2 + b_3^2}; \quad I_1 = Uy$$

3. Порівняти розрахований і дослідний I_1 .
4. За дослідними даними переконатись, що $I_1 = \sqrt{I_2^2 + I_3^2}$.

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Схема досліджень, таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунок величин.
4. Векторні діаграми (в масштабі).
5. Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке коло синусоїдного струму?
2. Записати формулу активної провідності.
3. Записати формулу реактивної індуктивної провідності.
4. Яку величину називають повною провідністю кола?
5. Як і чому змінюються I_1, I_2, I_3 при збільшенні R та L ?

Лабораторна робота № 13

ПАРАЛЕЛЬНЕ LC -З'ЄДНАННЯ У КОЛІ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: дослідження фізичних явищ при резонансі струмів та різних співвідношеннях провідностей у розгалуженому електричному LC -колі.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти, які особливості реалізуються в електричному колі.

1. Теоретична частина

На рис. 4.12.1 зображено схему електричного кола з паралельним з'єднанням елементів C і L . У цьому колі напруги на кожній вітці, схеми однакові й дорівнюють напрузі джерела енергії, а струм джерела дорівнює сумі струмів віток.

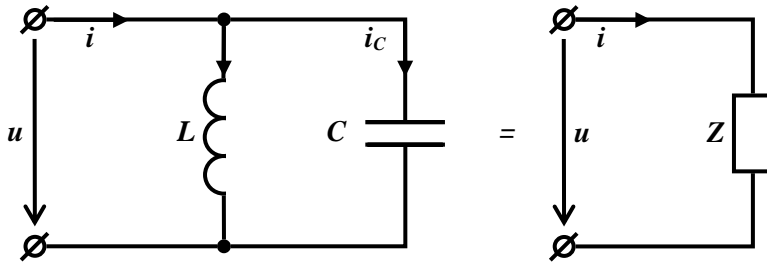


Рис. 4.13.1

Нехай напруга джерела змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_U = 0$. Тоді струм у нерозгалуженій частині кола і теж змінюється за синусоїдним законом із початковою фазою $\psi_i = \psi_U - \varphi = -\varphi$:

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Струми у паралельних вітках схеми з ідеальними елементами визначимо за відповідними виразами:

$$I_m^C = \frac{U_m}{x_C} \quad \text{і} \quad I_m^L = \frac{U_m}{x_L}.$$

Тоді миттєві значення:

$$i_R = \frac{U_m}{x_C} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad i_L = \frac{U_m}{x_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Згідно з першим законом Кірхгофа, струм джерела дорівнює:

$$i = i_C + i_L$$

$$i = U_m b_C \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + U_m b_L \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.13.1)$$

де $b_C = \frac{1}{x_C}$ – реактивна ємнісна провідність ($[b_C] = 1 \text{ См}$);

$b_L = \frac{1}{x_L}$ – реактивна індуктивна провідність ($[b_L] = 1 \text{ См}$).

Котушка індуктивності має свій внутрішній опір

$$r_K = \frac{1}{g_K}, \quad \text{де} \quad g_K = \frac{I^{pez}}{U}.$$

Тоді діюче значення струму джерела

$$I = Uy = U \sqrt{g_K^2 + (b_L - b_C)^2}.$$

Величина

$$y = \sqrt{g_K^2 + (b_L - b_C)^2}$$

називається повною провідністю кола з паралельним з'єднанням L і C .

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувану схему на робочому полі:

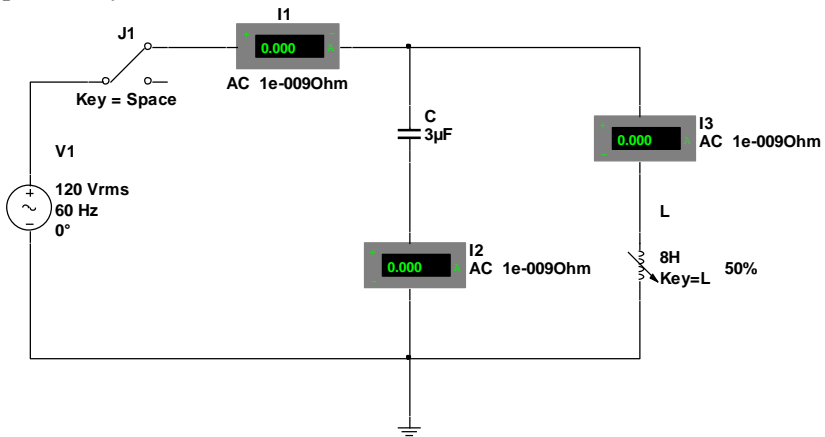




Рис. 4.13.2

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Пам'ятайте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно увімкнути *Mode AC*, двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна.

3. Порядок виконання роботи

Провести досліди відповідно до таблиці 4.13.1.

3.1. Дослід 1: Перемішуючи осердя котушки досягти резонансу струмів, коли значення струму $I_1(b_L = b_C)$ є мінімальним.

3.2. Дослід 2: Виводячи осердя котушки L , досягнути перевагу індуктивної провідності ($b_L > b_C$), при цьому значення струму I_1 у два рази більше від резонансного значення.

3.3. Дослід 3: Налаштувати коло на резонанс і, продовжуючи вводити осердя в котушку, досягти збільшення струму I_1 порівняно з резонансним в 2 рази. При цьому ($b_L < b_C$).

Таблиця 4.13.1

№	Дослід	Виміряні величини				Розраховані величини					
		U , В	I_1 , мА	I_2 , мА	I_3 , мА	z_K , кОм	x_L , кОм	φ_K , град	y_2 , См	y_3 , См	$Z_{заг}$, кОм
1	$b_L = b_C$										
2	$b_L > b_C$										
3	$b_L < b_C$										

При цьому $C = N, мкФ, N$ – номер варіанта.

4. Обробка і аналіз результатів

1. Дані вимірювань внести до таблиці 4.13.1.

2. Провести розрахунок величин $z_K, y_L, \varphi_K, y_2, y_3, Z_{заг}$ (за дослідними даними). Результати розрахунків внести в таблицю

$$z_K = \frac{U}{I_3}; \quad y_2 = \frac{I_2}{U}; \quad y_3 = \frac{I_3}{U}; \quad z_K = \frac{U}{I_3}; \quad r_K = \frac{1}{g_K};$$

$$b_C = y_2; \quad b_L = \sqrt{y_3^2 - g_3^2}; \quad y = \sqrt{g_K^2 + (b_L - b_C)^2}$$

$$x_L = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}; \quad \varphi_K = \arccos \frac{g_K}{y_K}; \quad Z_{заг} = \frac{1}{y}.$$

3. Побудувати у вибраному масштабі векторні діаграми струмів.

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Схема досліджень, таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунок величин.
4. Векторні діаграми (в масштабі).
5. Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.

Контрольні запитання та завдання

1. Як визначається резонансна частота електричного кола при паралельному з'єднанні котушки конденсатора?
2. Чому при резонансі струмів I_1 – мінімальний?
3. Чому струм I_2 не змінюється в різних дослідах?
4. Порівняйте загальний опір контуру при резонансі напруг і резонансі струмів.
5. Яку величину називають повною провідністю кола з паралельним з'єднанням елементів L і C ?

Лабораторна робота № 14

ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: дослідження процесів в індуктивно зв'язаних колах, а також вивчення методів експериментального визначення параметрів трансформатора.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти, які саме особливості реалізуються в індуктивно зв'язаних колах.

1. Теоретична частина

Можливість передавати змінний струм великої потужності на далекі відстані при порівняно незначних втратах відкрилася завдяки винайденню трансформатора.

Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій для перетворення енергії змінного струму з одними параметрами (U_1, I_1) в енергію з іншими параметрами (U_2, I_2) зі сталою частотою f .

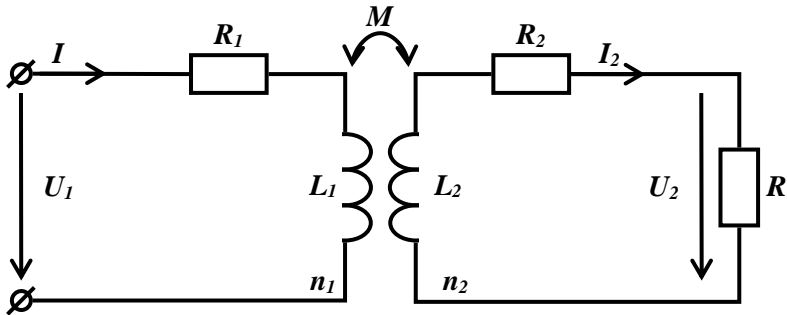


Рис. 4.14.1

У трансформаторі два провідники, намотані у вигляді котушок на замкнене осердя із магнетика, з великою магнітною проникністю. Це дозволяє зосередити потік магнітної індукції

практично в осерді. Провідники називають обмотками трансформатора. Обмотка, до якої приєднується ЕРС, називається *первинною*, а обмотка, до якої приєднується споживач, називається *вторинною*. На рис. 4.14.1 показана схема трансформатора, дія якого ґрунтується на явищі електромагнітної індукції.

Розглянемо спочатку ненавантажений трансформатор, вторинна обмотка якого розімкнута. Позначимо через n_1 кількість витків первинної обмотки, а через n_2 – вторинної. Змінна вхідна напруга $u_1(t)$ зумовлює виникнення змінного струму $i_1(t) = I_{m1} \sin \omega t$, який в осерді трансформатора створює періодично змінний потік $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, що за фазою збігається зі струмом. Якщо розсіюванням магнітного потоку знехтувати, то потік через обидві обмотки буде однаковим.

Користуючись законом Ома для первинної обмотки, можна записати

$$i_1 R_1 = u_1 + \varepsilon_1, \quad (4.14.1)$$

де ЕРС самоіндукції

$$\varepsilon_1 = -n_1 \frac{d\Phi}{dt} = -n_1 \omega \Phi_m \cos \omega t. \quad (4.14.2)$$

Для вторинної обмотки

$$i_2 R_2 = u_2 + \varepsilon_2, \quad (4.14.3)$$

де ЕРС самоіндукції

$$\varepsilon_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt} = -n_2 \omega \Phi_m \cos \omega t. \quad (4.14.4)$$

Якщо трансформатор ненавантажений, то $i_2 = 0$, і (4.14.3) набуває вигляду

$$u_2 = n_2 \omega \Phi_m \cos \omega t . \quad (4.14.5)$$

Оскільки первинна обмотка має великий реактивний опір, то струм i_1 в ній незначний, тобто $i_1 R_1 \ll \varepsilon_1$, і рівняння (4.14.1) переписується так:

$$u_1 = n_1 \omega \Phi_m \cos \omega t , \quad (4.14.6)$$

Поділивши (4.14.5) на (4.14.6), отримаємо

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = K_U , \quad (4.14.7)$$

де K_U називають коефіцієнтом трансформації.



Якщо $K_U > 1$, то трансформатор підвищує напругу і його називають *підвищувальним*, а коли $K_U < 1$ – трансформатор називають *знижувальним*.

Холостим ходом трансформатора називається така його робота, коли розімкнена вторинна обмотка ($I_2 = 0$).

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розпочинаючи виконання даної лабораторної роботи необхідно запуснути програму Multisim.

2.2. Для роботи необхідно скласти досліджувані схеми на робочому полі (рис. 4.14.2 і рис. 4.14.3).

2.3. Щоб схема почала функціонувати необхідно натиснути на кнопку  або на кнопку . Пом'ятайте, що універсальні амперметр та вольтметр працюють у колі змінного струму, тому для вимірювання діючих значень необхідно увімкнути *Mode AC*, двічі натиснувши на відповідний вимірювальний прилад, у вкладці *Value* вікна.

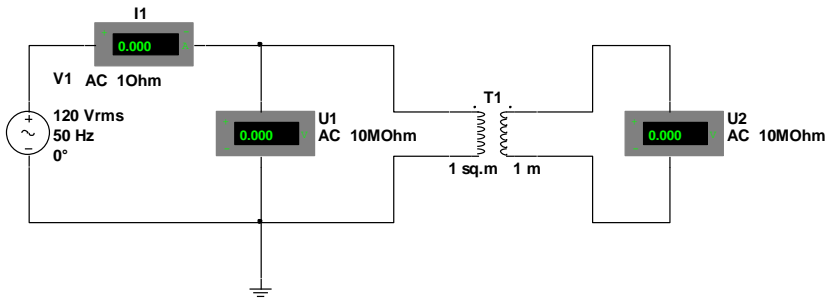


Рис. 4.14.2

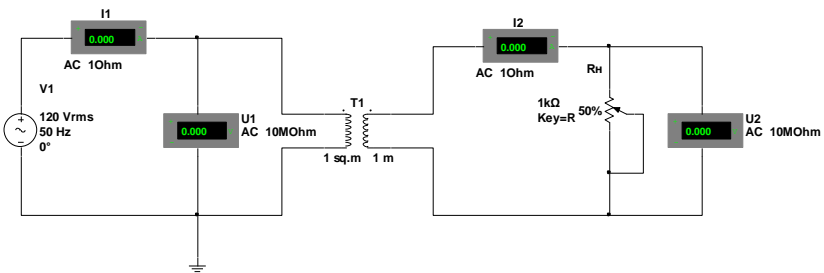


Рис. 4.14.3

3. Порядок виконання роботи

3.1. Дослід 1: Визначити індуктивність L_1 первинної обмотки трансформатора. Для цього треба скласти схему рис. 4.14.2. Встановіть для джерела живлення змінного струму напругу U_1 та його частоту за такими даними: $U_1 = (120 + N)$, В, $\omega = 2\pi f = 2\pi(50 + N)$, $\frac{1}{c}$ (N – номер варіанта). Опір вольтметра встановіть таким, що дорівнює 1 МОм, а амперметра – 1 Ом. Запишіть значення напруг на первинній U_1 і вторинній U_2 обмотках трансформатора і струм I_1 первинної обмотки. Розрахуйте індуктивність первинної обмотки трансформатора L за формулою

$$L_1 \approx \frac{U_1}{\omega I_1}.$$

Знайдіть коефіцієнт трансформації за напругою

$$K_U = \frac{n_2}{n_1} \approx \frac{U_2}{U_1}.$$

3.2. Дослід 2: Визначте взаємну індуктивність обмоток трансформатора методом амперметра і вольтметра.

Якщо виміряти напругу на розімкнених затискачах вторинної обмотки U_2 і струм у первинній обмотці I_1 , то взаємну індуктивність M можна знайти зі співвідношення

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}.$$

Дані вимірювань занесіть у таблицю 4.14.1.

Таблиця 4.14.1

$U_1, \text{В}$	$\omega, \frac{1}{\text{с}}$	$L_1, \text{Гн}$	$L_2, \text{Гн}$	$M, \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{Гн}}$	K_U

3.3. Дослід 3: Дослідіть роботу навантаженого трансформатора. Для цього складіть схему (рис. 4.14.3). Встановіть номінальне значення U і, змінюючи опір R_H , занесіть дані вимірювань у табл. 4.14.2.

4. Обробка і аналіз результатів

1. Дані вимірювань внести в таблиці.
2. Розрахунок величин P_H, P і η (за дослідними даними).
Результати розрахунків внести в таблицю.

$$P_H = U_H I_H, \quad P_1 = U_1 I_1, \quad \eta = \frac{P_H}{P_1} \cdot 100\%.$$

Таблиця 4.14.2

R_H , кОм	100	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1
U_H , В								
I_H , А								
U_1 , В								
I_1 , А								
P_H , Вт								
P_1 , Вт								
η , %								

Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Схема досліджень, таблиця.
3. Розрахункові формули, розрахунок величин за пунктами 4.1, 4.2.
4. Висновки за результатами вимірювань та розрахунків.
5. Побудуйте графік залежності $\eta = f(I_H)$.

Контрольні запитання та завдання

1. Яка будова трансформаторів?
2. Чому дорівнює коефіцієнт трансформації?
3. Які трансформатори називають підвищувальними?
4. Які трансформатори називають знижувальними?
5. Що розуміють під холостим ходом трансформатора?

Лабораторна робота № 15

ВИВЧЕННЯ СПЕКТРІВ ПЕРІОДИЧНИХ НЕГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи: вивчити можливості апроксимації сигналу многочленом Фур'є за ортогональною системою тригонометричних функцій.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти, які саме особливості використовуються при апроксимації сигналів, зокрема за допомогою многочленів Фур'є.

1. Теоретична частина

Для синтезу складних сигналів як ортогональну систему функцій можна використовувати систему тригонометричних функцій кратних аргументів, ортогональну на відріжку T . Періодичний сигнал може бути представлений за допомогою ряду Фур'є. Наведемо розклади в ряд Фур'є деяких сигналів ($\Omega_1 = \frac{2\pi}{T}$):

– прямокутного коливання – "меандру" (рис. 4.15.1);

$$s(t) = \frac{4E}{\pi} \left(\cos \Omega_1 t - \frac{1}{3} \cos 3\Omega_1 t + \frac{1}{5} \cos 5\Omega_1 t - \dots \right). \quad (4.15.1)$$

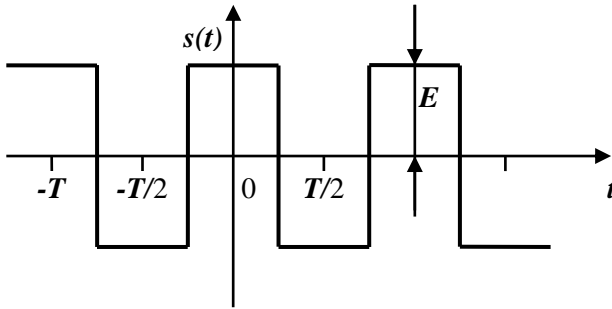


Рис. 4.15.1 Графік прямокутного коливання – "меандру"

– пилоподібного коливання (рис. 4.15.2),

$$s(t) = \frac{2E}{\pi} \left(\sin \Omega_1 t - \frac{1}{2} \sin 2\Omega_1 t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega_1 t - \frac{1}{4} \sin 4\Omega_1 t + \dots \right) \quad (4.15.2)$$

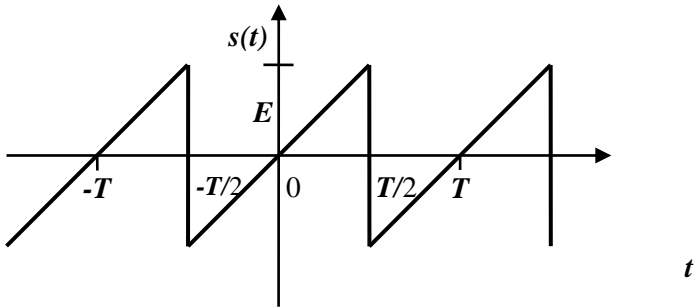


Рис. 4.15.2 Графік періодичного пилоподібного коливання

– періодичної послідовності трикутних імпульсів (рис. 4.15.3)

$$s(t) = \frac{2E}{\pi} \frac{4}{\pi} \left(\cos \Omega_1 t + \frac{1}{3^2} \cos 3\Omega_1 t + \frac{1}{5^2} \cos 5\Omega_1 t + \dots \right) \quad (4.15.3)$$

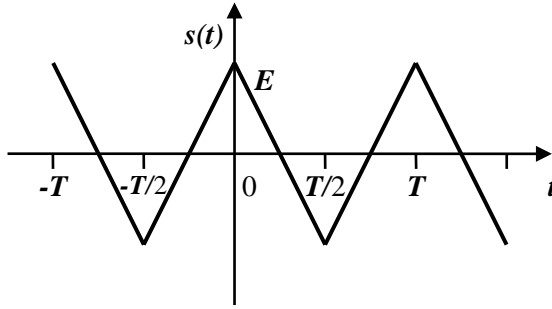


Рис. 4.15.3 Графік періодичної послідовності трикутних імпульсів

Радіосигнали з тональною (гармонічною) амплітудною і кутовою модуляцією можуть бути синтезовані за ортогональною системою тригонометричних функцій кратних аргументів, якщо несуча частота ω_0 і модулююча частота Ω кратні, тобто $\omega_0 = n\Omega$, де n – ціле число.

При амплітудній модуляції модульоване коливання можна подати у вигляді

$$a(t) = [A_0 + ks(t)]\cos(\omega_0 t + \theta_0).$$

У випадку тональної модуляції $s(t) = A_m \cos(\Omega t + \gamma)$ аналітичний вираз АМ коливання набуває вигляду:

$$a(t) = A_0 [1 + M \cos(\Omega t + \gamma)] \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (4.15.4)$$

де $M = \frac{kM_m}{A_0}$ – коефіцієнт глибини модуляції. У цьому випадку

спектр АМ коливання складається з трьох гармонічних складових

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) + \frac{MA_0}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \gamma + \theta_0] + \frac{MA_0}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t - \gamma + \theta_0]. \quad (4.15.5)$$

Якщо модулюючий сигнал описується виразом (4.15.1), то спектр АМ коливання при $kE = A_0$ і $\theta_0 = 0$ запишеться у вигляді

$$a(t) = A_0 \cos \omega_0 t + \frac{2A_0}{\pi} \left[\cos(\omega_0 + \Omega_1)t + \cos(\omega_0 - \Omega_1)t - \frac{1}{3} \cos(\omega_0 + 3\Omega_1)t - \frac{1}{3} \cos(\omega_0 - 3\Omega_1)t + \frac{1}{5} \cos(\omega_0 + 5\Omega_1)t + \frac{1}{5} \cos(\omega_0 - 5\Omega_1)t \dots \right]. \quad (4.15.6)$$

При гармонічній кутовій модуляції, аналітичний вираз коливання може бути записаний у вигляді

$$a(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + m \sin \Omega_1 t). \quad (4.15.7)$$

Спектр такого коливання має вигляд

$$a(t) = A_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(m) \cos(\omega_0 + n\Omega_1)t. \quad (4.15.8)$$

де $I_n(m)$ – функція Бесселя першого роду n -го порядку (табл. 4.15.1) від аргументу m ; m – індекс модуляції.

Таблиця 4.15.1

n	$I_n(1)$	$I_n(2)$	$I_n(3)$	$I_n(4)$	$I_n(5)$	$I_n(6)$
0	+0.765	+0.224	-0.260	-0.397	-0.178	0.50
1	+0.440	+0.577	+0.339	-0.066	-0.328	-0.27
2	+0.115	+0.353	+0.486	+0.364	0.0466	-0.243
3	+0.020	+0.129	+0.309	+0.430	+0.365	0.115
4	+0.00248	+0.034	+0.132	+0.281	+0.391	0.358
5	+0.00025	+0.007	0.0430	0.132	0.261	0.362
6	0.000021	0.0012	0.0114	0.049	0.131	0.246
7	0.0000015	0.00018	0.00255	0.0152	0.0534	0.130

Відносна середньоквадратична похибка апроксимації періодичної функції $s(t)$ скінченною кількістю членів ряду Фур'є може бути визначена за формулою

$$\delta = \frac{P - \sum_{n=1}^N P_n}{P}, \quad (4.15.9)$$

де P – середня потужність сигналу; P_n – середня потужність n -ої ортогональної складової сигналу (гармоніки).

2. Завдання для виконання лабораторної роботи

2.1. Розрахунок

Розрахуйте та побудуйте спектри амплітуд і фаз періодичного коливання. Визначте відносну середньоквадратичну похибку апроксимації сигналу скінченною кількістю ортогональних складових.

2.2. Експеримент

Синтезуйте періодичне несинусоїдне коливання

3. Порядок виконання роботи

3.1. Виберіть згідно з варіантом (табл. 4.15.2) вигляд періодичного коливання. Розрахуйте і побудуйте його спектри амплітуд і фаз до 10-ї гармоніки включно. Визначте відносну середньоквадратичну похибку апроксимації сигналу зі скінченною кількістю ортогональних складових.

Таблиця 4.15.2

Варіант	Форма періодичних несинусоїдних коливань для дослідження
1	Періодичне прямокутне коливання – "меандр" (рис. 4.15.1) $E = 100$ В, $T = 0.0001$ с.
2	Періодичне пилоподібне коливання (рис. 4.15.2) $E = 120$ В, $T = 0.0001$ с.
3	Періодична послідовність трикутних імпульсів

	(рис. 4.15.3) $E = 60 \text{ В}$, $T = 0.0001 \text{ с}$.
4	Коливання з тональною амплітудною модуляцією, $A_0 = 60 \text{ В}$, модулююча частота $F = F_1 = 2 \text{ кГц}$, несуча частота $f_0 = 5F_1$, коефіцієнт модуляції $M = 0.5$; $1 < M < 1$.
5	АМ-коливання при модуляції "меандром", якщо несуча частота $f_0 = 5F_1$, частота повторення "меандру" $F = F_1 = 2 \text{ кГц}$, $k_E = A_0 = 60 \text{ В}$.
6	Коливання з гармонічною кутовою модуляцією, якщо $A_0 = 60 \text{ В}$, модулююча частота $F = F_1 = 2 \text{ кГц}$, несуча частота $f_0 = 5F_1$, індекс модуляції $m = 1, 2, 3$.

3.2. Складіть схему для дослідження амплітуди (рис. 4.15.4), частоти та початкові фази гармонік установіть відповідно до розрахованих у п.4.1.

3.3. Вмикаючи по чергово кожену гармоніку окремо, перевірте за осцилографом правильність установки параметрів гармонік.

3.4. Увімкніть одна за одною гармоніки і спостерігайте на екрані осцилографа формування сигналу. Усі осцилограми нарисуйте.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1) схему приладу для синтезу сигналів Фур'є;
- 2) розрахунки та графіки спектрів синтезованого сигналу;
- 3) осцилограми, які ілюструють формування сигналу при його синтезі;
- 4) розрахунки похибок апроксимації;
- 5) висновки й оцінку отриманих результатів.

Контрольні запитання та завдання

1. Тригонометрична, амплітудно-фазова та комплексна форма ряду Фур'є.
2. Як визначаються коефіцієнти ряду Фур'є?
3. Які види керуючих сигналів Ви знаєте?
4. Як обчислюються коефіцієнт глибини модуляції?

5. Запишіть аналітичний вираз амплітудно-модульованого коливання.
6. Який вигляд має спектр АМ коливання при тональній модуляції та модуляції складним сигналом?
7. Запишіть аналітичний вираз ФМ коливання при гармонічній модуляції й у загальному випадку.

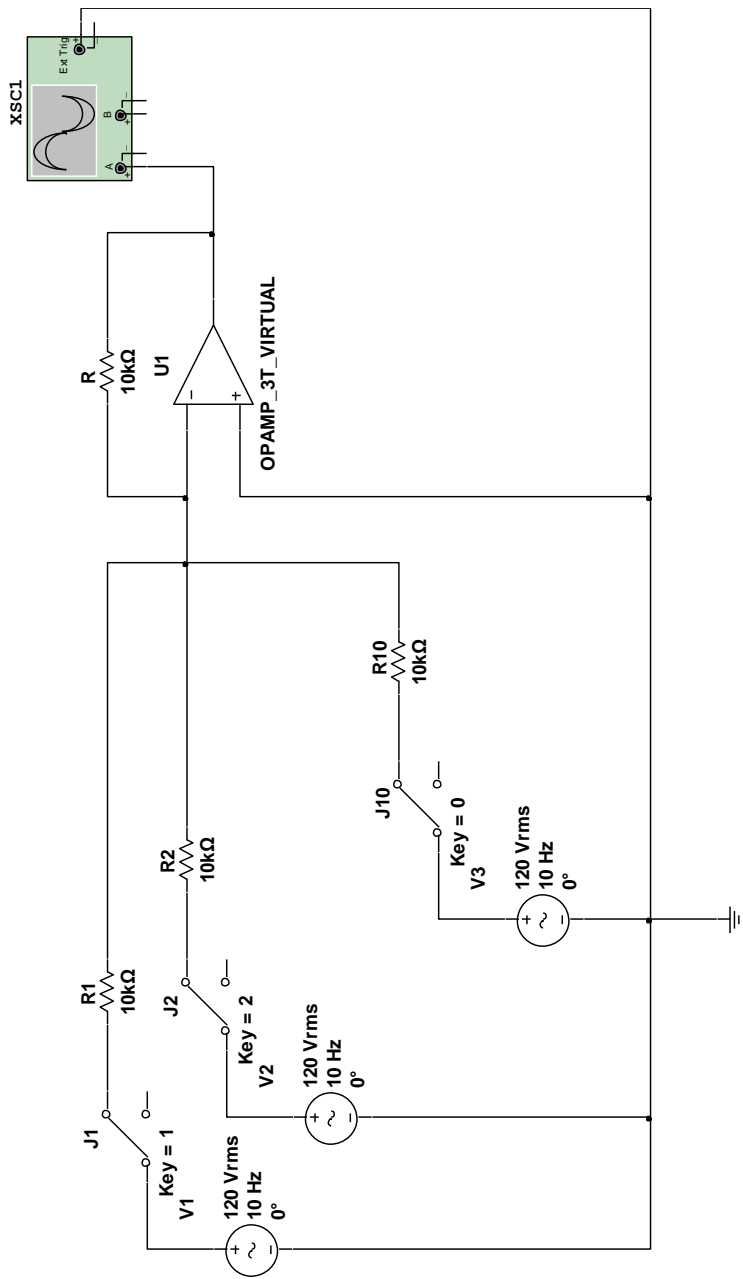


Рис. 4.15.4

Лабораторна робота № 16

АНАЛІЗ ЛІНІЙНОГО КОЛА ПЕРІОДИЧНОГО НЕСИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

Мета роботи: вивчити методику комплексного дослідження однофазного електричного кола періодичного негармонічного струму за допомогою програми схемотехнічного моделювання Multisim.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти, які саме особливості використовуються під час комплексного дослідження однофазного електричного кола періодичного негармонічного струму.

1. Теоретична частина

Забезпечення надійної роботи електричного кола несинусоїдного струму вимагає аналітичних та експериментальних досліджень його режимів, мета яких – визначення активних потужностей, а також максимальних значень напруг та струмів окремих елементів.

2. Програма виконання лабораторної роботи

2.1. Розрахунок

- 1.1. Розклад вхідної напруги кола на гармонічні складові.
- 1.2. Розрахунок миттєвих значень струмів віток і напруг котушки та конденсатора.
- 1.3. Визначення діючих і максимальних значень розрахованих напруг і струмів та обчислення коефіцієнтів, які характеризують форму досліджуваних величин.
- 1.4. Обчислення активних потужностей елементів і кола в цілому.

2.2. Експеримент

Визначення законів зміни досліджуваних величин із часом.

2.3. Експеримент

Розклад отриманих у п. 2.2 кривих на гармонічні складові.

3. Методика проведення досліджень

Схема досліджуваного кола та параметри обираються згідно з варіантом за рис. 4.16.1 і табл. 4.16.1.

Таблиця 4.16.1

Варіанти параметрів схем (рис. 4.16.1)

Ва- ріант	Параметри джерела		Форма сигн.*	$R_1,$	$R_2,$	$R_3,$	$C,$	$L,$
	U_{\max}, B	$f, Гц$		$Ом$	$Ом$	$Ом$	$мкФ$	$мГн$
1	13	100	П	10	750	0.5	40	15
2	17	130	Т	15	750	0.5	50	20
3	15	150	П	20	500	0.25	60	10
4	20	180	Т	15	500	0.1	30	10
5	12	200	П	10	300	0.1	30	20
6	16	220	Т	15	300	0.25	35	20
7	14	250	П	20	600	0.4	45	15
8	19	250	Т	20	600	0.4	35	20
9	18	85	П	15	400	0.3	55	15
10	22	85	Т	15	400	0.3	55	25

*)П(Т) – сигнал прямокутної (трикутної форми) зі шаруватістю ($\frac{T}{t_i}$), яка дорівнює 2.

В експериментальній частині як джерело вхідної напруги, треба вибрати функціональний генератор, а для вимірювання миттєвих значень струмів і напруги – осцилограф.

Пункт 1 програми

1.1. Розкладіть напругу джерела на гармонічні складові, до п'ятої включно. Результати гармонічного аналізу внесіть у табл. 4.16.2.

Таблиця 4.16.2

Гармонічні складові напруги джерела

$k = 1$		$k = 3$		$k = 5$	
U_{m1}, B	$\Psi_{U1}, ^\circ$	U_{m3}, B	$\Psi_{U3}, ^\circ$	U_{m5}, B	$\Psi_{U5}, ^\circ$

1.2. На основі знайдених гармонічних складових напруги джерела і параметрів елементів розрахуйте в заданому колі миттєві значення струмів віток i, i_1, i_2 та напруги на котушці U_k і конденсаторі U_C . Результати розрахунків зведіть у табл. 4.16.3.

Таблиця 4.16.3

Гармонічні складові струмів і напруг кола

	$k = 1$		$k = 3$		$k = 5$	
	За п.1 прогр.	За п.3 прогр	За п.1 прогр.	За п.3 прогр	За п.1 прогр.	За п.3 прогр
I_m, MA						
$\Psi_i, ^\circ$						
I_{m1}, MA						
$\Psi_{i1}, ^\circ$						
I_{m2}, MA						
$\Psi_{i2}, ^\circ$						
U_{mk}, B						
$\Psi_{Uk}, ^\circ$						
U_{mC}, B						
$\Psi_{Uc}, ^\circ$						

1.3. За знайденими миттєвими значеннями струмів і напруги визначте їх діючі та максимальні значення. Обчисліть коефіцієнти амплітуди K_a і спотворень K_c . Результати розрахунків зведіть у табл. 4.16.4.

1.4. Розрахуйте активні потужності джерела P_d та елементів кола. Оцініть виконання балансу потужності за виразом

$$\delta_p = 2 \cdot \frac{P_d - \sum P}{P_d + \sum P} \cdot 100\% .$$

Значення $\delta_p > 5\%$ свідчать про помилку в розрахунках. Виконання завдання можна продовжити лише після встановлення помилки. Дані внесіть в табл. 4.16.5.

Таблиця 4.16.4

Результати розрахунків струмів і напруг

Характеристика досліджуваних величин	Досліджувані величини				
	i	i_1	i_2	u_k	u_c
Діючі значення, mA, B					
Максимальні значення, mA, B					
Коефіцієнт спотворень, K_c					
Коефіцієнт амплітуди, K_a					

Пункт 2 програми

Зніміть осцилограми струмів віток та напруг котушки і конденсатора. Для зняття осцилограми струму, вхід осцилографа під'єднайте паралельно до резистора, який увімкнено у вітку з досліджуваним струмом. При цьому масштаб струму

$$m_1 = \frac{m_U}{R} ,$$

де m_U – масштаб напруги; R – опір резистора, паралельно до якого під'єднаний осцилограф.

Усі зняті осцилограми повинні бути оформлені у звіті у вигляді графіків $i(t), u(t)$.

**Допустимі, розраховані та експериментально
знайдені величини**

Порівнювальні величини	P_{R1}	P_{R2}	P_{R3}	δ ,	$I_{K \max}$,	$U_{K \max}$,	$U_{C \max}$,
	Bm			%	mA	B	B
Допустимі	2	2	2	5	200	100	60
Розраховані у п.1.4,							
Експериментальні з п.4.							
δ , %							

Пункт 3 програми

3.1. Розкладіть експериментально отримані часові залежності (осцилограми) струмів і напруг на гармонічні складові до п'ятої включно. Результати внесіть у табл. 4.16.3.

3.2. Визначте за осцилограмами максимальні та діючі значення величин, обчисліть коефіцієнти амплітуди та спотворень. Результати внесіть у табл. 4.16.6, аналогічну до табл. 4.16.4 (скласти самостійно).

Пункт 4 програми

За діючими значеннями струмів (табл. 4.16.6) та опорами елементів визначте активні потужності та обчисліть похибку δ_p . Дані занесіть у табл. 4.16.5.

Зробіть висновки по виконану роботу, зверніть увагу на дії, що призвели до розбіжностей експериментальних і розрахованих значень величин, а також на особливості вимірювань у колах періодичного негармонічного струму.

Контрольні запитання та завдання

1. Як провести розклад несинусоїдної напруги в тригонометричний ряд?
2. Який зв'язок між максимальним, діючим і середнім значеннями несинусоїдних періодичних ЕРС, струму і напруги?

3. Якими коефіцієнтами характеризують форму несинусоїдних періодичних кривих?

4. Який порядок розрахунку кіл із несинусоїдними періодичними ЕРС, напругами і струмами?

5. Як розрахувати потужність у колах несинусоїдного струму?

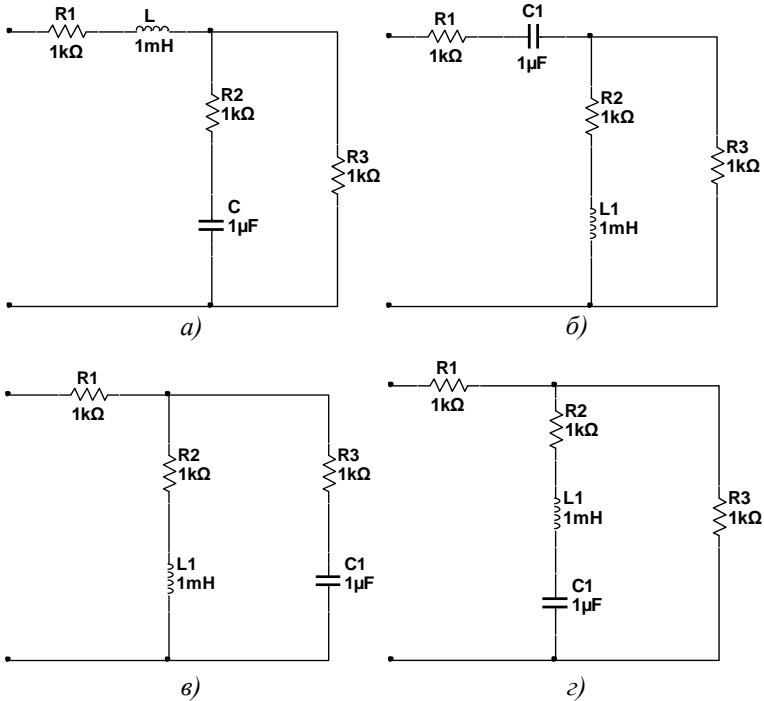


Рис. 4.16.1

Лабораторна робота № 17

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ У ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Мета роботи: вивчити методику комплексного дослідження перехідних режимів електричних кіл, щоб визначити вплив різних факторів на вигляд і характеристики процесів за допомогою програми схемотехнічного моделювання Multisim.

Пояснення до роботи: студент при виконанні роботи повинен добре розуміти особливості перехідних режимів у лінійних електричних колах.

1. Теоретична частина

Проектування надійних електронних приладів пов'язане з обов'язковим урахуванням можливих відхилень режиму кола від деякого номінального, що спостерігається, зокрема, при перехідних режимах. Пояснюється це тим, що величини, які характеризують процеси при зміні одного усталеного режиму іншим, можуть істотно відрізнятися від їхніх значень у номінальному режимі.

Основним інструментом під час експериментальних досліджень перехідних режимів є осцилограф, який не лише дає форму часової залежності досліджуваної величини, але й слугує для кількісних вимірювань.

У роботі використовується перехідний режим аналізу кола (в меню Simulate / Analyses / Transient Analysis).

2. Програма виконання лабораторної роботи

1. Розрахунок

1.1. Розрахунок опору резистора, який забезпечує періодичний характер перехідного процесу в заданому колі.

1.2. Розрахунок перехідного режиму досліджуваного кола.

2. Експеримент

2.1. Отримання осцилограми перехідного процесу в заданому колі й визначення за осцилограмою необхідних характеристик.

2.2. Дослідження впливу зміни параметрів елементів на вигляд і характеристики перехідного процесу.

3. Розрахунок

3.1. Розрахунок перехідного процесу в досліджуваному колі з параметрами п.1.2.

3.2. Побудова графіків заданих величин у перехідних процесах.

3. Методика проведення досліджень

Схема досліджуваного кола та параметри обираються згідно з варіантом за рис. 4.17.1 і табл. 4.17.1.

Таблиця 4.17.1

Варіанти параметрів схем (рис. 4.17.1)

Варіант	U , <i>Ом</i>	R_2 , <i>Ом</i>	R_3 , <i>Ом</i>	C , <i>мкФ</i>	L , <i>мГн</i>	Досліджувана величина
1	12	550	1.0	0.5	20	i_C
2	14	550	1.2	0.7	25	u_L
3	16	600	1.4	0.8	30	i_L
4	18	650	1.6	0.9	35	u_C
5	20	700	1.8	1.0	40	u_{R_1}
6	22	750	2	1.1	45	i_C
7	24	800	2.2	1.2	50	u_L
8	26	850	2.4	1.3	55	i_L
9	28	900	2.6	1.4	60	u_C
10	30	950	2.8	1.5	65	u_{R_1}

Пункт 1 програми

1.1. Для обраної схеми, згідно з варіантом завдання, розрахуйте критичне значення R_{K1} опору резистора R_1 , яке

визначає граничний випадок аперіодичного перехідного процесу при замиканні ключа $S1$.

1.2. Для значення $R_1 = 0.01R_{к1}$ розрахуйте затухання і частоту вільних коливань. Розрахуйте перехідний процес для величини, вказаної в табл. 4.17.1, при замиканні ключа $S1$. Побудуйте графік досліджуваної величини.

Пункт 2 програми

2.1. Складіть задане коло та встановіть параметри його елементів згідно з п.1 програми досліджень. Отримайте на екрані осцилографа графік досліджуваної величини і визначте затухання δ_0 і період T_0 вільних коливань. При визначенні δ_0 можна скористатися двома послідовними максимальними значеннями A_1 і A_2 затухаючих періодичних коливань. Тоді експериментальне значення

$$\delta_0 = \frac{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{T_0}.$$

Дані вимірів та розрахунків звести в табл. 4.17.2.

2.2. На основі осцилограм отримайте графіки перехідного процесу при варіації R_1 із метою знаходження $R_{1\min}$, що забезпечує мінімальний час t_{II} перехідного процесу.

Для зняття осцилограми струму, вхід осцилографа під'єднайте паралельно до резистора, який увімкнено у вітку з досліджуваним струмом. При цьому масштаб струму $m_1 = \frac{m_U}{R}$,

де m_U – масштаб напруги; R_1 – опір резистора, паралельно до якого під'єднаний осцилограф. Усі зняті осцилограми повинні бути оформлені у звіті у вигляді графіків $i(t), u(t)$.

Пункт 3 програми

3.1. Для досліджуваної величини, згідно з варіантом завдання, розрахуйте перехідний процес, використовуючи параметри елементів п. 2.2. ($R_1 = R_{1\min}$).

Таблиця 4.17.2

Результати досліджень перехідного процесу при замиканні ключа S1

Величина	Розрахунок	Експеримент	$\delta_0, \%$
δ_0, c^{-1}			
$T_0, мс$			
ω_0, c^{-1}			

3.2. Побудуйте графік перехідного процесу Порівняйте час, отриманий згідно експерименту та в розрахунках. Оцініть похибку, і у разі необхідності, повторіть дослідження.

Зробіть висновки про виконану роботу, зверніть увагу на причини, які призвели до розходжень експериментальних і розрахованих значень величин, а також на вплив параметрів на вигляд у характеристики перехідного процесу.

Контрольні запитання та завдання

1. Сформулюйте і проілюструйте закони комутації.
2. Яка умова аперіодичного перехідного процесу в колах 2-го порядку?
3. Яка послідовність розрахунку перехідних процесів класичним методом?
4. Які особливості моделювання перехідних процесів у Multisim?

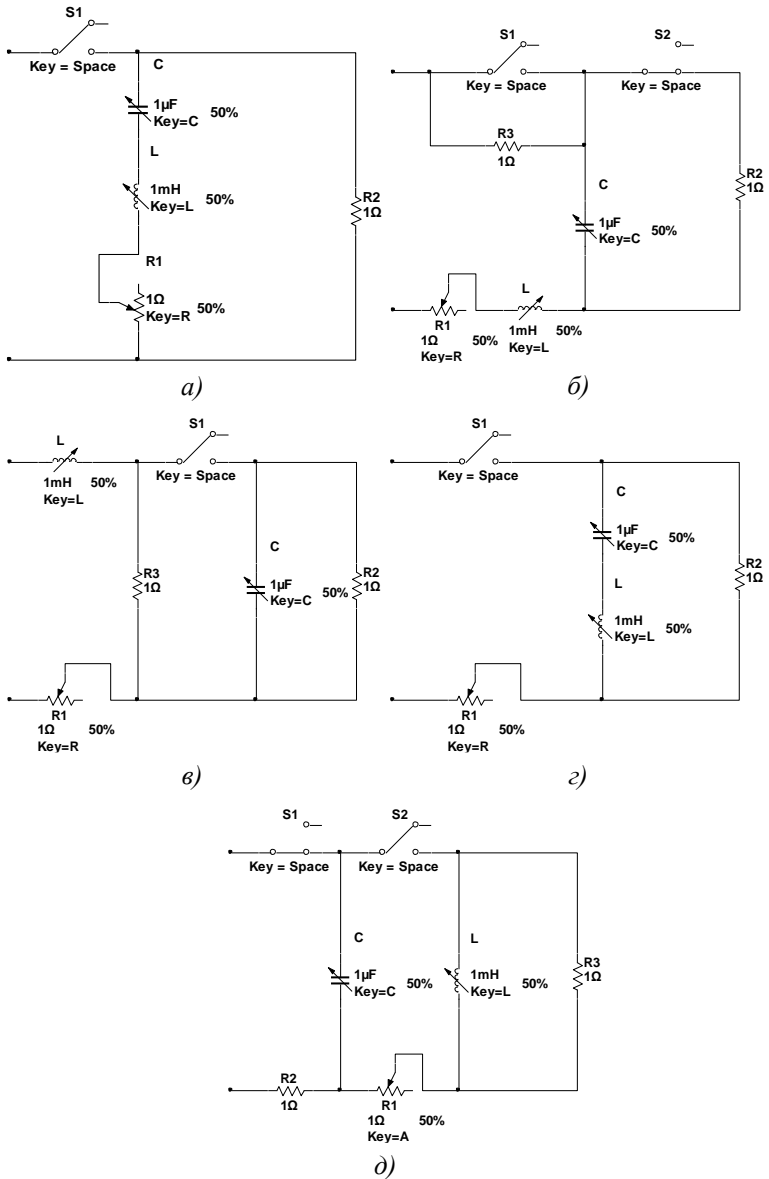


Рис. 4.16.1

Лабораторна робота № 18

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПРЯМЛЯЮЧИХ ПРИЛАДІВ ТА ФІЛЬТРІВ

Мета роботи: ознайомлення з методикою побудови схем і комп'ютерним моделюванням роботи випрямляючих приладів, вивчення принципів роботи різних типів випрямлячів; з'ясування впливу різних типів згладжуючих фільтрів на форму випрямленої напруги і на вихідні характеристики випрямних приладів.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти особливості побудови схем та принципів роботи випрямлячів різних типів та згладжуючих фільтрів.

1. Теоретична частина

1.1. Однофазні випрямлячі

1.1.1. Однопівперіодний випрямляч

Схема та часові діаграми напруг і струмів наведені на рис. 4.18.1 і рис. 4.18.2.

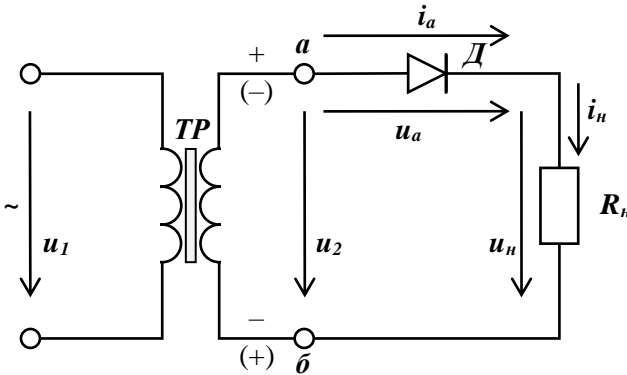


Рис. 4.18.1

Схема містить трансформатор **ТР**, у колі вторинної обмотки якого ввімкнено послідовний діод **Д** і опір навантаження **R_H** .

При прийнятих допущеннях (ідеальний трансформатор), якщо напруга u_1 на первинній обмотці трансформатора змінюється за синусоїдним законом, то напруга на вторинній обмотці u_2 також синусоїдна.

Струм через діод i_a , а отже, і через резистор навантаження i_n , з'являється в ті півперіоди, коли потенціал точки **a** вищий за потенціал точки **b** вторинної обмотки трансформатора, оскільки в ці півперіоди діод **D** відкритий. Коли потенціал точки **a** негативний по відношенню до потенціалу точки **b**, діод закритий, струм у колі дорівнює нулю. Отже, струм у резисторі R_n з'являється тільки в одному з півперіодів напруги u_2 , а схема називається однопівперіодною. При прийнятих допущеннях (ідеальний діод) у позитивний півперіод напруги u_2 величина напруги на резисторі навантаження дорівнює величині u_2 , а на діоді – нулю, у негативний півперіод $u_n = 0$, а величина $u_a = u_2$.

У цій схемі $U_{n,cp} = 0.45U_2$ і тоді

$$I_{n,cp} = \frac{0.45U_2}{R_n}.$$

Недоліки цієї схеми:

- мале середнє значення струму навантаження $I_{n,cp}$;
- велика зворотна напруга $U_{звор.макс} = U_{2m}$;
- високий рівень пульсацій (коефіцієнт пульсації)

$$p = \frac{U_{2m}}{2U_{n,cp}} \approx 1.57.$$

Ці недоліки усуваються у двопівперіодних схемах випрямлячів, в яких використовується два періоди напруги.

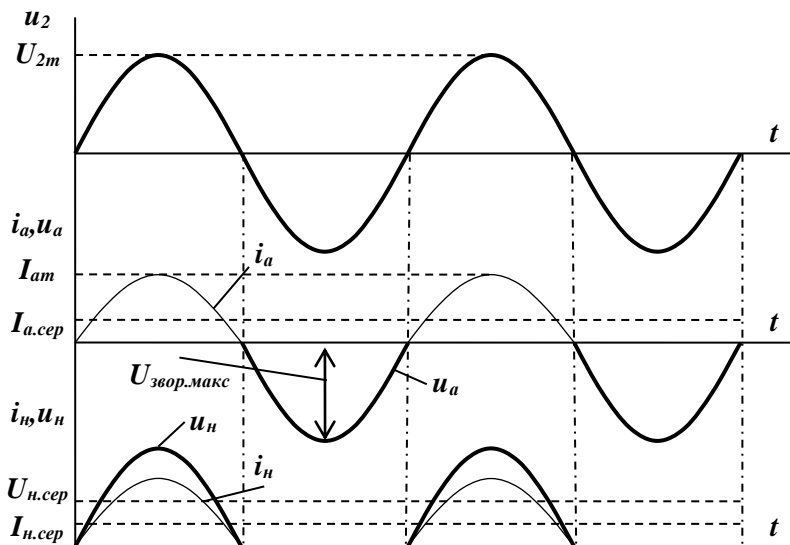


Рис. 4.18.2

1.1.2. Випрямляч із середньою точкою трансформатора

Випрямляч із виводом у середній точці вторинної обмотки трансформатора є двоівперодним випрямлячем, схема і часові діаграми якого наведені на рис. 4.18.3 і рис. 4.18.4.

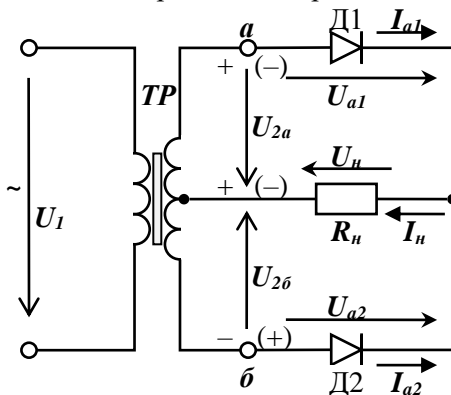


Рис. 4.18.3

Випрямляч складається з трансформатора, вторинна обмотка якого має середню точку, двох діодів Д1 і Д2 і резистора навантаження R_H , увімкненого між середньою точкою трансформатора і катодами діодів.

Схему можна розглядати як поєднання двох однопівперіодних випрямлячів, увімкнених на загальне навантаження.

Вважаємо, що напруги на кожній половині вторинної обмотки трансформатора рівні між собою: $u_{2a} = u_{2b} = u_2$.

Протягом додатної половини періоду точка **а** схеми має вищий потенціал (++), ніж середня точка (+), і ще вищий потенціал, ніж точка **б**. При цьому діод Д1 відкритий, струм у резисторі навантаження $i_H = i_{a1}$, до діода Д2 прикладена напруга u_{ab} .

Упродовж другої половини періоду напруги точка **а** має найвищий потенціал (--), середня точка – вищий, а точка **б** – найвищий потенціал (+), діод Д2 відкритий, струм у резисторі навантаження $i_H = i_{a2}$ і має такий самий напрям, що й у першому півперіоді.

У такій схемі величина $U_{н.ср} = 0.9U_2$, і струм навантаження визначається за формулою

$$I_{н.ср} = \frac{0.9U_2}{R_H},$$

Отже, $I_{н.ср}$ і $U_{н.ср}$ у два рази вищі, ніж в однопівперіодному випрямлячі.

Пульсації значно менше (коефіцієнт пульсації $p \approx 0.67$), проте зворотна напруга на закритих діодах удвічі більша $U_{звор.макс} = 2U_{2т}$.

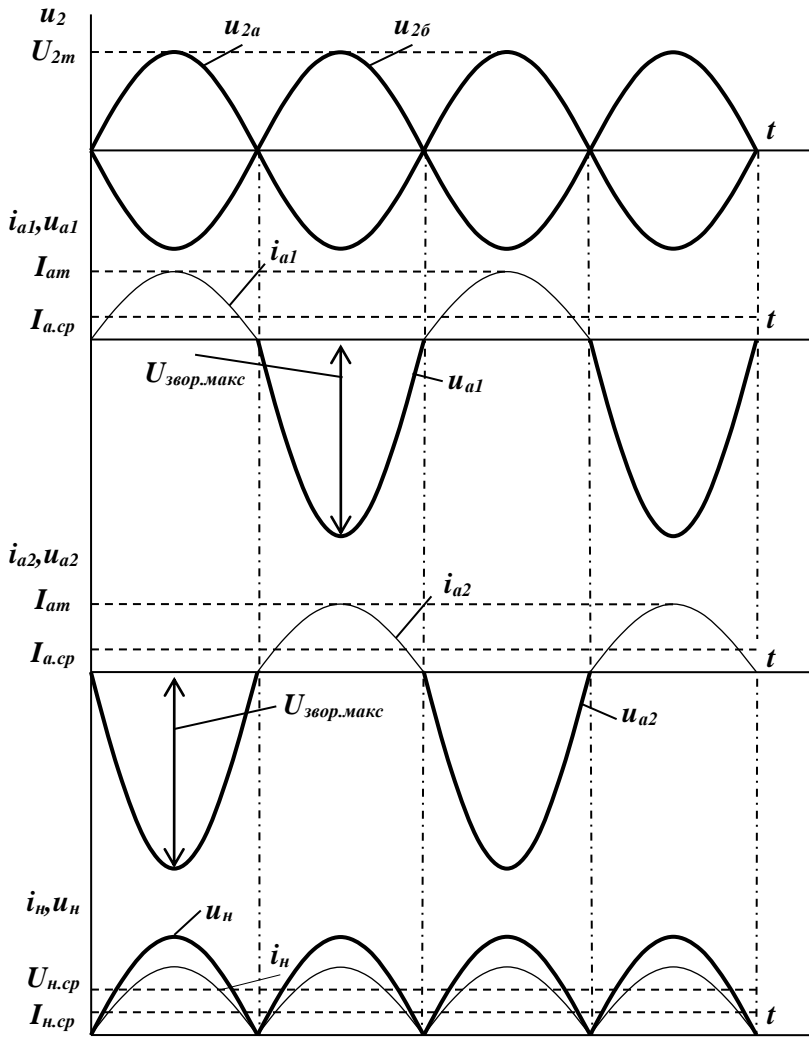


Рис. 4.18.4

1.1.3. Мостова схема випрямляча

Найпоширенішою є мостова схема двопівперіодного випрямляча (рис. 4.18.5), відповідні часові діаграми якої зображені на рис. 4.18.6.

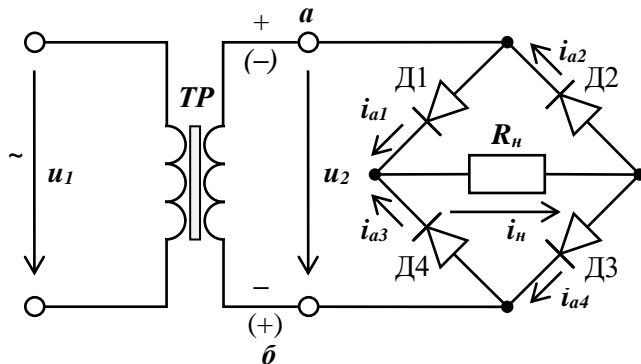


Рис. 4.18.5

У цій схемі діоди Д1-Д4 увімкнені за мостовою схемою, до однієї діагоналі якої підведена змінна напруга u_2 , а до іншої під'єднано резистор навантаження R_n .

Протягом першої половини періоду напруги u_2 , коли потенціал точки **a** позитивний, а точки **b** негативний, діоди Д1, Д3 відкриті, а Д2, Д4 – закриті, струм i_n тече через діод Д1, резистор навантаження R_n і діод Д3. До діодів Д2, Д4, прикладено напругу вторинної обмотки трансформатора u_2 .

У наступний півперіод напруги u_2 потенціал точки **a** нижчий за потенціал точки **b** і діоди Д2, Д4 відкриті, а Д1, Д3 закриті, при цьому струм i_n тече через діод Д2, резистор навантаження R_n і діод Д4 у цьому ж напрямі, що й у перший півперіод напруги.

При цьому середній струм $I_{n,ср}$ і середня напруга $U_{n,ср}$ у навантаження у два рази перевищують струм і напругу однопівперіодного випрямляча, а пульсації такі ж, як у випрямлячів із середньою точкою.

Зворотна напруга на діодах у закритому стані однакова

$$U_{\text{звор.макс}} = U_{2m} \cdot$$

Величина і струм навантаження визначається за формулою

$$I_{\text{н.ср}} = 0.9 \frac{U_2}{R_H} \cdot$$

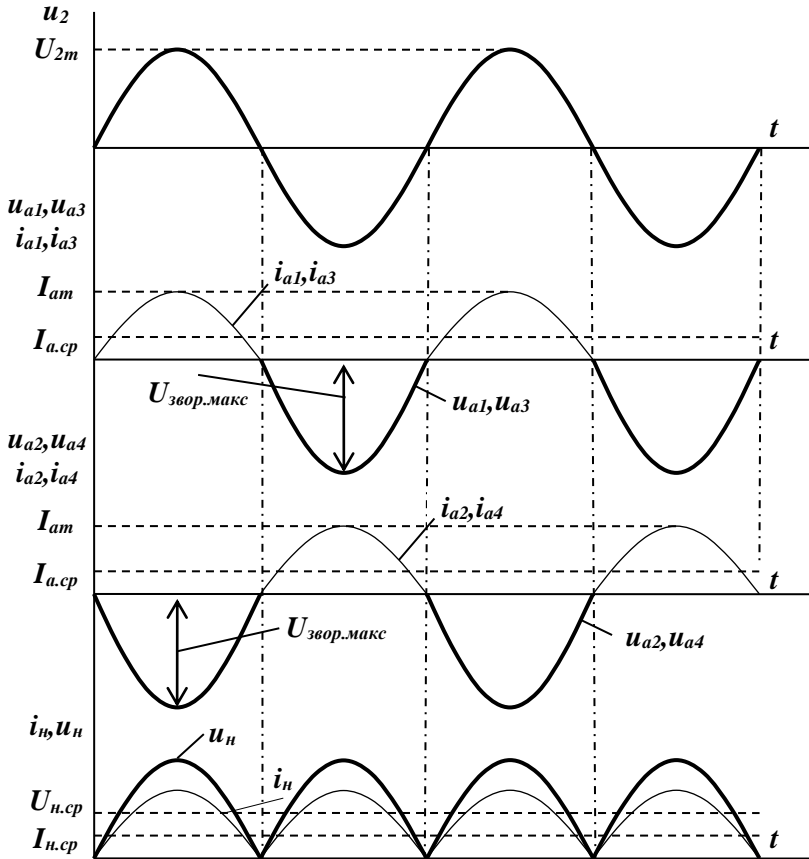


Рис. 4.18.6

1.1.4. Згладжуючі фільтри

Випрямлена напруга має пульсуючий характер і її не можна безпосередньо використовувати для живлення електронних приладів. Тому для зменшення ступеня пульсації на виході випрямляча застосовують згладжуючі фільтри.

Фільтри складаються з конденсаторів і котушок індуктивності. Основні види фільтрів: **ємнісний, індуктивний і змішаний.**

Ємнісний фільтр (рис. 4.18.7, а) вмикається паралельно резистору навантаження і шунтує його для змінної складової струму. При цьому конденсатор C_ϕ поперемінно заряджається через резистор випрямленої напруги u_B , а потім розряджається через резистор R_n . Якщо постійна часу розряду конденсатора значно перевищує період напруги u_2 , то напруга при розрядці зменшується неістотно (рис. 4.18.7,б), що призводить до значного збільшення середнього значення напруги на резисторі навантаження $U_{н.ср}$ і до зниження ступеня пульсації випрямленої напруги.

Індуктивний фільтр використовується для слабких струмів і невеликої потужності, тобто при високоомному навантаженні.

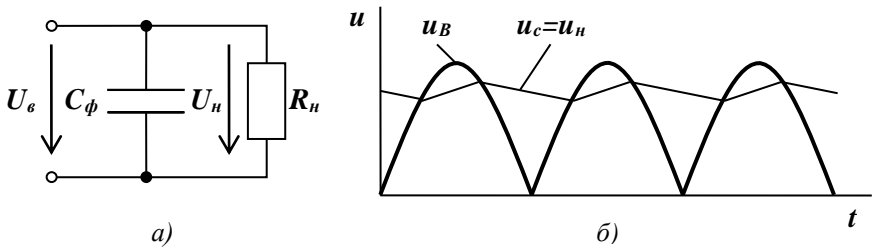


Рис. 4.18.7

При цьому основною характеристикою фільтра є коефіцієнт згладжування

$$q = \frac{P_{ex}}{P_{вих}}$$

де $P_{вх}$ – коефіцієнт пульсації на вході фільтра; $P_{вих}$ – коефіцієнт пульсації на виході фільтра.

Для випрямлячів великої й середньої потужностей застосовуються індуктивні фільтри, які вмикаються послідовно з резисторами навантажень (рис. 4.18.8, а).

У результаті змінна складова струму через навантаження значно зменшується і знижує ступінь пульсації випрямленої напруги (рис. 4.18.8. б).

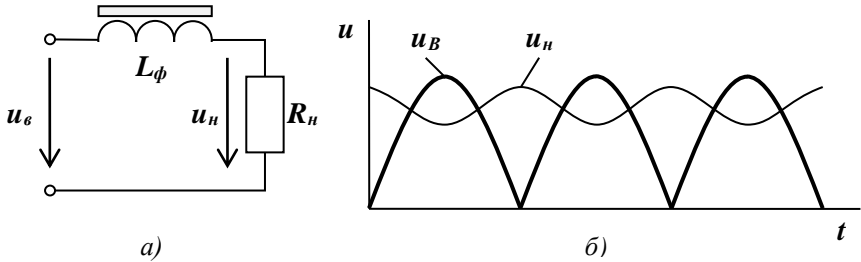


Рис. 4.18.8

Частіше використовуються змішані фільтри: **Г-подібний LC-фільтр** (рис. 4.18.9) або **П-подібний CLC-фільтр** (рис. 4.18.10).

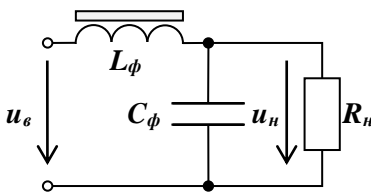


Рис. 4.18.9

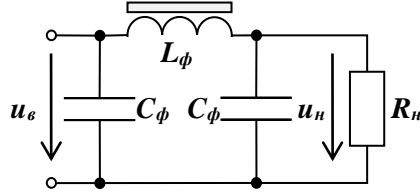


Рис. 4.18.10

Вони забезпечують вищий ступінь згладжування випрямленої напруги.

1.1.1. Зовнішні характеристики випрямлячів

Залежність напруги від величини струму навантаження $U_n = f(I_n)$ називають *зовнішньою характеристикою випрямляча*. Вона визначається формулою

$$U_H = U_{н.хх} - I_H (R_{ГР} + R_D),$$

де $U_{н.хх}$ – напруга при навантаженні на холостому ході ($I_H = 0$); $R_{ГР}$ – активний опір трансформатора; R_D – опір діода в прямому напрямі.

На рис. 4.18.11 показані зовнішні характеристики випрямлячів з фільтрами і без них:

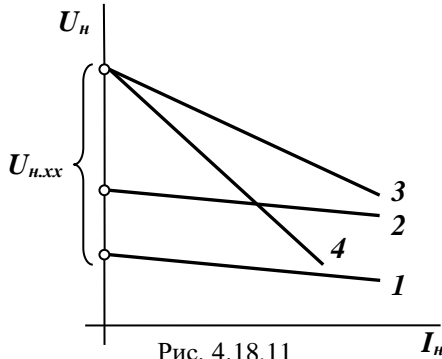


Рис. 4.18.11

- 1 – однопівперіодний випрямляч без фільтра;
- 2 – двопівперіодний випрямляч без фільтра;
- 3 – однопівперіодний випрямляч із С-фільтром;
- 4 – двопівперіодний випрямляч із RC-фільтром.

2. Практична частина

2.1. Дослід № 1. Однопівперіодний випрямляч

2.1.1. Складіть схему однопівперіодного випрямляча (рис. 4.18.12).

2.1.2. Використовуючи як навантаження опір R , зніміть три зовнішні характеристики випрямляча $U_H = f(I_H)$ (див. методику зняття зовнішніх характеристик):

- для випрямляча без фільтра;
- для випрямляча з С-фільтром
- для випрямляча *CLC*-фільтром.

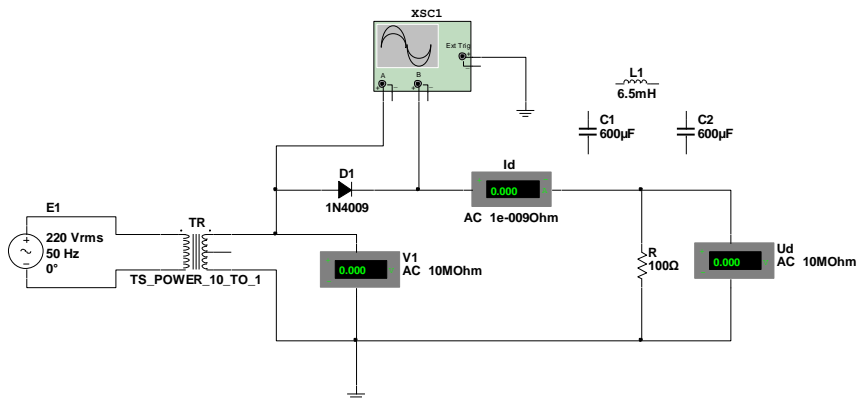


Рис. 4.18.12

2.1.3. Для $R = 100$ Ом зніміть три осцилограми вихідної напруги з урахуванням масштабу (див. методику роботи з осцилографом).

2.2. Дослід № 2. Двопівперіодний випрямляч

2.2.1. Складіть схему двопівперіодного випрямляча із середньою точкою трансформатора.

2.2.2. Випрямляч без фільтра. Для $R = 100$ Ом зніміть осцилограму вихідної напруги з урахуванням масштабу (див. методику роботи з осцилографом).

2.3. Дослід № 3. Двопівперіодний мостовий випрямляч

2.3.1. Складіть схему двопівперіодного мостового випрямляча (рис. 4.18.13).

2.3.2. Використовуючи як навантаження опір R , зніміть три зовнішні характеристики випрямляча $U_H = f(I_H)$ (див. методику зняття зовнішніх характеристик):

- для випрямляча без фільтра;
- для випрямляча з C -фільтром
- для випрямляча CLC -фільтром.

2.3.3. Для $R = 100$ Ом зніміть три осцилограми вихідної напруги з урахуванням масштабу (див. методику роботи з осцилографом).

2.3.4. Побудуйте зовнішні характеристики випрямляючих приладів в єдиній системі координат і зробіть висновки про проведену роботу.

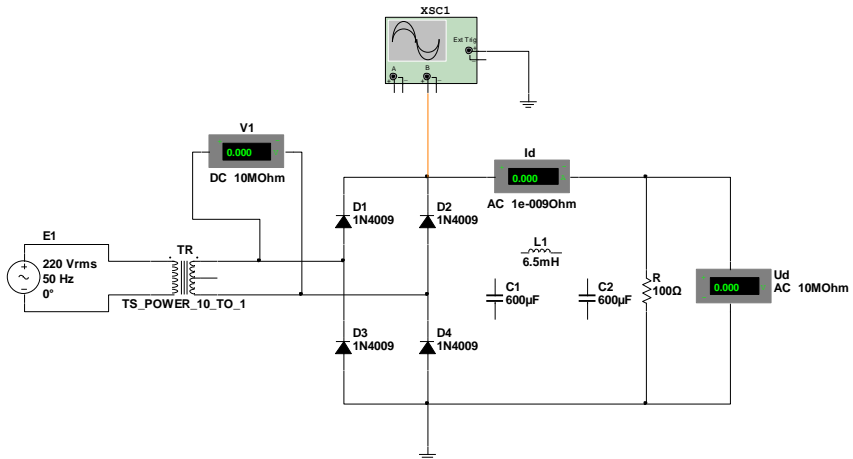


Рис. 4.18.13

2.4. Дослід № 4. Електричні фільтри низьких та високих частот

2.4.1. Завдання роботи

2.4.1.1. Ознайомитись з методичними відомостями. Для фільтра нижніх частот (НЧ) за заданою частотою перерізу $F_{пер.1}$ та опором R розрахувати параметри L та C для Т-подібної і П-подібної структур. Розрахувати смугу пропускання $F_{роз.пр.2}$ фільтра НЧ в кГц.

2.4.1.2. Зняти покази амплітудно-частотних характеристик фільтрів НЧ і графічно визначити лінійну частоту перерізу $F_{пер.експ1}$ отриману експериментально. Далі за графіком чисельно визначити смуги пропускання в кГц. Порівняти отримані значення смуги пропускання з теоретичними значеннями.

2.4.1.3. Для фільтра високих частот (ВЧ) за заданою частотою перерізу $F_{пер.2}$, опором R розрахувати параметри L та C для

Т-подібної і П-подібної структур. Розрахувати смугу пропуску $F_{пер.2}$ для фільтра ВЧ в кГц.

2.4.1.4. Зняти покази амплітудно-частотних характеристик фільтрів ВЧ і графічно визначити лінійну частоту перерізу $F_{пер.експ2}$, отриману експериментально. Далі за графіком чисельно визначити смуги пропускання в кГц. Порівняти отримані значення смуги пропускання з теоретичними значеннями.

2.4.2. Хід роботи

2.4.2.1. Запустити програму моделювання Multisim.

2.4.2.2. За формулою 4.18.1 розрахуйте номер вашого варіанту, якщо N – ваш порядковий номер в групі, а операція *mod* - операція остачі від ділення:

$$V = (N \bmod 10) + 1 \quad (4.18.1)$$

Необхідні значення E , R , та $F_{пер.1}$ визначить з таблиці 2.18.1.

Таблиця 2.18.1. Лінійна частота перерізу фільтра НЧ

$E=220V$ $R=1кОм$	Номер варіанта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{пер.1}, кГц$	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	9.5	10.0

У фільтрі НЧ параметри фільтра визначаються за наступними формулами:

$$L = \frac{2R}{\omega_{рез}}; \quad (4.18.2)$$

$$\omega_{рез} = \frac{2}{\sqrt{LC}}; \quad (4.18.3)$$

$$C = \frac{2}{\omega_{рез}R}; \quad (4.18.4)$$

Зауваження: сумарна індуктивність фільтра $L = \frac{L}{2} + \frac{L}{2}$ для Т-подібної структури розподіляється порівну між двома котушками по $\frac{L}{2}$, і сумарна ємність фільтра $C = \frac{C}{2} + \frac{C}{2}$ для П-подібної структури так само розподіляється порівну між ємностями конденсаторів.

Розрахувати пропускну полосу фільтра НЧ за формулою:

2.4.2.3. Зібрати схему Т-подібного фільтра НЧ (рис. 4.18.14):

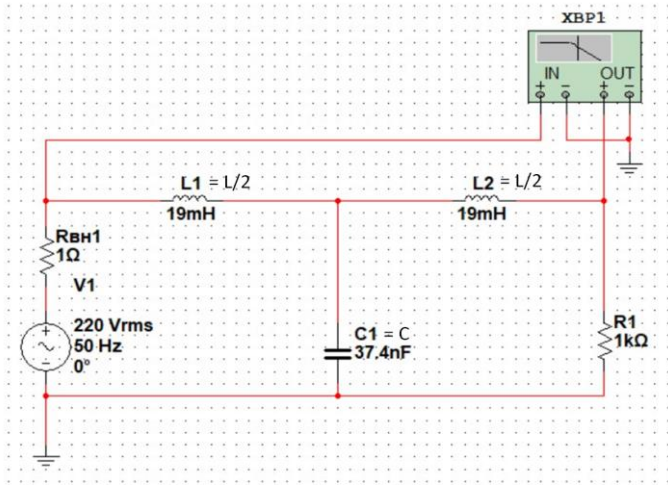


Рис. 4.18.14. Схема Т-подібного фільтра нижніх частот
 2.4.2.4. Запустити режим моделювання, натиснувши кнопку
 «Пуск/продолження режима моделирования» або натиснути

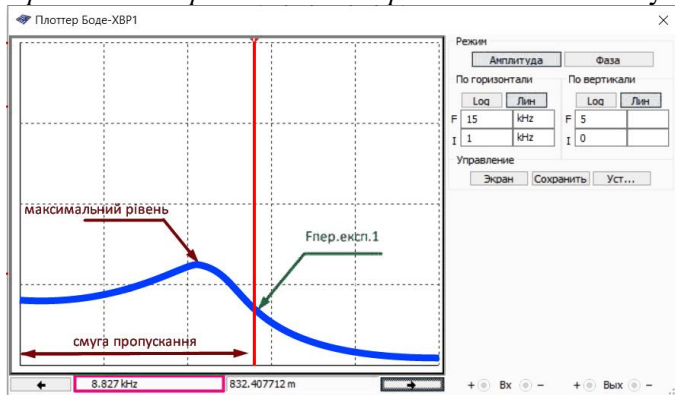


Рис. 4.18.15. АЧХ Т-подібного фільтра низьких частот
 кнопки $F5$ на клавіатурі. Відкрити вимірювач частотних
 характеристик подвійним натиском на відповідний елемент на
 схемі. Зняти покази амплітудно-частотної характеристики в
 лінійному режимі (рис. 4.18.15).

2.4.2.5. За графіком визначити $F_{\text{пер.експ.1}}$ (при значенні
 амплітудно-частотної характеристики меншій від максимального
 значення на 0.707). Чисельно визначити смугу пропуску в кГц.
 Отримані результати порівняти з заданим значенням $F_{\text{пер.1}}$.

2.4.2.6. Зібрати схему для П-подібного фільтра низьких частот (рис. 4.18.16).

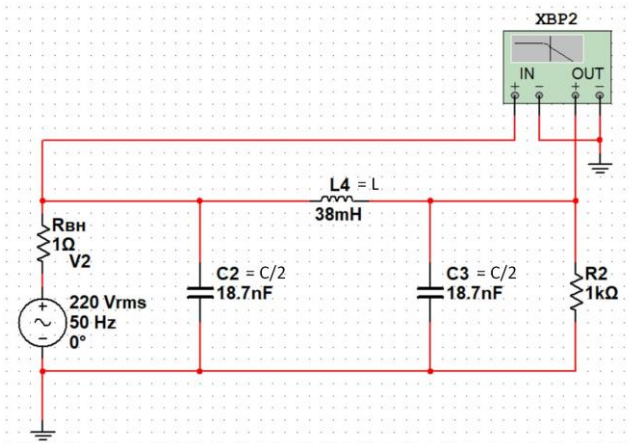


Рис. 4.18.16. Схема П-подібного фільтра низьких частот
2.4.2.7. Виконати пункти 2.4.2.4-2.4.2.5 для фільтра низьких частот (рис. 4.18.17).

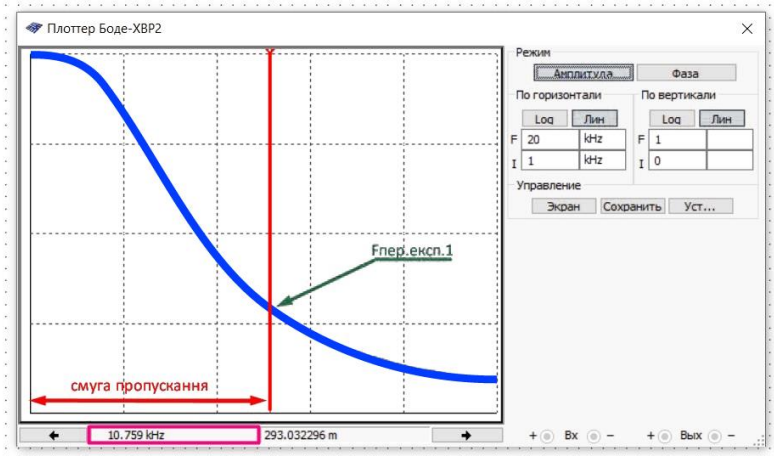


Рис. 4.18.17. АЧХ П-подібного фільтра низьких частот
2.4.2.8. За формулою 4.18.1 розрахуйте номер вашого варіанту. Необхідні значення E, R та $F_{пер.2}$ визначить з таблиці 2.18.2.

Таблиця 2.18.2. Лінійна частота перерізу фільтра ВЧ

$E=220В$ $R=1кОм$	Номер варіанта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{пер.2}, кГц$	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	9.5	10.0

У фільтрі ВЧ параметри фільтра визначаються за наступними формулами:

$$L = \frac{R}{2\omega_{рез}}; \quad (4.18.9)$$

$$\omega_{рез} = \frac{1}{2\sqrt{LC}}; \quad (4.18.10)$$

$$C = \frac{1}{2\omega_{рез}R}; \quad (4.18.11)$$

де $\omega_{рез} = \omega_{пер} = 2\pi F_{пер.2}$ – обертова частота резонансу, $F_{пер.1}$ – лінійна частота перерізу, а $R = \sqrt{\frac{L}{C}} = 1$ кОм – опір навантаження вважається рівним опору фільтра при $\omega_{рез}$.

Для розрахунку параметрів фільтра ВЧ підставимо лінійну частоту перерізу у формули (2.4.2.9-2.4.2.11). Відповідно отримаємо:

$$L \approx \frac{R}{4\pi F_{пер.2}}; \quad (4.18.12)$$

$$F_{пер.1} \approx \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}; \quad (4.18.13)$$

$$C \approx \frac{1}{4\pi F_{пер.2}R}; \quad (4.18.14)$$

Зауваження: сумарна ємність фільтра $4C = 2C + 2C$ для Т-подібних структур і сумарна індуктивність фільтра $4L = 2L + 2L$ для П-подібних структур.

Розрахувати пропускну полосу фільтра високих частот за формулою:

$$F_{роз.пр.2} \approx \frac{F_{пер.2}}{\infty}. \quad (4.18.15)$$

2.4.2.9. Повторити кроки 2.4.2.3- 2.4.2.7 враховуючи розрахунки з кроку.

2.5. Дослід № 5. Режекторні та смугові фільтри

2.5.1. Завдання роботи

2.5.1.1. Ознайомитись з теоретичними відомостями про режекторні та смугові фільтри. Для режекторного фільтра за заданою смугою придушення $F_{прод.роз}$ та опором R розрахувати параметри L та C для Т-подібної і П-подібної структур. Отримані значення L та C застосувати для розрахунку частоти резонансу фільтра $F_{рез}$.

2.5.1.2. Зняти покази амплітудно-частотних характеристик фільтрів НЧ і графічно визначити лінійну частоту перерізу $F_{прод.експ.1}$, отриману експериментально. Порівняти отримані значення смуги придушення з теоретичними значеннями. Зробити висновки й занести у звіт.

2.5.1.3. Для смугового фільтра за заданою смугою пропускання $F_{прон.роз}$ та опором R розрахувати параметри L та C для Т-подібної і П-подібної структур. Отримані розрахунки використати для знаходження частоти резонансу $F_{рез}$.

2.5.1.4. Зняти покази амплітудно-частотних характеристик смугового фільтр. Чисельно визначити в кГц смугу пропуску отриману експериментальним методом $F_{прон.екс}$. Порівняти отримані дані з розрахунковими. Зробити висновок та занести результати у звіт.

2.5.2. Хід роботи

2.5.2.1. Запустити програму моделювання Multisim.

2.5.2.2. За формулою 4.18.1 (з першої лабораторної роботи) розрахуйте номер вашого варіанту. Необхідні значення E , R , $F_{пер.1}$ та $F_{пер.2}$ визначить з таблиці 2.18.3.

Таблиця 2.18.3. Граничні частоти для смуги придушення режекторного фільтра

$E=220В$ $R=1кОм$	Номер варіанта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{роз.1}, кГц$	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	9.5	10.0
$F_{роз.2}, кГц$	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	11	11.5	12.5

Розрахувати L , C і за їх допомоги знайти резонансну частоту фільтра $F_{рез}$ за формулами:

$$L_1 \approx \frac{R(F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}})}{\pi \cdot F_{\text{роз.1}} \cdot F_{\text{роз.2}}}; \quad (4.18.16)$$

$$L_2 \approx \frac{R}{4\pi(F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}})}; \quad (4.18.17)$$

$$C_1 \approx \frac{1}{4\pi R(F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}})}; \quad (4.18.18)$$

$$C_2 \approx \frac{F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}}}{\pi \cdot R \cdot F_{\text{роз.1}} \cdot F_{\text{роз.2}}}; \quad (4.18.19)$$

$$F(\text{кГц}) \approx \frac{159}{\sqrt{L_1(\text{мкГн})C_1(\text{мкФ})}}; \quad (4.18.20)$$

де $F_{\text{роз.1}}$ та $F_{\text{роз.2}}$ – граничні частоти смуги придушення режекторного фільтра, $R = \sqrt{\frac{L}{C}} = 1\text{кОм}$ – опір навантаження вважається рівним опорі фільтра при $\omega_{\text{рез}}$.

Визначити розрахункову смугу придушення режекторного фільтра:

$$F_{\text{роз.пр.}} \approx \frac{F_{\text{роз.2}}}{F_{\text{роз.1}}}. \quad (4.18.21)$$

2.5.2.3. Зібрати схему режекторного Т-подібного фільтра (рис. 4.18.18).

2.5.2.4. Запустити режим моделювання, натиснувши клавішу «Пуск/продолження режима моделювання» або натиснути клавішу F5 на клавіатурі. Відкрити вимірювач частотних характеристик подвійним натиском на відповідний елемент на схемі. Зняти покази амплітудно-частотної характеристики в лінійному режимі (рис. 4.18.19). Визначити смугу придушення режекторного фільтра і порівняти отримані дані з розрахунковими. Зразок того як повинна виглядати АЧХ зображено на рисунку 4.18.19.

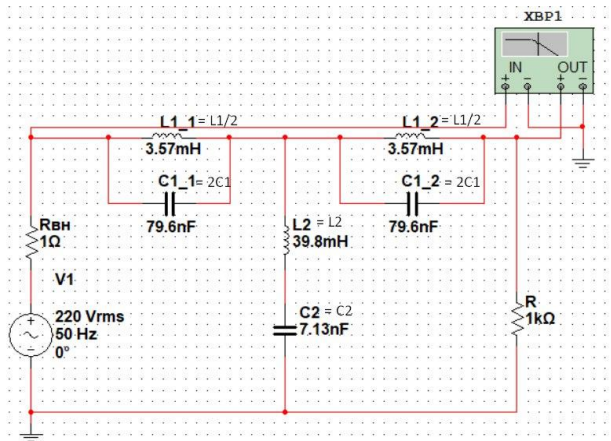


Рисунок 4.18.18. Схема режекторного Т-подібного фільтра

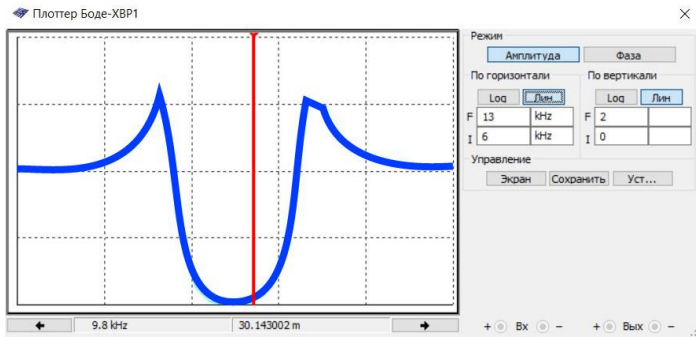


Рисунок 4.18.19. АЧХ режекторного Т-подібного фільтра

2.5.2.5. Зібрати схему режекторного П-подібного фільтра (рис. 4.18.20).

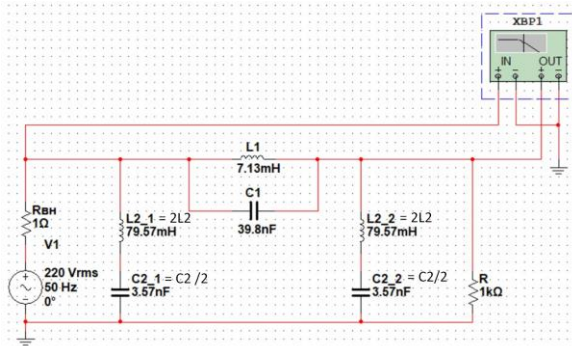


Рисунок 4.18.20. Схема режекторного П-подібного фільтра

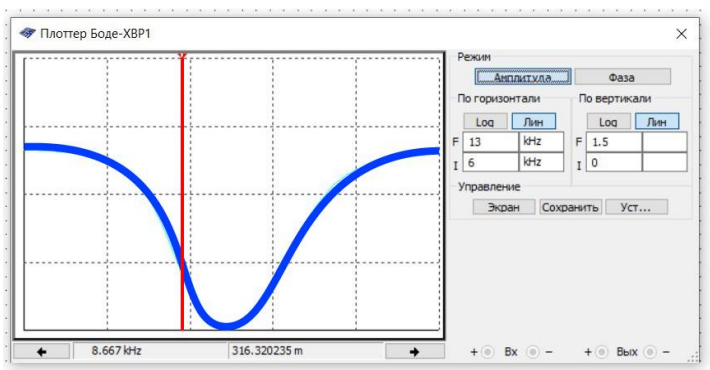


Рисунок 4.18.21. АЧХ режекторного П-подібного фільтра

2.5.2.6. Виконати пункти 2.5.2.3. і 2.5.2.4.

2.5.2.7. За формулою 4.18.1 (з першої лабораторної роботи) розрахуйте номер вашого варіанту. Необхідні значення $E, R, F_{\text{роз.1}}$ та $F_{\text{роз.2}}$ визначить з таблиці 2.18.4.

Таблиця 2.18.4. Граничні частоти для смуги придушення режекторного фільтра

$E=220\text{В}$ $R=1\text{кОм}$	Номер варіанта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$F_{\text{роз.1}}, \text{кГц}$	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	9.0	9.5	10.0
$F_{\text{роз.2}}, \text{кГц}$	8.0	8.5	9.0	9.5	10	10.5	11	12	12.5	13

Розрахувати L, C і за їх допомоги знайти резонансну частоту фільтра $F_{\text{рез.}}$ за формулами:

$$L_1 \approx \frac{R}{\pi \cdot (F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}})}; \quad (2.22)$$

$$L_2 \approx \frac{R(F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}})}{4\pi \cdot F_{\text{роз.1}} \cdot F_{\text{роз.2}}}; \quad (2.23)$$

$$C_1 \approx \frac{F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}}}{4\pi R \cdot F_{\text{роз.1}} \cdot F_{\text{роз.2}}}; \quad (2.24)$$

$$C_2 \approx \frac{1}{\pi R(F_{\text{роз.2}} - F_{\text{роз.1}})}; \quad (2.25)$$

$$F(\text{кГц}) \approx \frac{159}{\sqrt{L_1(\text{мкГн})C_1(\text{мкФ})}}; \quad (2.26)$$

де $F_{роз.1}$ та $F_{роз.2}$ – граничні частоти смуги пропускання
 смугового фільтра, $R = \sqrt{\frac{L}{C}} = 1\text{кОм}$ – опір навантаження
 вважається рівним опоріві фільтра при $\omega_{рез}$.

Визначити розрахункову смугу придушення режекторного
 фільтра:

$$F_{роз.пропус.} \approx \frac{F_{роз.2}}{F_{роз.1}}. \quad (2.27)$$

2.5.2.8. Повторити кроки 2.5.2.3-2.5.2.7 з урахуванням
 розрахунків з пункту 7 для Т-подібного та П-подібного
 смугового фільтрів (рис. 4.18.18-4.18.21).

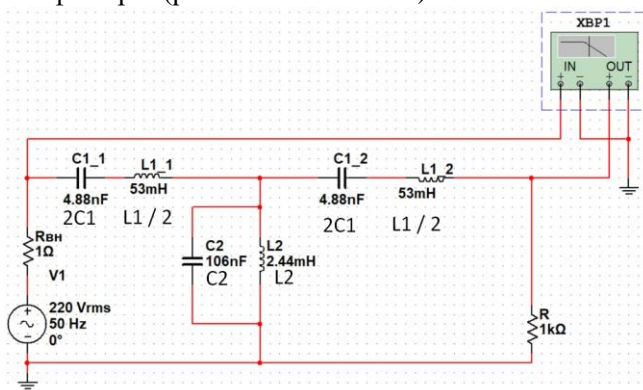


Рис. 4.18.22. Схема смугового Т-подібного фільтра

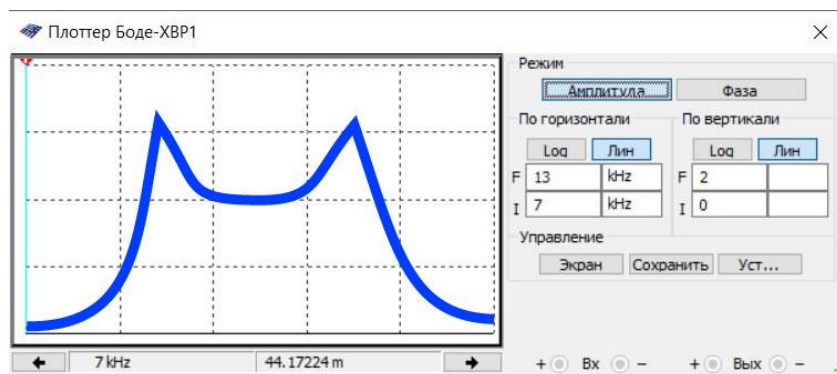


Рис. 4.18.23. АЧХ смугового Т-подібного фільтра

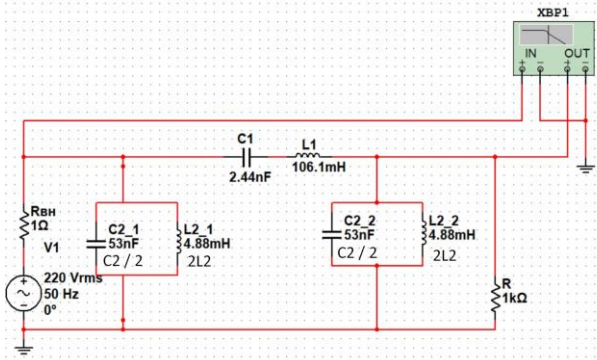


Рис. 4.18.24. АЧХ смугового Т-подібного фільтра
Схема смугового П-подібного фільтра

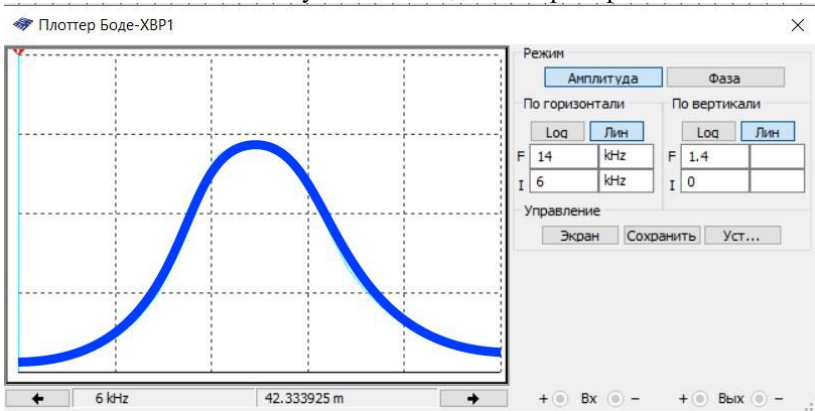


Рис. 4.18.25. АЧХ смугового Т-подібного фільтра
АЧХ смугового П-подібного фільтра

3. Методики проведення дослідів

3.1.Методика зняття зовнішніх характеристик

При знятті зовнішніх характеристик випрямних приладів необхідно змінювати опір резистора R_n у колі навантаження. Для цього відкриваємо діалогове вікно резистора за допомогою правої кнопки миші. У наступних вікнах натискаємо кнопки **Properties** та **Value** і встановлюємо необхідний опір (рис. 4.18.26).



Рис. 4.18.26

Одержані покази приладів записуємо в табл. 4.18.1.

Таблиця 4.18.1

$R, \text{Ом}$	100	80	60	40	20
I_H, A					
$U_H, \text{В}$					

3.2. Методика роботи з осцилографом

Для отримання кривих напруги в будь-якій точці схеми в програмі *Multisim* використовується осцилограф. Подвійним натисненням лівої кнопки миші відкриваємо діалогове вікно осцилографа. Осцилограф має два канали: *Channel A* та *Channel B*.

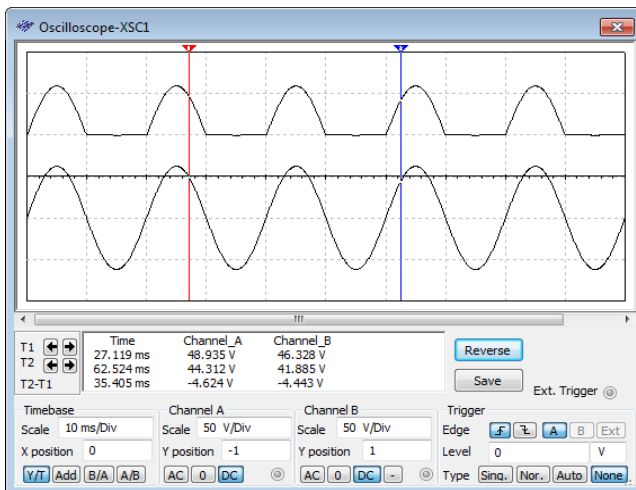


Рис. 4.18.27

Розгортка за часом (Timebase) задається відповідними клавішами. У даному випадку маємо 10 ms/div , тобто на 1 поділку 10 мілісекунд.

По кожному каналу окремо задається вертикальна розгортка. У даному конкретному випадку маємо 50 V/div , тобто 50 вольт на 1 поділку.

На екрані зображено дві криві – вхідна і вихідна напруги однопівперіодного випрямляча.

Є дві вертикальні риски на екрані осцилографа, які за допомогою лівої кнопки мишки можна пересувати, встановлюючи цим місце вимірювання. У додатковому вікні з'являються координати зазначених позицій.

У даному конкретному випадку маємо:

T1	← →	Time	Channel_A	Channel_B
T2	← →	27.119 ms	48.935 V	46.328 V
T2-T1		62.524 ms	44.312 V	41.885 V
		35.405 ms	-4.624 V	-4.443 V

Канал **A**, Y positions = -1.00.

Канал **B**, Y positions = -1.00.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке зовнішня характеристика випрямляча?
2. Який характер має вихідна напруга на випрямлячі з середньою точкою?
3. Який характер має вихідна напруга на випрямлячі за мостовою схемою?
4. Які типи фільтрів Ви знаєте.
5. Що таке коефіцієнт згладжування, як він визначається?
6. Намалуйте схему П-подібного **CLC**-фільтра.
7. Яке значення мають мережеві фільтри придушення викидів мережевої напруги? На яких елементах реалізується мережевий пасивний фільтр?
8. Поясніть термін «силовий вплив».
9. Який фільтр називають фільтр типу **k**?
10. Зобразіть графічно смуг пропускання та придушення фільтрів НЧ.
11. Зобразіть графічно смуг пропускання та придушення фільтрів ВЧ.

12. Які умови повинні бути виконані для резонансу струмів та напруг режекторних та смугових фільтрів?
13. Зобразити графічно визначення смуги пропускання і смуги придушення смугового фільтру.
14. Зобразити графічно визначення смуги пропускання і смуги придушення режекторного фільтру.
15. Чисельно визначити в кГц розрахункову та експериментальну смуги придушення смугового фільтру і пояснити причину різності частот.
16. Чисельно визначити в кГц розрахункову та експериментальну смуги придушення режекторного фільтру і пояснити причину різності частот

Лабораторна робота № 19

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАСКАДНОГО ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

Мета роботи: ознайомлення з методикою побудови схем та моделювання роботи приладів. Дослідження амплітудних і частотних властивостей двокаскадного підсилювача.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти особливості побудови схем та принципів роботи двокаскадного транзисторного підсилювача.

1. Теоретична частина

1.1. Загальні поняття

Підсилювач – це пристрій, призначений для однозначного та безперервного перетворення електричних сигналів малої величини в сигнали значно більші за величиною. При вимірюванні електричних і неелектричних величин, при контролі й автоматизації технологічних процесів широко застосовуються підсилювачі.

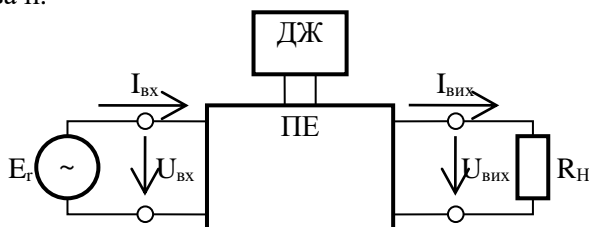


Рис. 4.19.1

Будь-який підсилювач, структурна схема якого зображена на рис. 4.19.1., має вхідне і вихідне кола, до яких під'єднується джерело сигналу E_r , пристрій навантаження R_H , джерело живлення $ДЖ$ і підсилюючий елемент $ПЕ$ (транзистор, мікросхема). Процес підсилення пов'язаний із перетворенням

енергії джерела живлення в енергію вихідного сигналу підсилювача.

1.2. Основні параметри і характеристики підсилювачів

Коефіцієнт підсилення

Коефіцієнт підсилення за напругою K_0 у загальному випадку є комплексною величиною, оскільки вхідні і вихідні сигнали змінні. На практиці часто використовують K_0 у вигляді відношення модулів (діючих значень, амплітуд), вихідного та вхідного сигналів

$$K_0 = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$$

Амплітудна характеристика

Залежність амплітуди вихідної напруги підсилювача від зміни амплітуди на вході $U_{m.\text{вих}} = f(U_{m.\text{вх}})$ визначає амплітудна характеристика (рис. 4.19.2). Пропорційній залежності цих напруг, які зв'язані між собою коефіцієнтом підсилення підсилювача K_0 , постійним на цій ділянці відповідає лінійна ділянка **аб**. Ділянка **аб** є робочою ділянкою підсилювачів. Ділянка амплітудної характеристики вища за точку **б**, нелінійна і не використовується при роботі підсилювачів.

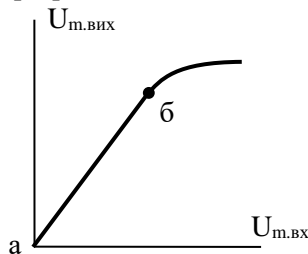


Рис. 4.19.2

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)

Ця характеристика підсилювача відображає залежність модуля коефіцієнта підсилення K_0 від частоти вхідного сигналу f . На рис. 4.19.3 наведена АЧХ, що найчастіше зустрічається. Робочу область підсилювача можна виділити на ній, що лежить між верхньою $f_{вг}$ і нижньою $f_{нг}$ граничними частотами підсилювача, в якій коефіцієнт підсилення K_0 постійний.

Зазвичай вимірюють $K = \frac{K_0}{\sqrt{2}}$

де K_0 – коефіцієнт підсилення на середніх частотах.

Область частот $\Delta f = f_{вг} - f_{нг}$ називається *смужою пропускання* підсилювача.

У більшості підсилювачів $\Delta f = (10^5 \div 10^7)$ Гц, тому вони називаються широкосмуговими.

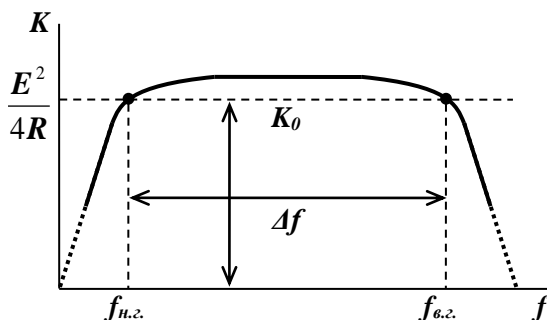


Рис. 4.19.3

1.3. Багатокаскадні підсилювачі

Такі підсилювачі застосовуються для отримання великого коефіцієнта підсилення. Структурна схема підсилювача наведена на рисунку 4.19.4 і містить n однокаскадних підсилювачів.

Коефіцієнт підсилення

$$\dot{K}_{\Sigma} = \dot{K}_1 + \dot{K}_2 + \dots + \dot{K}_n = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{U}_{вх}}$$

Між каскадами підсилювачів увімкнені конденсатори $C_{C1}, C_{C2}, \dots, C_{Cn}$ що виключають їх взаємний вплив за постійним струмом. Міжкаскадний зв'язок називається **RC**-зв'язком, де **R** вважається вхідним опором наступного каскаду підсилювача.

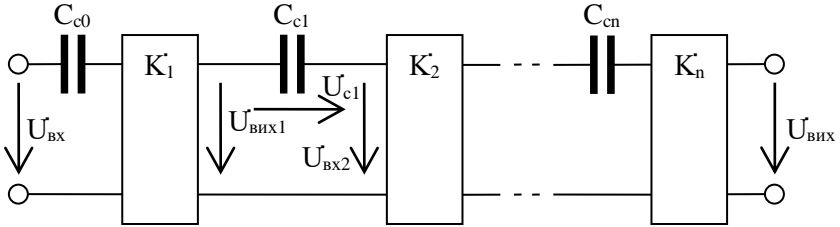


Рис. 4.19.4

Розглянемо вплив ємності C_{C1} на амплітудно-частотну характеристику підсилювача. Згідно з другим законом Кірхгофа для електричного кола міжкаскадного зв'язку можна записати рівняння $\dot{U}_{вих1} = \dot{U}_{вх2} + \dot{U}_{C1}$, що є векторною сумою (рис. 4.19.5, а).

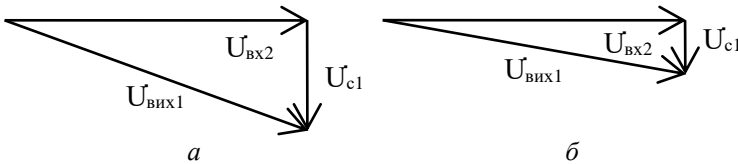


Рис. 4.19.5

Оскільки вихідна напруга першого каскаду визначається характеристиками цього каскаду, тому для міжкаскадного зв'язку вона постійна $\dot{U}_{вих1} = \text{const}$. Нехай величина ємності C_{C1} зростає, $X_{c1} \sim \frac{1}{C_{c1}}$ спадає, \dot{U}_{c1} також зменшується, останнє

приводить до збільшення $\dot{U}_{\text{ax}2}$ (рис. 4.19.5, б) і загального коефіцієнта підсилення \dot{K}_{Σ} .

Умовно цей процес можна зобразити за допомогою діаграми

$$C_{C1} \uparrow \rightarrow X_{c1} \downarrow \rightarrow \dot{U}_{c1} \downarrow \rightarrow \dot{U}_{\text{ax}2} \uparrow \rightarrow \dot{K}_{\Sigma} \uparrow.$$

Оскільки C_{C1} істотно впливає на зміну X_{c1} на низьких частотах, то збільшення коефіцієнта підсилення спостерігатимуться у низькочастотній області амплітудно-частотної характеристики підсилювача (рис. 4.19.6, крива б). При зменшенні C_{C1} коефіцієнт підсилення на низьких частотах (рис. 4.19.6, крива а).

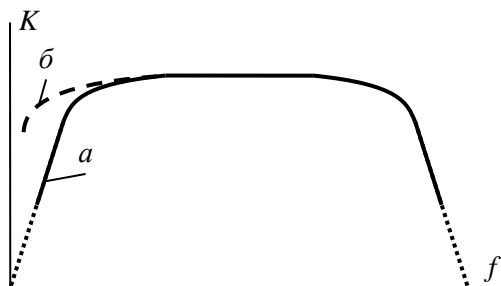


Рис. 4.19.6

2. Практична частина

Схема проведення дослідів (рис. 4.19.7)

2.1. Дослід № 1. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача.

2.1.1. Змініть амплітудно-частотну характеристику підсилювача $K_{\text{відс}} = F(f)$ (див. методику зняття амплітудно-частотних характеристик) при $U_{\text{ax}} = 100$ мкВ.

2.1.2. Побудуйте з урахуванням масштабу амплітудно-частотну характеристику.

2.2. Дослід № 2. Амплітудна характеристика підсилювача.

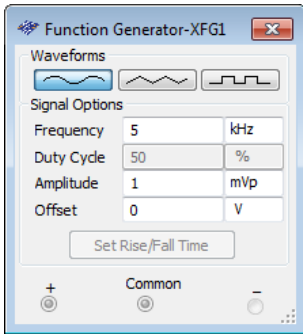
2.2.1. Змініть амплітудну характеристику підсилювача $U_{m.вих} = F(U_{m.вх})$, (див. методику зняття амплітудних характеристик) при $f = 100$ кГц.



2.2.2. Побудуйте з урахуванням масштабу амплітудно-частотну характеристику.

3. Методики проведення дослідів

Методика зняття амплітудно-частотних характеристик

Необхідно змінювати частоту вхідного сигналу при незмінній його амплітуді при знятті амплітудно-частотних характеристик підсилювальних приладів. Відкриваємо для цього діалогове вікно функціонального генератора і задаємо вхідний сигнал синусоїдної форми. Далі на вході встановлюємо необхідну амплітуду сигналу (наприклад, **Amplitude 1 mV**) і його частоту (наприклад, **Frequency 5 kHz**).



Натиснувши клавішу  або клавішу , вимірюємо сигнали на вході й виході підсилювача за допомогою відповідних вольтметрів. Обчислюємо коефіцієнт підсилення

$$K_{n\text{ідс}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} \text{ та записуємо його в табл. 4.19.1.}$$

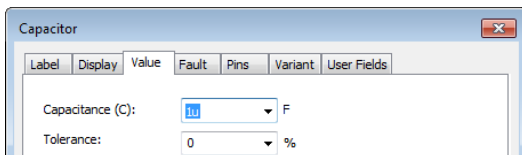
Дані вимірювання для різних частот вхідного сигналу повторюємо, заповнюючи таблицю.

Таблиця 4.19.1

$f, \text{Гц}$	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
$K_{n\text{ідс}} (C_c = 1 \text{ мкФ})$							
$K_{n\text{ідс}} (C_c = 10^3 \text{ мкФ})$							

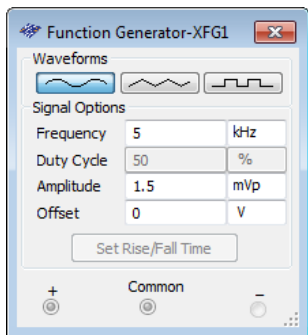
Характеристики знімаються при двох значеннях ємностей конденсаторів зв'язку $C_c = 1 \text{ мкФ}$ і 1000 мкФ .

Відкриваємо діалогове вікно конденсаторів для зміни ємності конденсаторів зв'язку та встановлюємо необхідну ємність (наприклад, Capacitance 2 мкФ).





Методика зняття амплітудних характеристик

При вимірюванні амплітудних характеристик підсилювальних приладів необхідно змінювати амплітуду вхідного сигналу при незмінній його частоті. Відкриваємо для цього діалогове вікно функціонального генератора та задаємо вхідний синусоїдний сигнал.



Необхідну частоту сигналу встановлюємо на вході (наприклад, **Frequency 5 kHz**) і амплітуду сигналу (наприклад, **Amplitude 1.5 mV**).

Натиснувши клавішу  або клавішу , вимірюємо сигнали на вході й виході за допомогою відповідних вольтметрів і записуємо показники в табл. 4.19.2. Для різних

амплітуд вхідного сигналу повторюємо дані вимірювання, обчислюємо коефіцієнти підсилення $K_{n\text{dc}} = \frac{U_{\text{aux}}}{U_{\text{ax}}}$, заповнюючи таблицю.

Таблиця 4.19.2

$U_{вх}, мкВ$	100	200	600	1000	1400	1800	2000
$U_{вих}, В$							
$K_{підс}$							

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке підсилювач, для чого він застосовується?
2. Що таке коефіцієнт підсилення?
3. Замалюйте робочу область підсилювача, в якому коефіцієнт підсилення постійний.
4. Які типи фільтрів Ви знаєте.
5. Що таке амплітудна характеристика підсилювача?
6. Як знімаються амплітудно-частотні характеристики підсилювача?

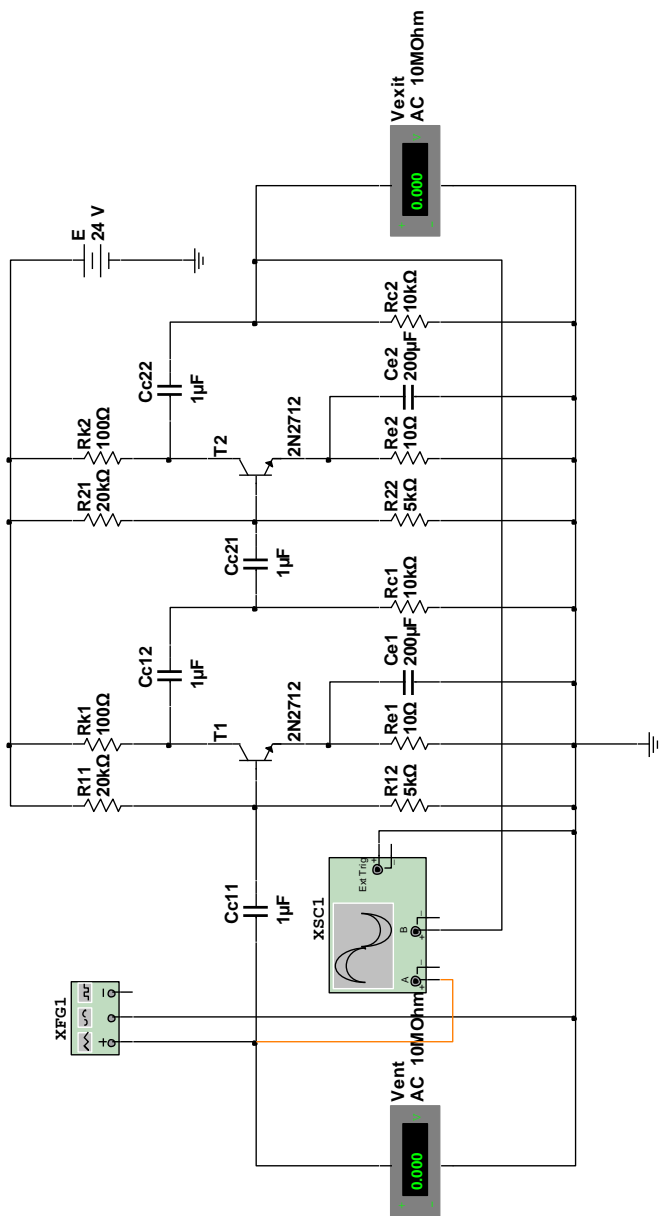


Рис. 4.19.7

Лабораторна робота № 20

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА ЗІ ЗВОРОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Мета роботи: ознайомлення із методикою побудови схем та моделювання роботи приладів; дослідження амплітудних і частотних властивостей операційного підсилювача; вивчення впливу від'ємного зворотного зв'язку на характеристики операційного підсилювача.

Пояснення до роботи: студент під час виконання роботи повинен добре розуміти особливості побудови схем та принципи роботи операційного підсилювача зі зворотними зв'язками.

1. Теоретична частина

1.1. Операційні підсилювачі

Підсилювачі постійного струму (ППС) – основа для конструювання операційних підсилювачів (ОП). Сучасні операційні підсилювачі – багатоцільові елементи, виконані у вигляді напівпровідникових інтегральних мікросхем. Широко застосовування вони отримали при конструюванні різних підсилюючих приладів, фільтрів, приладів збудження сигналів імпульсної та синусоїдної форм (генераторів сигналів), і т.д.

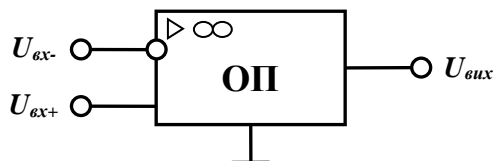


Рис. 4.20.1

Умовне позначення ОП зображене на рис. 4.20.1. Символ ▷ означає підсилення, а символ ∞ – дуже великий вхідний опір .

Один з входів підсилювача U_{ax+} – неінвертуючий, інший U_{ax-} – інвертуючий (за аналогією з диференціальними підсилювачами). Принципові електричні схеми, як правило, містять кілька каскадів підсилювачі постійного струму. Завжди виконується при цьому вхідний каскад за диференціальною схемою, а за схемою емітерного повторювача – вихідний каскад, що забезпечує потрібну навантажувальну здатність усієї схеми.

Сучасні інтегральні ОП володіють високим значенням коефіцієнта підсилення ($K = 10^4 \div 10^7$), вхідного опору ($R_{ax} = 10^4 \div 10^9$ Ом), можуть працювати від різнополярних джерел живлення й перетворювати в широкому діапазоні частот електричні сигнали (від 0 до 10^7 Гц). Амплітудна й амплітудно-частотна характеристики такого підсилювача аналогічні характеристикам ППС.

1.2. Зворотні зв'язки в операційних підсилювачах

З використанням зворотних зв'язків (ЗВ) виконуються конструювання різних електронних пристроїв на основі ОП.

Передача частини енергії вихідного сигналу підсилювача на його вхід називається *зворотним зв'язком* (рис. 4.20.2).

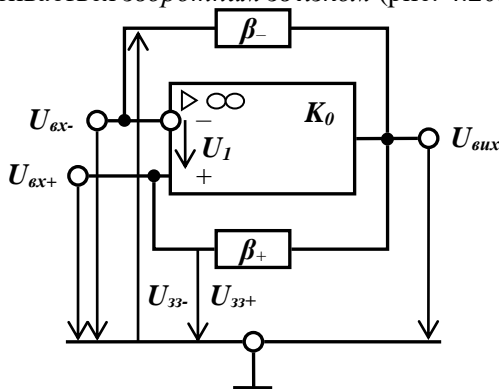


Рис. 4.20.2

Із вихідного кола у вхідне енергія передається через електричне коло зворотного зв'язку з коефіцієнтом передачі

$$\beta = \frac{U_{zz}}{U_{вих}}$$

Зворотний зв'язок називається *додатним*, якщо сигнал, що передається з виходу на вхід $U_{zz} = \beta U_{вих}$, збігається за фазою (додається) із вхідним сигналом

$$U_{вх} = U_1 + \beta U_{вих}$$

(на рис. 4.20.2 додатний зворотний зв'язок позначений β_+).

Коефіцієнт підсилення K_{β_+} підсилювача із додатним зворотним зв'язком визначається виразом

$$K_{\beta_+} = \frac{K_0}{1 - K_0 \cdot \beta_+}$$

K_0 – коефіцієнт підсилення підсилювача без зворотного зв'язку (де дією реактивних елементів операційного підсилювача в області середніх частот та зворотного зв'язку можна знехтувати).

Зворотний зв'язок називається *від'ємним*, якщо сигнал зворотного зв'язку U_{zz} знаходиться у протифазі (віднімається) з вхідним сигналом

$$U_{вх} = U_1 - \beta U_{вих}$$

(на рис. 4.20.2 від'ємний зворотний зв'язок позначений β_-).

Коефіцієнт підсилення K_{β_-} при від'ємному зворотному зв'язку буде

$$K_{\beta_-} = \frac{K_0}{1 + K_0 \cdot \beta_-}$$

Використання *від'ємного зворотного зв'язку* (ВЗЗ) у підсилювачах істотно поліпшує їх параметри:

- розширює смугу пропускання;
- зменшує вихідний опір;

- збільшує вхідний опір;
- підвищує стабільність коефіцієнта підсилення.

Тому ВЗЗ широко застосовується в підсилювальних приладах. *Додатний зворотний зв'язок* (ДЗЗ) впливає на параметри підсилювачів у протилежний спосіб.

Підвищення нестабільності коефіцієнта підсилення приводить до самозбудження підсилювача, тобто переходу його в режим генератора. Тому ДЗЗ використовується в генераторах гармонічних коливань та імпульсів.

1.3. Операційний підсилювач з ВЗЗ

Операційний підсилювач з від'ємним зворотним зв'язком найчастіше застосовується на практиці (рис. 4.20.3).

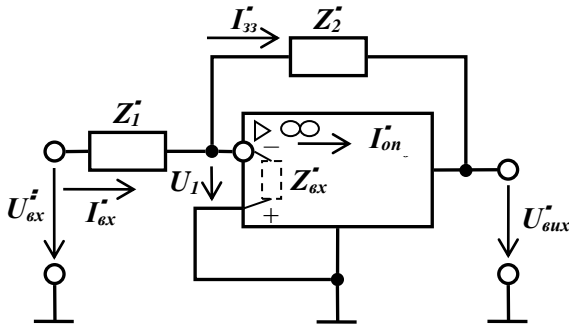


Рис. 4.20.3

Подачею напруги \dot{U}_1 на інвертуючий вхід ОП зумовлений від'ємний характер зворотного зв'язку, так, що $\dot{U}_{вих} = -\dot{K}_0 \dot{U}_1$. Через опори \dot{Z}_1 і \dot{Z}_2 здійснюється від'ємний зворотний зв'язок. Оскільки вхідний опір операційного підсилювача великий (вважаємо, що $\dot{Z}_{вх} \rightarrow \infty$), то вхідний струм операційного підсилювача $\dot{I}_{он} = 0$ і тоді $\dot{I}_{вх} = \dot{I}_{зз}$, звідки

$$\frac{\dot{U}_{вх} - \dot{U}_1}{\dot{Z}_1} = - \frac{\dot{U}_{вих} - \dot{U}_1}{\dot{Z}_2}.$$

Отримаємо напругу на вході $\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{K}_0} \rightarrow 0$, при великому

коефіцієнті підсилення операційного підсилювача ($\dot{K} \rightarrow \infty$)

тому $\frac{\dot{U}_{вх}}{\dot{Z}_1} = - \frac{\dot{U}_{вих}}{\dot{Z}_2}$, звідки $\dot{K}_{\beta-} = - \frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1}$.

1.3.1. Масштабуючий підсилювач

При $Z_1 = R_1$ і $Z_2 = R_2$ вираз для коефіцієнта підсилення набуде вигляду

$$K_{\beta-} = \frac{R_2}{R_1},$$

а підсилювач виконуватиме роль масштабуючого інвертуючого підсилювача, в якого $U_{вих} = -U_{вх} K_{\beta-}$.

Схема підсилювача в цьому випадку буде такою, як зображено на рис. 4.20.4.

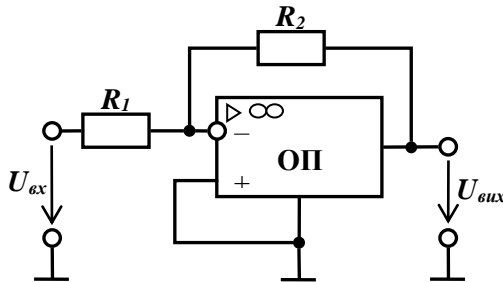


Рис. 4.20.4

1.3.2. Вибірковий підсилювач

Розглянуті вище схеми підсилювачів призначені для підсилення входних сигналів у широкій смузі частот. На практиці (у системах зв'язку, радіо-, телепередачі, в багатьох системах автоматизованого контролю й керування) щоб сигнали інших частот пригнічувалися (не підсилювалися) необхідно підсилювати корисний сигнал однієї частоти. Таку задачу розв'язує вибірковий підсилювач, що є ОП, охоплений частотно-залежним ВЗЗ у вигляді подвійного Т-подібного моста.

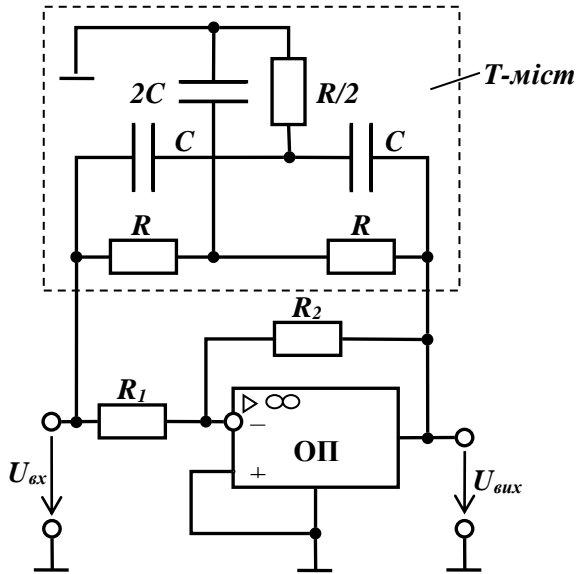


Рис. 4.20.5

Амплітудно-частотна характеристика подвійного Т-подібного моста $\beta = F(f)$ зображена на рис. 4.20.6.

На низьких частотах, коли частота прямує до нуля ($f \rightarrow 0$), коефіцієнт передачі моста $\beta \rightarrow 1$, оскільки опір X_C конденсаторів стає великим і вся напруга $\dot{U}_{вих}$ через "верхній"

одинарний Т-подібний міст ($R, 2C, R$) передається на вхід підсилювача у вигляді напруги зворотного зв'язку $\dot{U}_{зз}$.

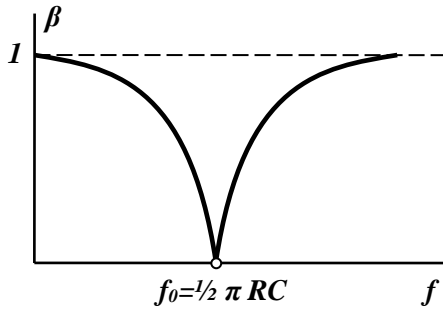


Рис. 4.20.6

На дуже високих частотах ($f \rightarrow \infty$), $\beta \rightarrow 1$ унаслідок того, що опори конденсаторів X_C стають невеликими і вся вихідна напруга через "нижній" Т-подібний міст ($C, \frac{R}{2}, C$) передається на вхід ОП. Коефіцієнт підсилення такого підсилювача визначається як

$$\dot{K}_{\beta-} = \frac{K_0}{1 + K_0 \cdot \beta}.$$

На низьких і високих частотах при $\beta \rightarrow 0$ аналіз цього виразу показує

$$\dot{K}_{\beta-} = \frac{K_0}{1 + K_0} \approx 1,$$

що практично підсилення не відбувається.

На резонансній частоті $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ коефіцієнт передачі моста $\beta \rightarrow 0$ і тоді $\dot{K}_{\beta-} = K_0 \gg 1$, маємо максимальне підсилення.

Амплітудно-частотну характеристику вибіркового підсилювача зображено на рис. 4.20.7. $K_{\beta} = F(f)$

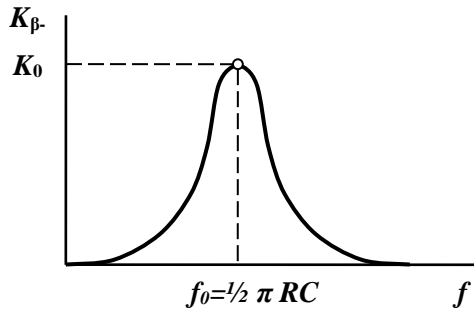


Рис. 4.20.7

Вона побудована з урахуванням виразу для K_{β} та АЧХ Т-подібного моста. Потрібна величина K_0 забезпечується правильним вибором номіналів резисторів R_2 і R_1 , виходячи з того, що $K_0 = \frac{R_2}{R_1}$.

1.4. Операційний підсилювач з ДЗЗ

Для перетворення енергії джерела живлення в енергію електричного сигналу синусоїдної форми необхідної потужності та частоти призначені генератори гармонічних сигналів.

На практиці часто таким генератором є ОП, охоплений глибоким додатним зворотним зв'язком з коефіцієнтом передачі β_+ (рис. 4.20.8).

Для поліпшення форми коливань і стабілізації амплітуди коливань та отримання стійкого режиму автогенерації, що генеруються, часто вводиться від'ємний зворотний зв'язок (β_-).

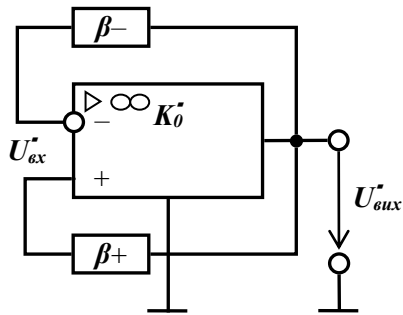


Рис. 4.20.8

Для цієї схеми вхідна і вихідна напруги пов'язані співвідношеннями

$$\begin{aligned} \dot{U}_{вх} &= \dot{\beta}_+ \cdot \dot{U}_{вих}, \\ \dot{U}_{вих} &= \dot{K}_0 \cdot \dot{U}_{вх}. \end{aligned}$$

Звідси:

$$\dot{K}_0 = \dot{\beta}_+ = 1.$$

Виконання в автогенераторі цієї умови забезпечує незгасаючі коливання. Величини \dot{K}_0 і $\dot{\beta}_+$ у рівнянні є комплексними величинами, тому запишемо

$$\dot{K}_0 \cdot e^{j\varphi} \cdot \dot{\beta}_+ \cdot e^{j\psi} = 1,$$

останнє виконується при:

$$K_0 \cdot \beta_+ = 1 \text{ – умова балансу амплітуд,}$$

$$\varphi + \psi = 0 \text{ – умова балансу фаз автогенератора.}$$

Умова балансу фаз означає, що додатний зворотний зв'язок існує в схемі. Умова балансу амплітуд відповідає тому, що енергія, яка втрачається в генераторі за одне коливання, заповнюється енергією від джерела живлення. Виникнення сигналів генератора складної форми, що складаються з великої кількості гармонічних складових забезпечує виконання умов балансу фаз і амплітуд.

Виконання умов балансу фаз і амплітуд тільки для частоти f_0 шляхом вмикання частотно-залежних схем забезпечують для виникнення сигналу генератора потрібної частоти, наприклад моста Віна.

На рис. 4.20.9. наведено приклад виконання автогенератора гармонічних коливань із мостом Віна. Від'ємний незалежний зворотний зв'язок створюється резисторами R_1 і R_2 .

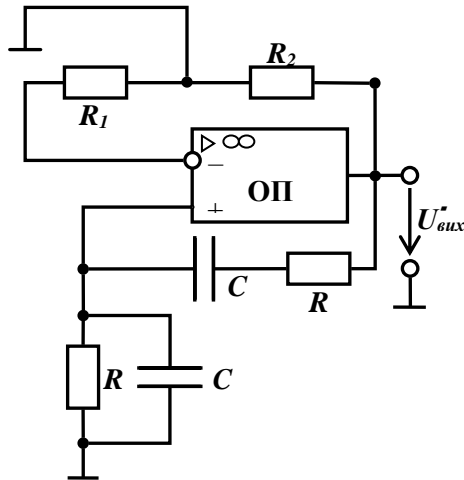


Рис. 4.20.9

Оскільки в колі додатного зворотного зв'язку включений міст Віна, то умови самозбудження генератора виконуються тільки для однієї резонансної частоти $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ (на інших частотах K_0 малий). Отже, виникаючі коливання матимуть гармонічну форму.

2. Практична частина

2.1. Дослід № 1. Операційний підсилювач із від'ємним зворотним зв'язком

$$K_{midc} = 25 \text{ і } K_{midc} = 50$$

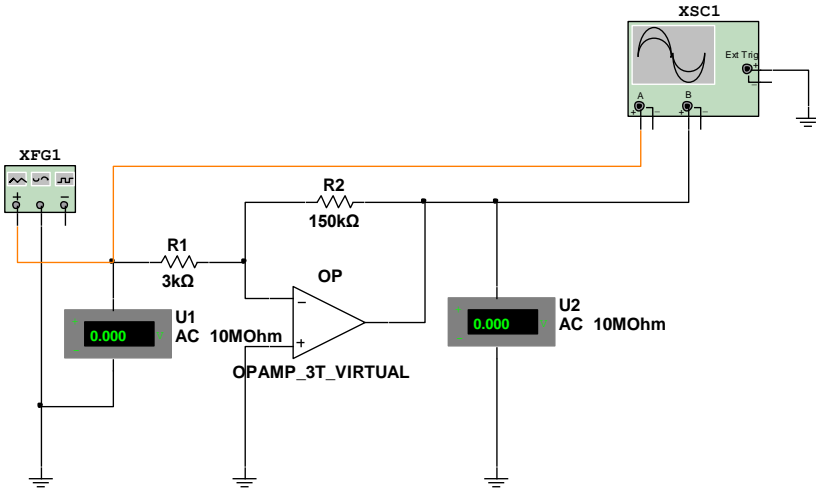


Рис. 4.20.10. Схема проведення дослідів

2.1.1. Зніміть амплітудну характеристику підсилювача $U_{m.вих} = F(U_{m.вх})$, при $f = 1 \text{ кГц}$ і $U_{вх} = 10 \div 1000 \text{ мВ}$.

(Див. методичку зняття амплітудних характеристик).

2.1.2. Зніміть осцилограми вхідних і вихідних напруг на лінійних і нелінійних ділянках амплітудної характеристики підсилювача.

2.1.3. Зніміть амплітудно-частотну характеристику підсилювача. $K_{midc} = F(f)$ при $U_{вх} = 100 \text{ мВ}$ і $f = 0 \div 20 \cdot 10^3 \text{ кГц}$.

(Див. методичку зняття амплітудних характеристик).

2.1.4. Побудуйте амплітудну характеристику підсилювача.

2.1.5. Побудуйте амплітудно-частотну характеристику підсилювача.

2.2. Дослід № 2. Вибірковий підсилювач із від'ємним зворотним зв'язком і подвійним Т-подібним мостом

2.2.1. Зніміть амплітудно-частотну характеристику підсилювача. $K_{midc} = F(f)$ при $U_{ax} = 100$ мВ і $f = 0 \div 20 \cdot 10^3$ кГц.

(Див. методику зняття амплітудних характеристик).

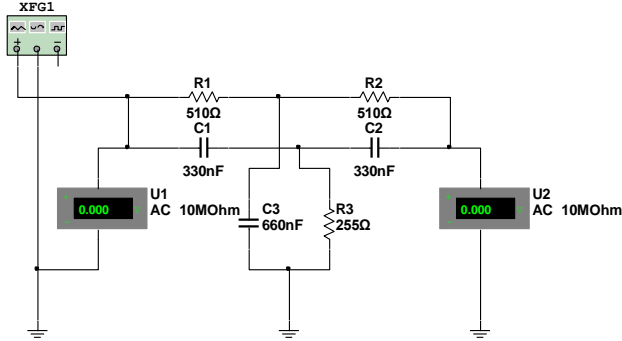


Рис. 4.20.11. Схема проведення дослід

2.2.2. Зніміть амплітудно-частотну характеристику підсилювача. $K_{midc} = F(f)$ при $U_{ax} = 100$ мВ і $f = 0 \div 20 \cdot 10^3$ кГц.

(Див. методику зняття амплітудних характеристик).

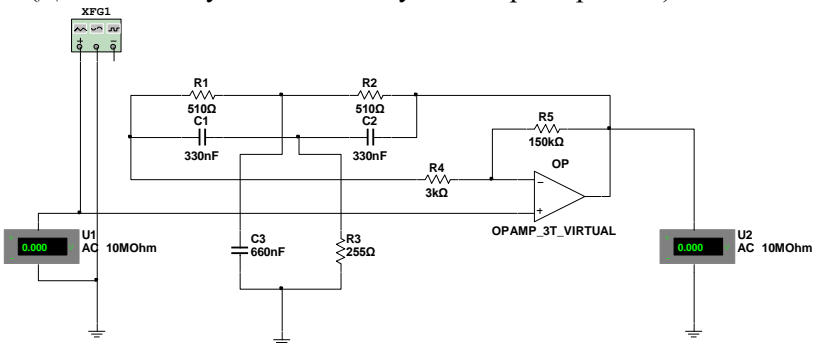


Рис. 4.20.12. Схема проведення дослід

- 2.2.3. Побудуйте амплітудно-частотну характеристику моста.
- 2.2.4. Побудуйте амплітудно-частотну характеристику підсилювача.

2.3. Дослід № 3. Автогенератор RC-типу, з від'ємним зворотним зв'язком, мостом Віна в колі додатнього зворотнього зв'язку і автостабілізацією на стабілітронах

$$K_{n\dot{d}c} = 1,5 .$$

Дослідження проведіть самостійно. Схема проведення досліду зображена на рис. 4.20.13.

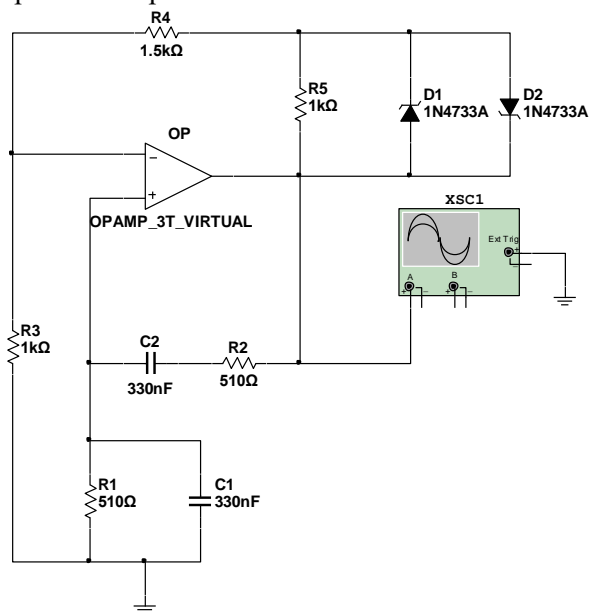




Рис. 4.20.12. Схема проведення досліду

3. Методики проведення дослідів

3.1.Методика зняття амплітудно-частотних характеристик

При знятті амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) підсилювальних пристроїв необхідно при незмінній його амплітуді змінювати частоту вхідного сигналу. Для цього задаємо вхідний сигнал синусоїдної форми відкривши діалогове вікно функціонального генератора.

Встановлюємо далі на вході необхідну амплітуду сигналу (наприклад, *Amplitude 1 mV*) і його частоту (наприклад, *Frequency 5 kHz*). Натиснувши клавішу  або клавішу , вимірюємо сигнали на вході/виході підсилувача за допомогою відповідних вольтметрів. Обчислюємо коефіцієнт підсилення

$$K_{ндс} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$$
 і записуємо в табл. 4.20.1.

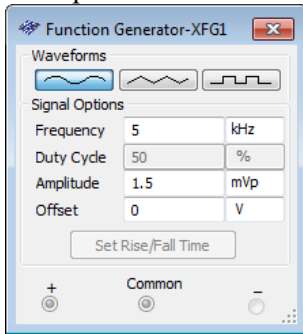
Повторюємо дані вимірювання для різних частот вхідного сигналу, продовжуючи заповнювати табл. 4.20.1.

Таблиця 4.20.1

<i>f, Гц</i>	20	200	$2 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^6$	$50 \cdot 10^6$
<i>K_U</i>								



3.2.Методика зняття амплітудних характеристик

При знятті амплітудних характеристик (АЧХ)



підсилювальних пристроїв необхідно змінювати амплітуду вхідного сигналу при незмінній його частоті. Для цього задаємо вхідний сигнал синусоїдної форми відкривши діалогове вікно функціонального генератора.

Далі встановлюємо необхідну частоту сигналу на вході (наприклад, *Frequency 5 kHz*) і амплітуду сигналу (наприклад, *Amplitude 1.5 mV*).

Натиснувши клавішу  або клавішу , вимірюємо сигнали на вході й виході за допомогою відповідних вольтметрів і записуємо показання в табл. 4.20.2. Для різних амплітуд вхідного сигналу повторюємо дані вимірювання, обчислюємо коефіцієнти підсилення $K_{підс} = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$, заповнюючи табл. 4.20.2.

Таблиця 4.20.2

$U_{вх}, мкВ$	1,5	7,1	14,1	28,3	42,5	56,6
$U_{вих}, мВ$						
K_U						

3.3.Методика роботи з осцилографом

Для отримання кривих напруги в будь-якій точці схеми в програмі *Multisim* використовується осцилограф. Подвійним натисненням лівої кнопки мишки відкриваємо діалогове вікно осцилографа. Осцилограф має два канали: *Channel A* та *Channel B*.

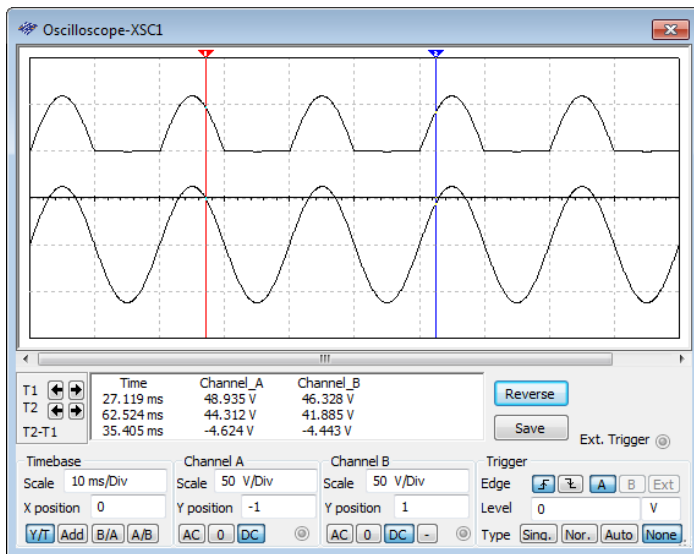


Рис. 4.18.15

Розгортка за часом (Timebase) задається відповідними клавішами. У даному випадку маємо 10 ms/div , тобто 10 мілісекунд на 1 поділку.

По кожному каналу задається окремо вертикальна розгортка. В даному конкретному випадку маємо 50 V/div , тобто 50 вольт на 1 поділку.

На екрані зображено дві криві вхідна і вихідна напруги однопівперіодного випрямляча.

Є дві вертикальні риски на екрані осцилографа, які можна пересувати за допомогою лівої кнопки мишки, встановлюючи цим місце вимірювання. У додатковому вікні з'являються координати зазначених позицій.

У даному конкретному випадку маємо:

	Time	Channel_A	Channel_B
T1	27.119 ms	48.935 V	46.328 V
T2	62.524 ms	44.312 V	41.885 V
T2-T1	35.405 ms	-4.624 V	-4.443 V

Канал **A**, Y positions = -1.00.

Канал **B**, Y positions = -1.00.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке операційний підсилювач, де він застосовується?
2. Що таке зворотний зв'язок? Які види зв'язків ви знаєте?
3. Який підсилювач називається масштабуючим?
4. Що таке вибірковий підсилювач, охоплений частотно-залежним ВЗЗ (накресліть схему)?
5. Поясніть у чому полягає методика зняття амплітудно-частотних характеристик.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ТА ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гумен М.Б. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. Кн.1. Аналіз лінійних електричних кіл. Часова область: підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак. – К.: Вищ. шк., 2003. – 399 с.
2. Віртуальна електронна лабораторія / В.Г. Дейбук, О.В. Деревянчук.- Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2017.-192 с.
3. Гумен М.Б. Основи теорії електричних кіл: У 3 кн. Кн.2. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область: підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак. – К.: Вища шк., 2004. – 352 с.
4. Дейбук В.Г. Теорія електричних кіл для системотехніків : навч. посібник / В.Г. Дейбук. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т., 2011. – 320 с.
5. Желяк Р.І. Комп'ютерна електроніка : навч. посібник / Р.І. Желяк, Б.А. Мандзій, В.М. Якубенко. – Львів: Ліга-Прес, 2005. – 356 с.
6. Основи теорії електронних кіл: підручник /[Ю.Я. Бобало, Б.А. Мандзій, П.Г. Стахів та ін.]. – Львів: Магнолія плюс, 2006. – 296 с.
7. Коруд В.І. Електротехніка : підручник / В.І. Коруд, О.Є. Гамола, С.М. Малинівський. – Львів: Магнолія плюс, 2004. – 447 с.
8. Малинівський С.М. Загальна електротехніка : підручник / С.М. Малинівський. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 586 с.
9. Основы теории цепей : учебник для вузов / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил и др.]. – М.: Энергоатом-изд., 1989. – 528 с.
10. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники : Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Высш.шк., 1984. – 559 с.
11. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC : Т. 1 / В.И.Карлащук. – М.: Солон-Пресс, 2007. – 720 с.

Навчальне видання

Дейбук Віталій Григорович

Дервянчук Олександр Володимирович

Кравченко Ганна Олексієна

ВІРТУАЛЬНИЙ ЕЛЕКТРОННИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Відповідальний за випуск — В.М. Крамар

Літературний редактор — О.В. Колодій