



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства  
та природокористування

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-  
інтегрованих технологій

04-03-242

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних робіт

з навчальної дисципліни «Електротехніка та комп'ютерна  
електроніка. Частина 1. Електротехніка»  
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня  
за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»  
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною  
комісією зі спеціальності 121  
«Інженерія програмного забезпечення».  
Протокол № 7 від 30.08.2019 р.

Рівне – 2019



Національний університет

водного господарства  
та природокористування

Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електротехніка та комп'ютерна електроніка. Частина 1. Електротехніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної та заочної форм навчання / Рудик А. В. – Рівне : НУВГП, 2019. – 84 с.

Укладач: Рудик А. В., д.т.н., доцент, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, академік ІАУ, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

© Рудик А. В., 2019

© НУВГП, 2019



## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Робота 1. Вивчення основних можливостей та принципу роботи програми Electronics Workbench.....	5
Робота 2. Дослідження вольт-амперних характеристик компонентів електричних кіл.....	30
Робота 3. Розрахунок електричних кіл постійного струму за допомогою законів Кірхгофа та методом контурних струмів.....	35
Робота 4. Розрахунок електричних кіл постійного струму за допомогою методів вузлових потенціалів, суперпозиції та еквівалентного генератора.....	39
Робота 5. Дослідження електричних кіл змінного струму.....	44
Робота 6. Дослідження електричних кіл змінного струму з послідовним з'єднанням елементів.....	48
Робота 7. Дослідження електричних кіл змінного струму з паралельним з'єднанням елементів.....	53
Робота 8. Дослідження електричних кіл змінного струму зі змішаним з'єднанням елементів.....	58
Робота 9. Дослідження характеристик трансформатора.....	61
Робота 10. Дослідження часових характеристик чотириполюсника.....	67
Робота 11. Дослідження перехідних процесів в лінійних електричних колах постійного струму.....	74
Робота 12. Дослідження перехідних процесів в лінійних електричних колах змінного струму.....	80
Перелік літератури.....	84



## ВСТУП

Значні зміни в багатьох галузях науки і техніки зумовлено розвитком електротехніки, електроніки та приладобудування. Нині неможливо знайти жодної галузі промисловості, в якій не використовувалися б електронні прилади або пристрої вимірювальної техніки, автоматики та обчислювальної техніки. При цьому тенденція розвитку така, що частка електронних інформаційних пристроїв та пристроїв автоматизації невпинно збільшується. Це є результатом розвитку інтегральної технології, застосування якої дозволило налагодити масовий випуск дешевих, високоякісних мікроелектронних функціональних вузлів різного призначення, які не потребують спеціального налаштування.

Віртуальна лабораторія «Electronics Workbench» (EWB) орієнтована для вивчення дисциплін електротехнічного та електронного напрямків. Віртуальна лабораторія EWB дає добрі можливості проведення досліджень кіл постійного, однофазного і трифазного змінного струму, кіл з несинусоїдними струмами і напругами, вивчення особливостей електричних кіл з нелінійними елементами як в режимі малих сигналів, так і при дії синусоїдальних струмів і напруг. За допомогою віртуальної лабораторії легко вивчаються однофазні трансформатори, частотні і часові параметри чотириполюсників. У кожній роботі приводяться типові запитання, на які студент повинен вміти давати правильні і обґрунтовані відповіді.

Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт містять набір лабораторних, що необхідні для успішного засвоєння курсу «Електротехніка та комп'ютерна електроніка». Всі лабораторні роботи містять мету роботи, основні теоретичні відомості, хід виконання завдання, вказівки до виконання необхідних обчислень. Завдання для самостійного опрацювання не представляють великої складності і потребують мінімального часу на їх вирішення.

Запропоновані лабораторні роботи охоплюють лінійні електричні кола постійного та змінного струму; чотириполюсники та перехідні процеси в лінійних електричних колах. Всі роботи відповідають теоретичному курсу дисципліни та дають змогу практично застосувати набуті знання. Порядок наведеного матеріалу відповідає порядку його викладання на лекційних заняттях, що дозволяє студентам, які пропустили заняття, самостійно засвоїти відповідні розділи курсу.



## Робота 1. Вивчення основних можливостей та принципу роботи програми Electronics Workbench

### 1.1 Мета роботи

Навчитися користуватися програмою Electronics Workbench для виконання лабораторних робіт з дисципліни ТОЕ, а також вивчити її основні можливості моделювання електричних кіл.

### 1.2. Теоретичні відомості

Програма Electronics Workbench призначена для проектування електричних кіл та аналогових і цифрових електронних схем. Особливістю програми є наявність контрольно-вимірювальних приладів, які за зовнішнім виглядом і характеристиками наближені до промислових аналогів. Програма має достатньо простий інтерфейс, що складається з таких опцій:

#### **Меню File**

1. Команди цього меню: *New*, *Open...*, *Save*, *Save as...*, *Print...*, *Print Setup...* – типові для Windows команди роботи з файлами.
2. *Revert to Saved...* – відновлення схеми до виду, що вона мала в момент останнього збереження.
3. *Import...* – перетворення нестандартних файлів схем (розширення .net або .cir) до стандартного виду Electronics Workbench.
4. *Export...* – зберігає файл схеми з одним з наступних розширень: .net, .scr, .cmp, .cir, .plc.
5. *Install...* – установка додаткових компонентів Electronics Workbench із гнучких дисків.

#### **Меню Edit**

1. *Cut*, *Copy*, *Paste*, *Delete*, *Select All* – відповідно стирання, копіювання, вставка та стирання виділеної частини схеми.
2. *Copy as Bitmap* – копіювання растрового зображення елементів в буфер обміну і використання його в текстових процесорах.
3. *Show Clipboard* – показати вміст буфера обміну.

#### **Меню Circuit**

1. *Rotate* – поворот елемента схеми на 90 градусів (проти годинної стрілки).
2. *Flip Horizontal* / *Flip Vertical* – дзеркальне відображення елемента схеми по горизонталі/вертикалі.

3. *Component Properties...* – властивості компонента.

4. *Create Subcircuit* – створення субсхем.

5. *Zoom In, Zoom Out* – збільшення або зменшення рисунка.

6. *Schematic Options* – опції особливостей побудови схеми.

Після вибору цієї опції на екрані з'являється вікно, вигляд якого представлений на рис. 1.1.

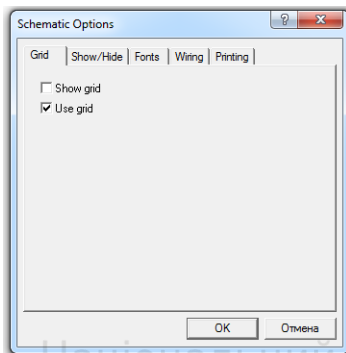


Рис. 1.1. Вікно опції *Schematic Options*

Перша опція – *Grid* – дозволяє виводити на екран сітку. Друга – *Show/Hide* – дозволяє відображати на екрані або ховати ті чи інші складові зображення електричної схеми (назви вузлів чи елементів схеми). Третя – *Fonts* – дозволяє вибирати розміри й тип шрифтів. Четверта – *Wiring* – призначена для вибору ручного або автоматичного трасування з'єднувальних провідників. П'ята опція – *Printing* – задає масштаб виводу схеми на принтер.

### **Меню Analysis**

1. *Activate* – активізувати роботу схеми.

2. *Pause* – пауза.

3. *Stop* – припинення роботи схеми.

4. *Analysis Option* – набір команд для установки параметрів моделювання. Відповідно до рис. 1.2, вікно має 5 опцій, кожна з яких дозволяє задавати необхідні параметри для задач моделювання.

Перша опція – *Global* – дає можливість задавати установки загального типу. Параметри установок мають такі значення:

- *Absolute current tolerance (ABSTOL)* – задає абсолютну похибку розрахунку струмів;

- *Gmin minimum conductance (GMIN)* – мінімальна провідність гілки електричного кола (приймаємо, що менша величина провідності

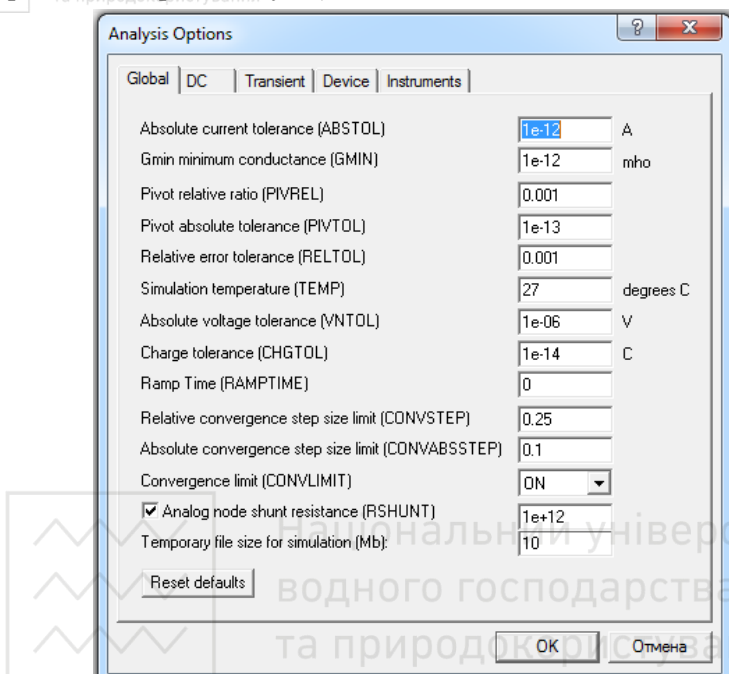


Рис. 1.2. Вікно опції *Analysis Option*

- *Pivot relative ratio* (PIVREL) – відносна величина елемента рядка матриці вузлових провідностей;
- *Pivot absolute tolerance* (PIVTOL) – мінімальна абсолютна величина елемента схеми, яка не сприймається як нуль;
- *Relative error tolerance* (RELTOL) – допустима відносна помилка розрахунку напруг і струмів;
- *Simulation temperature* (TEMP) – температура елементів схеми, при якій виконується моделювання;
- *Absolute voltage tolerance* (VNTOL) – допустима помилка розрахунку напруг у режимі аналізу перехідних процесів (Transient);
- *Charge tolerance* (CHGTOL) – допустима помилка розрахунку зарядів;
- *Ramp Time* (RAMPTIME) – початкова точка підрахунку часу при аналізі перехідних процесів;
- *Relative convergence step size limit* (CONVSTEP) – відносний розмір кроку ітерації при розрахунку режиму по постійному струму;



- *Absolute convergence step size limit (CONVABSSTEP)* – абсолютний розмір кроку ітерації при розрахунку режиму на постійному струмі;

- *Convergence limit (CONLIMIT)* – підключення або відключення допоміжних засобів для забезпечення збігання ітераційного процесу (наприклад, за рахунок використання методу варіації напруг джерел живлення);

- *Analog node shunt resistance (RSHUNT)* – допустиме значення електричних втрат для всіх вузлів електричної схеми відносно загальної шини (заземлення);

- *Temporary file size for simulation (Mb)* – розмір тимчасового файлу для моделювання.

Опція *DC* призначена для установки параметрів електричного кола постійного струму. Вигляд опції представлений на рис. 1.3.

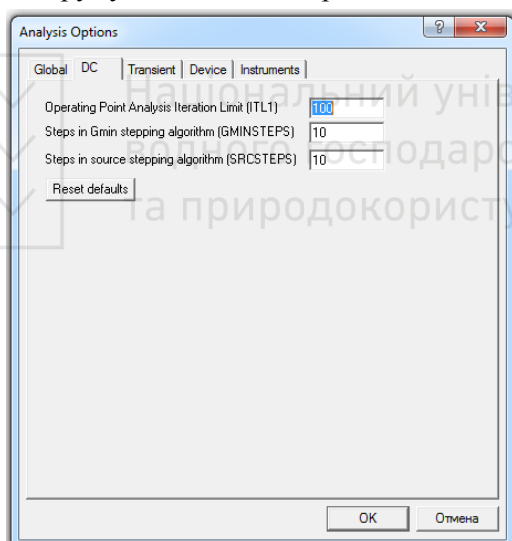


Рис. 1.3. Вікно опції *DC*

*Operating Point Analysis Iteration Limit (ITL1)* – максимальна кількість ітерацій наближених розрахунків.

*Steps in Gmin stepping algorithm (GMINSTEPS)* – розмір приросту провідності у відсотках від *Gmin* (використовується при слабкому збіганні ітераційного процесу).

*Steps in source stepping algorithm (SRCSTEPS)* – розмір приросту напруги у відсотках від його номінального значення при варіації



Національний університет  
водного господарства  
та природокористування

напруги живлення (використовується при слабкому збіганні ітераційного процесу).

Опція *Transient* призначена для установки параметрів під час аналізу перехідних процесів. Її вікно зображене на рис. 1.4.

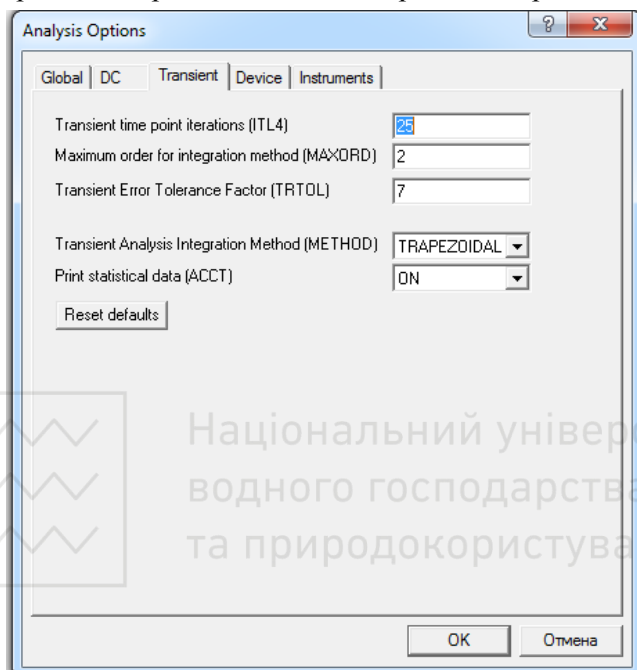


Рис. 1.4. Вікно опції *Transient*

*Transient time point iterations (ITL4)* – максимальна кількість ітерацій за час аналізу перехідних процесів.

*Maximum order for iteration method (MAXORD)* – максимальний порядок (2...6) методу інтегрування диференційного рівняння.

*Transient Error Tolerance Factor (TRTOL)* – допуск на помилку обчислення змінної.

*Transient Analysis Integration Method (METHOD)* – метод наближеного інтегрування диференційного рівняння (використовуються методи трапецій (TRAPEZOIDAL) та Гіра (GEAR)).

*Print statistical data (ACCT)* – дозвіл на друк статистичних даних.

Кнопка *Reset defaults* призначена для повернення до попередніх значень установок, які встановлюються по замовчуванню. Вона використовується в тих випадках, коли з'являється необхідність пове-

рнутись до початкових установок.

Опція *Device* призначена для вибору параметрів МОН-транзисторів.

Опція *Instruments* призначена для установки параметрів вимірних приладів. Вигляд вікна опції представлений на рис. 1.5.

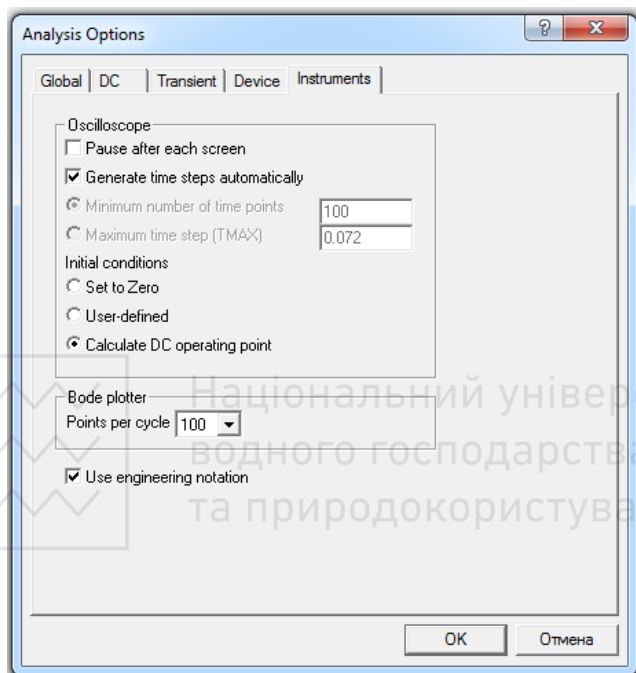


Рис. 1.5. Вікно опції *Instruments*

*Pause after each screen* – пауза (тимчасова зупинка моделювання) після заповнення екрану осцилографа по горизонталі.

*Generate time steps automatically* – автоматична установка часового кроку (інтервалу) виводу інформації на екран.

*Minimum number of time points* – мінімальна кількість точок, які відображаються за період реєстрації.

*Maximum time step (TMAX)* – інтервал часу від початку до кінця моделювання.

*Set to Zero* – установка в нульовий стан контрольно-вимірних приладів перед початком моделювання.

*User-defined* – керування процесом моделювання користувачем (пуск і зупинка).



*Calculate DC operating point* – виконання розрахунку режиму за постійним струмом.

*Points per cycle* – кількість точок, які відображаються при виводі амплітудно-частотних і фазочастотних характеристик (Bode plotter).

*Use engineering notation* – використання інженерної системи позначень одиниць вимірювань (наприклад, напруги будуть виводитись в мілівольтах та ін.).

5. *DC Operating Point* – виконання розрахунків за постійним струмом. При роботі програми EWB у такому режимі із схеми, яку моделюють, виключаються всі конденсатори і закорочуються котушки індуктивності. Для використання такого режиму необхідно позначити всі вузли схеми. Це забезпечується тим, що при використанні команд меню *Analysis* доцільно в меню *Circuit > Schematic option > Show/Hide* включити опції *Show Reference ID* і *Show nodes*. Після вибору опції з'являється вікно *Analysis Graphs*, в якому наводяться номери вузлів та гілок схеми і відповідні значення напруг і струмів.

6. *DC Sweep...* – варіація параметрів джерел при розрахунку режиму за постійним струмом. В задачах електротехніки використання опції, що описується, дозволяє прискорити оцінку диференційного опору нелінійних елементів електричних кіл. Вікно установок планованих коливань напруги представлено на рис. 1.6.

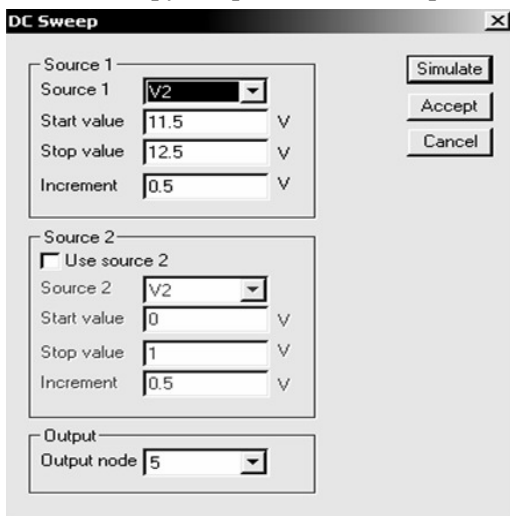


Рис. 1.6. Вікно установок планованих коливань напруги



Для будь-якого з двох джерел встановлюються початкові й кінцеві значення напруги (діапазон коливань). Після установки необхідних параметрів запускається режим аналізу (кнопкою *Simulate*) і на екрані монітора з'являється вікно *Analysis Graph* із графіком залежності абсолютних коливань напруги джерела й коливань напруги від часу в аналізованій точці схеми.

7. *AC Frequency...* – розрахунок частотних характеристик. Виконання аналізу починається з установок у діалоговому вікні *AC Frequency Analysis* (рис. 1.7). Перед початком проведення дослідів встановлюються досліджуваний діапазон частот, тип вертикальної шкали, а також вказуються ті вузли, для яких необхідно виконати обчислення частотних характеристик. Більш детально особливості установок будуть пояснені при проведенні досліджень.

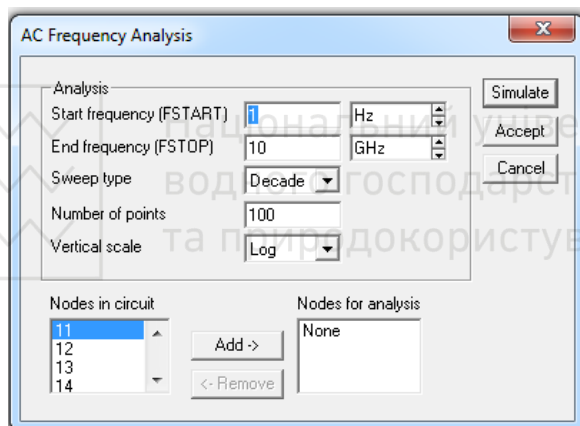


Рис. 1.7. Діалогове вікно *AC Frequency Analysis*

8. *Transient...* – установка параметрів перехідного процесу і його моделювання.

9. *Fourier* – забезпечує проведення гармонічного аналізу напруги в заданих точках.

10. *Noise...* – забезпечує проведення дослідів по оцінці рівня і спектра шумів у відповідних вузлах електричних кіл.

11. *Distortion...* – забезпечує аналіз нелінійних та інтермодуляційних спотворень сигналів в електричних і електронних колах.

12. *Parameter Sweep...* – забезпечує проведення дослідів при варіації параметрів електричних і електронних кіл. Широко використовується при оцінці “грубості” схеми по відношенню до параметрів,



що змінюються. Детально буде описано при вивченні роботи електричних схем.

13. *Temperature Sweep...* – використовується при оцінці впливу температури на роботу електричних та електронних кіл.

14. *Pole-Zero...* – забезпечує розрахунок карти нулів і полюсів передавальної характеристики модельованої схеми.

15. *Transfer Function...* – розрахунок передавальної функції.

16. *Sensitivity...* – розрахунок відносної чутливості характеристик схеми до зміни параметрів вибраного компонента при частотному аналізі або при розрахунках за постійним струмом.

17. *Worst Case...* – забезпечує виконання розрахунків в режимах постійного або змінного струмів при граничних відхиленнях характеристик схеми.

18. *Monte Carlo...* – забезпечує проведення статистичного аналізу схеми за методом Монте-Карло.

19. *Display Graphs* – дозволяє дивитись, регулювати і зберігати графіки та діаграми. Використовується для показу результатів всіх досліджень під час роботи з графіками та діаграмами.

### **Меню Window**

1. *Arrange* – акуратне розташування всіх відкритих вікон.

2. *Circuit* – вивід зображення схеми на передній план.

3. *Description* – відкриття вікна опису схеми. Якщо вікно опису вже відкрито, переносить його на передній план. У вікні опису можна надрукувати коментарі до схеми.

### **Меню Help**

Меню Help містить стислу інформацію про всі розглянуті вище команди, електричні та електронні компоненти, вимірювальні прилади, а також інформацію про саму програму.

Зовнішній вигляд інтерфейсу програми представлено на рис. 1.8.

Особливість моделювання електричних схем за допомогою програмного середовища Electronics Workbench полягає в тому, що для кожного елемента створена математична модель. Кожна модель активізується шляхом виведення її умовного електричного позначення на екран монітора. З'єднання умовних позначень електричних елементів активізує рівняння відповідності струмів у гілках створеної схеми і напруг між вузлами. Таким шляхом створюється математична модель досліджуваної електричної схеми.

Пакет Electronics Workbench має розвинену бібліотеку електрич-



них і електронних компонентів, але у даних методичних вказівках подані лише ті, які потрібні для дослідження електричних схем.

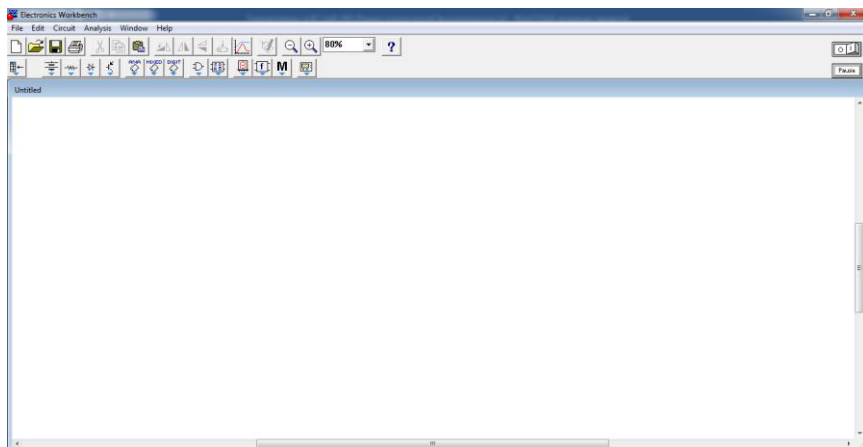


Рис. 1.8. Зовнішній вигляд інтерфейсу програми

### Електричні компоненти Electronics Workbench

Електричні компоненти віртуальної лабораторії вибираються з відповідних бібліотек, які знаходяться в меню компонентів.

Джерела живлення знаходяться в меню *Sources* (рис. 1.9), з якого можна вибрати 23 типи джерел. Основні – це джерела постійної й змінної напруги (рис. 1.10, а), джерела постійного і змінного струму (рис. 1.10, б), а також заземлення (рис. 1.10, в), яке є обов'язковим елементом будь-якої електричної схеми, що досліджується у віртуальній лабораторії.

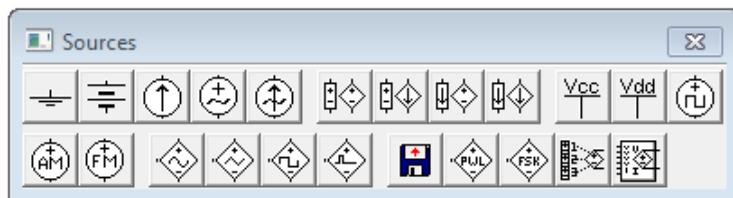


Рис. 1.9. Зовнішній вигляд меню *Sources*

Джерела напруги й струму є ідеальними. Внутрішній опір ідеального джерела напруги дорівнює нулю, тому його вихідна напруга не залежить від навантаження. Ідеальне джерело струму має нескінченно великий внутрішній опір, тому його струм не залежить від



опору навантаження. Встановлення параметрів джерел живлення забезпечується за допомогою опції властивостей даного елемента.

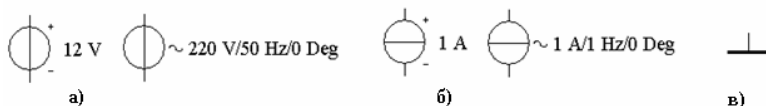


Рис. 1.10. Основні джерела з меню *Sources*

На рис. 1.11 як приклад представлено вікно властивостей джерела змінного струму, яке викликається подвійним натисканням лівої кнопки „миші” і має такі опції:

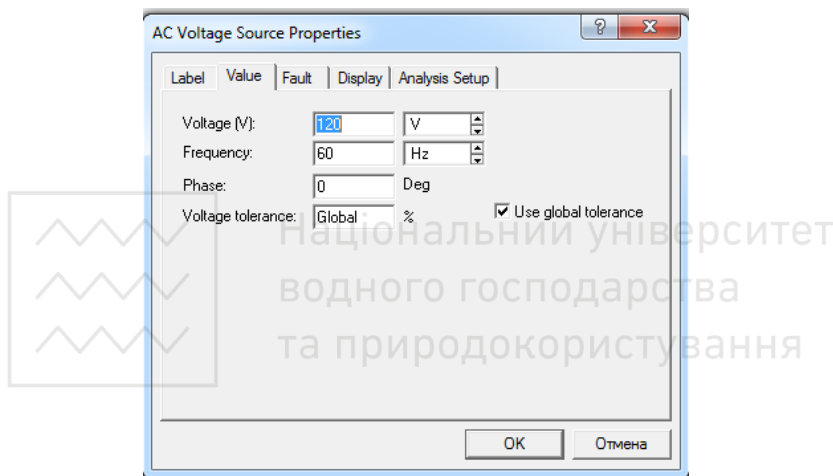


Рис. 1.11. Вікно властивостей джерела змінного струму

- *Label* – умовні позначення елемента схеми, наприклад; E1; E2; U1; U2 та ін.;

- *Value* – електричні параметри (рис. 1.13). Опції цієї вкладки дозволяють встановити величини напруги (*Voltage*), частоти (*Frequency*), фази (*Phase*). Опція *Voltage tolerance* за замовчуванням встановлена в режим глобальних параметрів допустимих відхилень. Параметри цього режиму можна встановити у вікні *Monte Carlo Analysis* (меню *Analysis*, опція *Monte Carlo*). Для встановлення величини відхилення, що необхідна для дослідження, скидається прапорцець опції *Use global tolerance* і вводиться потрібна величина у віконці опції *Voltage tolerance*;

- *Fault* – аварійні параметри. За замовчуванням перемикач встановлено в режим *None*. В тих випадках, коли проводяться дослідження

по усуненню недоліків в електричних схемах, встановлюється один з режимів: *Short* – коротке замикання або *Open* – обрив. Джерело напруги при виборі *Short* буде працювати без змін, оскільки його внутрішній опір близький до нуля. Аналогічно, джерело струму буде нормально працювати при виборі *Open*, оскільки його внутрішній опір достатньо високий;

- *Display* – відображення тих або інших позначень і параметрів джерела. При наявності прапорця при опції *Use Schematic Options global setting* вибір відображення параметрів та умовних позначень забезпечується на глобальних установках. Якщо прапорець скинутий, то його позначення можуть встановлюватись за вибором розробника: *Show labels* (показувати ім'я елемента схеми, що задається розробником у вкладці *Label*), *Show values* (показувати номінальні параметри елемента схеми), *Show reference ID* (показувати ім'я елемента схеми, що задається програмою у вкладці *Label*);

- *Analysis Setup* – установки при використанні джерела в задачах аналізу.

Пасивні компоненти електричних кіл вибираються з меню *Basic* (рис. 1.12). З цього меню (в даному курсі) використовуються такі компоненти, як резистори, конденсатори, котушки індуктивності, а також з'єднуючі вузли (символ з'єднання) (рис. 1.13). Інші елементи електричних схем будуть пояснюватись по ходу використання. Встановлення параметрів пасивних елементів виконується аналогічно, що і параметрів джерел живлення.

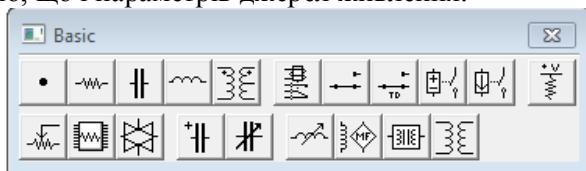


Рис. 1.12. Вікно пасивних компонентів електричних кіл *Basic*

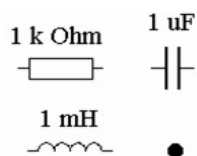


Рис. 1.13. Найпоширеніші пасивні компоненти

Реальні джерела напруги подаються послідовним з'єднанням ідеального джерела і внутрішнього опору джерела, а джерела струму – паралельним з'єднанням ідеального джерела струму і внутрішнього опору джерела.

Вимірювальні прилади вибираються з меню *Indicators* (рис. 1.14, а). З бібліотеки індикаторів найчастіше використовують вольтметр і амперметр, які встановлюються для вимірювання постійних або



змінних напруг і струмів, та електричну лампочку розжарювання (рис. 1.14, б).

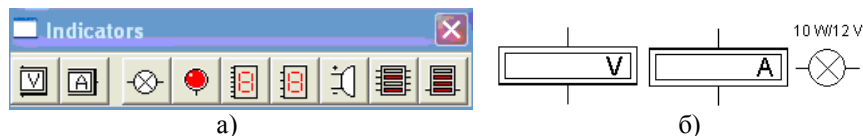


Рис. 1.14. Вікно вимірювальних приладів *Indicators*

Властивості вимірювальних приладів дають можливість, поряд із параметрами струмів і напруг, встановлювати величини внутрішнього опору, задавати аварійні режими, робити відповідні супроводжуючі надписи. При використанні приладів у режимі постійного струму слід звертати увагу, що один бік зображення приладів подано товстою лінією. Цією стороною прилад слід приєднувати до заземлення або до меншого з потенціалів, між якими виконується вимірювання.

Амперметр та вольтметр – прилади з автоматичною зміною діапазону і не потребують налаштування. В одній схемі можна застосовувати кілька таких приладів одночасно для вимірювання струмів і напруг різних елементів електричного кола.

В меню *Instruments* (рис. 1.15) можна знайти універсальний вимірювальний прилад – мультиметр, який можна використовувати для вимірювання напруг і струмів (постійних і змінних) та опору. За допомогою мультиметра можна також виміряти величину затухання сигналу між двома точками електричного кола.

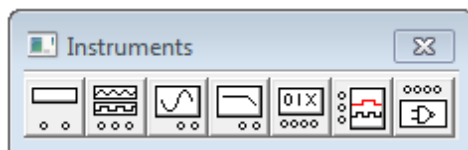


Рис. 1.15. Панель *Instruments* програми *EWB*

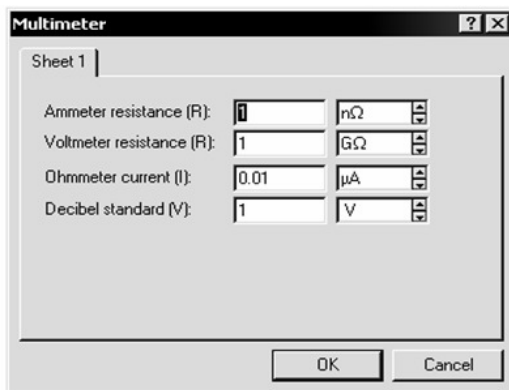
Схематичний вигляд мультиметра представлено на рис. 1.16, а, а збільшений – на рис. 1.16, б. Цей прилад також з автоматичною зміною діапазону вимірювання і не потребує налаштування. При натисканні лівою кнопкою „миші” на відповідних кнопках вибирається параметр, який необхідно виміряти. Кнопка *Settings* відкриває вікно установок мультиметра (рис. 1.16, в), які можна задавати при проведенні дослідів.



а)



б)



в)

Рис. 1.16. Схематичний вигляд мультиметра та вікно його установок

Для дослідження електричних кіл змінного струму програма EWB пропонує використовувати осцилограф. Це зручно для проведення вимірювань напруг, струмів і фазових зсувів між ними. Осцилограф, як і ряд інших складних електронних приладів, знаходиться в меню *Instruments* (рис. 1.15).

Використання осцилографа можливо як для вимірювання напруг постійного струму по відношенню до спільного проводу, так і для вимірювання параметрів напруг змінного струму. Схематичний вигляд осцилографа та схема підключення представлена на рис. 1.17, а його загальний вигляд – на рис. 1.18.

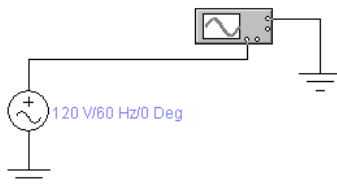


Рис. 1.17. Схематичний вигляд осцилографа та схема його підключення

Двоканальний осцилограф дозволяє виконувати широкий ряд вимірювань, які встановлюються часовими параметрами (*Time base*), порогом і рівнем визначення вимірювального сигналу (*Trigger*), а також рівнем амплітуди вхідного сигналу, що може подаватись на два канали одночасно (канали A та B). Масштаб рівня сигналів встановлюється у вольтах на поділку (V/Div) у вікнах *Channel A* та

**Channel B.** Масштаб горизонтальної розгортки осцилограми встановлюється в секундах на поділку (s/div) у вікні *Time base*. У нижній частині вікна *Time base* осцилографа розміщені три кнопки, які відображають інформацію в часі *Y/T*, або у вигляді фігур Лісажу (*A/B*).

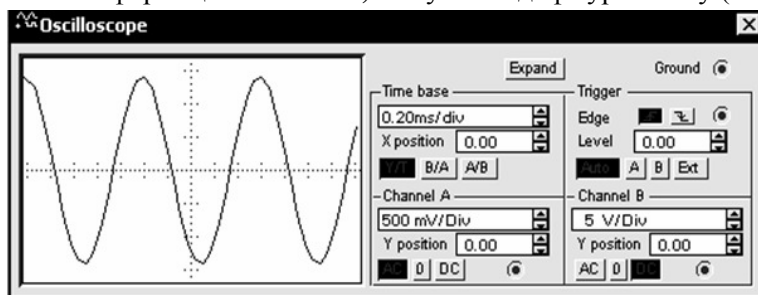


Рис. 1.18. Зовнішній вигляд панелі налаштувань осцилографа

Якщо необхідно уточнити параметри досліджуваних сигналів, то осцилограф можна переключити кнопкою *Expand* у збільшений розмір, який представлений на рис. 1.19.

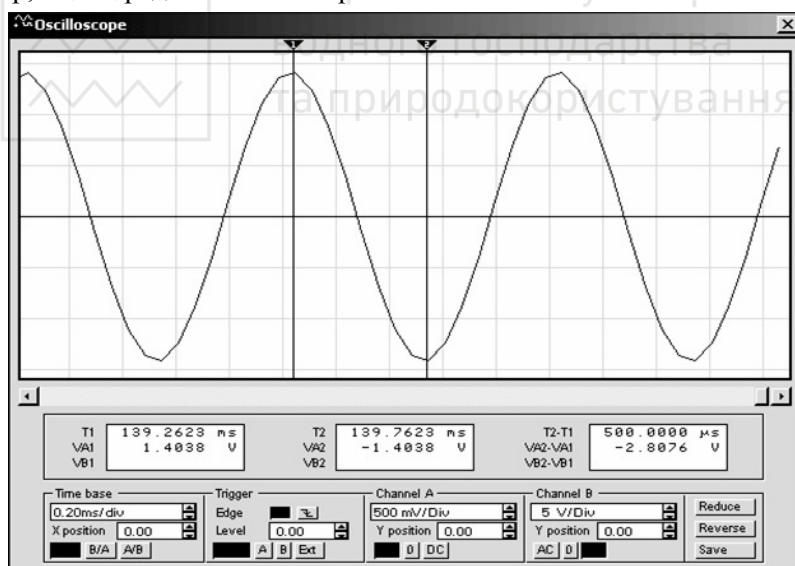


Рис. 1.19. Деталізований вигляд панелі налаштувань осцилографа

Вертикальні лінії курсору ліворуч і праворуч екрану, які переміщуються за допомогою “миші”, дають можливість більш точно визначити амплітуди сигналів і часові співвідношення.



Для того, щоб виміряти, наприклад, амплітуду та період синусоїдального сигналу, потрібно встановити курсори (за допомогою трикутників із позначками 1 і 2) відповідно в позиції максимального і мінімального значення синусоїди. На першому з трьох табло, що розташовані під екраном осцилографа, відображається миттєве значення вхідного сигналу каналу А (1.4038 V), на другому – миттєве значення вхідного сигналу каналу В (-1.4038 V), а на останньому – різниця (по модулю) двох результатів вимірювань (-2.8076 V). На цих табло відображаються також і часові характеристики синусоїди. Так, різниця в часі між позитивною максимальною точкою синусоїди (139.2623) і негативною максимальною (139.7623) дорівнює 500 мкс (третє табло осцилографа) – це половина періоду синусоїди.

Такі вимірювання в EWB виконуються в режимі паузи, яка встановлюється у правому верхньому куті екрану монітора.

Під час проведення дослідів канали осцилографа можна перемикаєти з однієї точки електричного кола до іншої, аналізуючи різні сигнали. При цьому процес моделювання не зупиняється. Не впливає на процес моделювання також і зміна налаштувань осцилографа – масштабу часу чи шкали амплітуд по будь-якому з входів.

Установка кнопки *Y/T* дає можливість керувати масштабом горизонтальної осі в часі. Максимальний масштаб – 1 с/под (1.00 s/div), що відповідає частоті 1 Гц. Якщо, наприклад, потрібно один період сигналу з частотою 1 кГц вмістити в одну поділку горизонтальної осі, то встановлюється масштаб часу 1 мс/под, а для сигналу з частотою 10 кГц масштаб часу має бути 0.1 мс/под (рис. 1.20).

Вертикальна вісь має по три поділки в позитивній і негативній частинах. Тому якщо встановлено масштаб, наприклад, 0.5 В/под, то на екрані осцилографа можна спостерігати зображення сигналу з амплітудним значенням до 1,5 В. Якщо ж амплітудне значення перевищуватиме 1,5 В, то верхня і нижня половини синусоїди будуть виглядати зрізаними і в цьому випадку треба збільшити масштаб. Приблизне обчислення миттєвого значення сигналу виконується шляхом перемноження кількості поділок, яких він досягає, на числове значення масштабу.

Осцилограф та досліджувана схема мають бути заземленими.

### **Побудова електричних схем в середовищі EWB**

Перед тим, як побудувати електричну схему для дослідження в середовищі EWB, потрібно на аркуші паперу підготувати її ескіз із

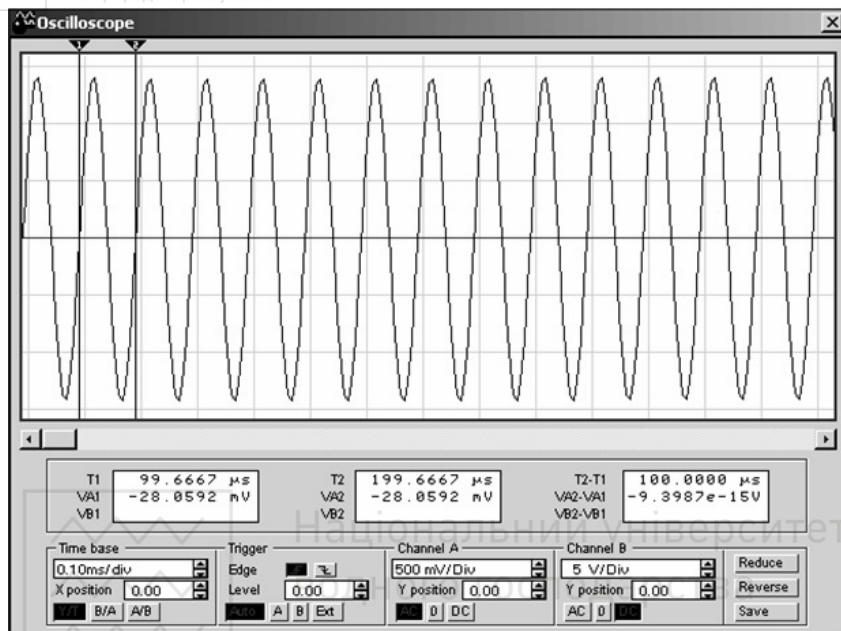


Рис. 1.20. Настроювання осцилографа

Процес побудови схеми починається з розміщення на робочому полі екрану компонентів із бібліотек програми відповідно до підготовленого ескізу. Необхідний для побудови схеми символ (умовне позначення) компонента переноситься з каталогу на робоче поле програми посуванням “миші” за натиснутої лівої кнопки, після чого кнопка відпускається для фіксації символу. Вибраний компонент освітлюється червоним кольором. Кнопками *Rotate*, *Flip horizontal*, *Flip vertical* встановлюється розташування елементів у схемі. Подвійне натиснення кнопки “миші” по умовному зображенні елемента забезпечує виклик вікна для встановлення необхідних параметрів: опору резистора, індуктивності дроселя, ємності конденсатора та ін. (рис. 1.21). Вибір підтверджується натисканням кнопки *Accept* (OK) або клавіші *Enter*. У ході створення схем використовуються лише два перших вікна *Label* і *Value*: перше дозволяє встановлювати літерні й цифрові надписи біля вибраних компонентів, а друге – їхні величини.

Після розміщення компонентів проводиться з'єднання виводів

провідниками. Необхідно враховувати, що до кожного виводу компонента можна приєднати тільки один провідник. З'єднання в електричних схемах виконуються в такій послідовності. Підводиться курсор “миші” до виводу компонента до моменту появи чорної точки (з'єднувального символу). Після цього натискається ліва кнопка “миші” і курсор підводиться або до виводу другого компонента, або до раніше встановленого провідника електричної схеми. Коли з'являється аналогічна з'єднувальна точка, кнопка “миші” відпускається. При цьому з'являється з'єднувальний провідник, колір якого можна змінити. Для цього стрілка “миші” підводиться до провідника і подвійним натисканням лівої кнопки викликається вікно *Wire Properties*, в якому вибирається бажаний колір провідника. Якщо до кольорового провідника приєднується вхід осцилографа, то відповідний промінь буде мати такий самий колір.

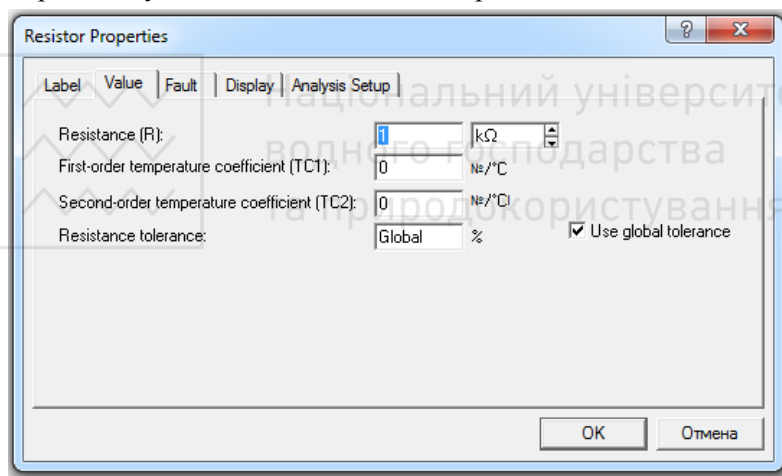


Рис. 1.21. Встановлення необхідних параметрів елементів

Приєднати до побудованої електричної схеми інші компоненти можна за допомогою символу з'єднання, який переноситься на раніше встановлений провідник. До цієї точки з'єднання можна приєднати ще два провідники. Спочатку символ з'єднання буде позначений червоним кольором. За умови переведу його в пасивний стан на ньому може бути видимою лінія з'єднання. Це вказує на відсутність з'єднання в схемі. Тоді слід повторити установку символу. Символ з'єднання може мати умовні позначення (номери) так само, як й інші компоненти електричної схеми.



Відповідні номери, а також назви вузлів (символи з'єднання) встановлюють у вікні *Connector Properties*, яке з'являється на екрані монітора, якщо двічі натиснути ліву кнопку „миші”. За умови використання вкладки *Label* назва вузла встановлюється самим розробником схеми, а якщо використовується вкладка *Node*, то номер вузла встановлюється програмою (при наявності прапорця у вікні *Display node label*). Останній спосіб задавання використовується, якщо номер вузла потрібний для проведення аналізу схеми за допомогою меню *Analysis*.

За необхідності розірвати встановлене з'єднання використовуються два способи. За першим з них до провідника підводиться курсор “миші” і натиском лівою кнопкою провідник виділяється (виділена лінія буде мати подвійну ширину). Після цього правою кнопкою “миші” викликається вікно, в якому необхідно натиснути опцію *Delete*. Другий спосіб полягає в тому, що виконується процедура, зворотна процедурі з'єднання. Курсор “миші” підводиться до одного з виводів електричних компонентів і після появи чорної (з'єднувальної) точки натискається ліва кнопка і курсор відсувається від компонента.

Спосіб забезпечення з'єднань та роз'єднань електричної схеми задається в меню *Circuit / Schematic Options / Wiring*, вікно якого представлено на рис. 1.22.

У віконці *Routing options* – вибір з'єднання, дається на вибір два варіанти розміщення маршруту провідника – ручний (*Manual-route wires*) та автоматичний (*Auto-route wires*). У віконці *Rewiring options* – вибір видалення провідника, також використовуються два варіанти: *Always reroute wires* – завжди видаляти провідник, та *If possible, do not move wires* – по можливості не переміщувати провідники.

Для практичної роботи із схемами важлива наявність прапорця у віконці *Auto-delete connections*, що дозволяє автоматично видаляти точки з'єднання, якщо в них відпала потреба.

Інформаційність побудованої схеми та її якість залежать від опцій, що вибрані в *Circuit / Schematic Options*. На рис. 1.23 представлено вікно *Show / Hide*, яке дозволяє відображати на схемі допоміжну інформацію:

- *Show labels* – показувати присвоєні назви;
- *Show reference ID* – показувати послідовну нумерацію кожного з типів елементів, які використовуються у схемі. Нумерація склада-



ється з букви, що є умовним позначенням типу елемента й цифри і є порядковим номером елемента в схемі;

- *Show models* – показувати модель використовуваного пристрою;
- *Show value* – показувати величини параметрів елементів;
- *Show nodes* – показувати номери вузлів.

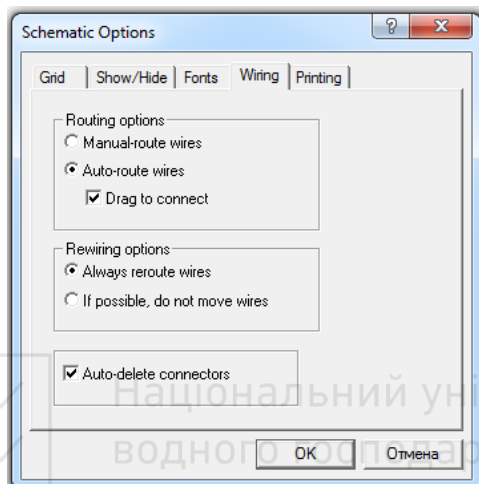


Рис. 1.22. Меню Circuit / Schematic Options / Wiring

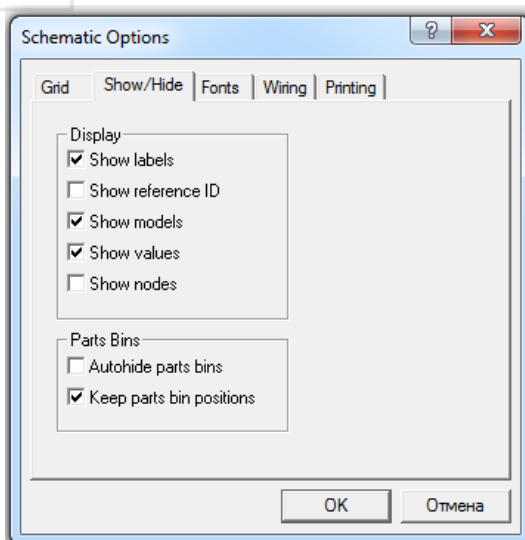


Рис. 1.23. Вікно Show / Hide для відображення на схемі інформації





У вікні *Fonts* встановлюються типи шрифтів для позначення параметрів і величин елементів схеми. Відповідні установки виконуються у вікнах вибору шрифту, що з'являються після натискання кнопок *Set label font* (встановити тип і колір шрифту, що задається вкладкою *Label*) та *Set value font* (встановити тип і колір шрифту, що задається вкладкою *Value*).

Програма EWB дає змогу об'єднати схему електричного кола або її частину в субблок. Для цього потрібно виділити потрібне і або набрати пункт *Subcircuit* меню *Circuit*, або клацнути лівою кнопкою „мишки” по піктограмі *Create Subcircuit*.

З'являється вікно (рис. 1.24). У рядку *Name* потрібно ввести ім'я субблоку, наприклад *W*, а потім натиснути одну з чотирьох кнопок: *Copy from Circuit* (скопіювати зі схеми), *Move from Circuit* (вилучити зі схеми), *Replace in Circuit* (замінити в схемі), *Cancel* (відмінити). Якщо натиснути на кнопку *Copy from Circuit*, то схема залишиться без змін, а в полі компонент *Favorites* з'явиться субблок з привласненням йому ім'ям. Якщо натиснути на кнопку *Move from Circuit*, виділена ділянка кола відокремитися від схеми і розміститися у вікні з ім'ям, присвоєним субблоку. В полі компонент *Favorites* з'явиться субблок з привласненням йому ім'ям. Якщо натиснути кнопку *Replace in Circuit*, то виділена ділянка кола заміниться субблоком.

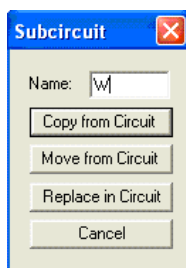


Рис. 1.24. Вікно *Subcircuit*

У EWB ватметр відсутній, але є можливість побудувати його модель за допомогою такої компоненти програми EWB, як помножувач (меню *Controls*), якщо на його входи *X* і *Y* подати напруги, пропорційні відповідно напрузі та струму.

Для того, щоб розв'язати входи ватметра, напруги на помножувач потрібно подати через залежні джерела: джерело напруги, кероване напругою, та джерело напруги, кероване струмом (рис. 1.25). Напруга на виході помножувача буде пропорційна потужності і мо-



же бути виміряна вольтметром в режимі постійного струму. Аналогічно виконуються вимірювання і в колах синусоїдального струму.

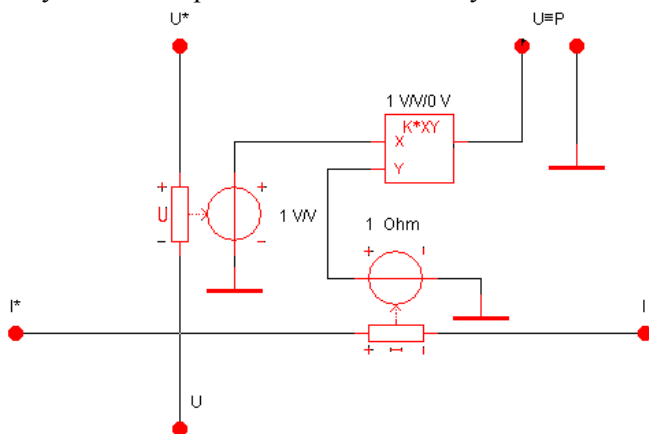




Рис. 1.25. Структура побудови ватметра

### 1.3. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму *EWB*.
2. На панелі контрольно-вимірювальних приладів (*Instruments*) вибрати осцилограф  та розташувати його на робочому полі.
3. Встановити режим однократної розгортки – “*Pause after each screen*”.
4. Підключити джерело імпульсів  (бібліотека компонентів *Sources*) з параметрами за замовчуванням 50%, 1 кГц, 5 В.

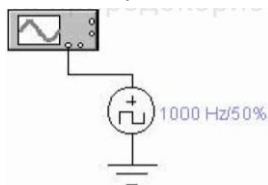


Рис. 1.26. Схема для вимірювання параметрів імпульсних сигналів

5. Виміряти амплітуду та період імпульсів та обчислити шпаруватість імпульсної послідовності  $q = T/t_i$ . Осцилограф включити в режим однократної розгортки Y/T, синхронізація Auto, вхід DC.

6. Виміряти тривалість фронту та спаду (зрізу) імпульсів. Результати вимірювань занести до таблиці 1.1.



Зазвичай при проходженні через електричні кола форма імпульсів спотворюється, що проявляється у сповільненні наростання і спаду імпульсів та спаду плоскої вершини (рис. 1.27).

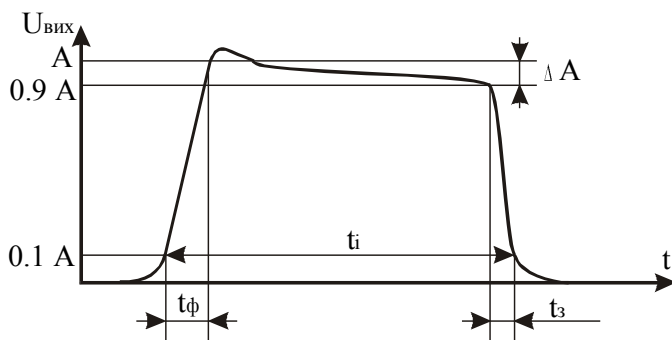


Рис. 1.27. Параметри реальних прямокутних імпульсів

Реальні прямокутні імпульси характеризуються такими основними параметрами:

- амплітудою імпульсу  $A$ ;
- тривалістю імпульсу  $t_i$ , яка визначається на основі графіка імпульсу, як це показано на рис. 1.27, або за умови, що амплітуда більша за  $0.1 \cdot A_m$ ;
- тривалістю фронту імпульсу  $t_\phi$ , яка дорівнює часу наростання імпульсу від  $0.1A$  до  $A$ ;
- тривалістю заднього фронту або зрізу імпульсу  $t_z$ , рівному часу спаду імпульсу від  $0.9A$  до  $0.1A$ ;
- спадом вершини імпульсу  $\Delta A$ .

Таблиця 1.1. Результати вимірювання параметрів імпульсних сигналів

Період $T$ , мс	1	2	0.5	0.25
Амплітуда $A$ , В				
Тривалість імпульсу $t_i$ , мкс				
Шпаруватість $q$				
Тривалість фронту $t_\phi$ , мкс				
Тривалість спаду (зрізу) $t_z$ , мкс				

7. Скласти електричне коло, до складу якого входять джерело прямокутних імпульсів та інтегрувальне RC-коло. До входу кола підключити канал А осцилографа, а до виходу – канал В осцилог-



рафа (рис. 1.28).

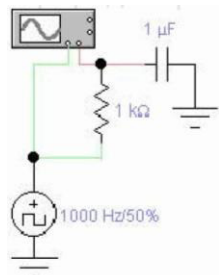



Рис. 1.28. Схема для вимірювання параметрів інтегрувального кола

8. Отримати осцилограми вихідного сигналу інтегрувального кола та за ними визначити тривалість імпульсів, період імпульсної послідовності та тривалість фронту. Отримані результати занести до таблиці 1.2.

Таблиця 1.1. Результати вимірювання параметрів вихідного сигналу інтегрувального кола

Період $T$ , мс	1	2	0.5	0.25
Тривалість імпульсу $t_i$ , мкс				
Тривалість фронту $t_f$ , мкс				

9. Замінити джерело прямокутних імпульсів на джерело синусоїдальних коливань  з параметрами 5 В, 1 кГц.

10. Визначити амплітуду входного та вихідного сигналів, коефіцієнт передачі кола на вибраній частоті, а також внесений колом фазовий зсув. Отримані результати занести до таблиці 1.3.

Таблиця 1.3. Результати вимірювання параметрів інтегрувального кола

Амплітуда входного сигналу, В	1	2	3	5
Амплітуда вихідного сигналу, В				
Коефіцієнт передачі кола				
Фазовий зсув, градуси				

11. Перейти з режиму синхронізації Auto до режиму А та потім до режиму В. Зберегти та пояснити отримані осцилограми.

12. Перейти в режим розгортки осцилографа В/А. Зберегти отриману картинку та пояснити результат.

13. Переключити входи осцилографа в режим АС. Перейти в ре-



жим безперервної розгортки (виключити прапорець “Pause after each screen”), Y/T, синхронізація Auto. Спостерігати за вихідним сигналом протягом декількох циклів розгортки. Пояснити результати спостережень. Чому осцилограма вхідного сигналу не змінюється, хоча обидва входи осцилографа використовуються в одному режимі AC?

14. Повторити пункти 8...12 на частоті генератора 2 кГц.

15. Замінити інтегрувальне коло найпростішим випрямлячем (рис. 1.29). Використовувати режим однократної розгортки – “Pause after each screen”.

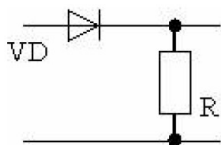


Рис. 1.29. Схема найпростішого випрямляча

16. Зберегти осцилограми, визначити максимальну напругу на виході під час позитивної та негативної півхвиль вхідної напруги.

#### 1.4. Зміст звіту

1. Тема, мета роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Результати розрахунків, досліджувані схеми, таблиці з результатами вимірювань.
4. Графіки знятих характеристик, осцилограми напруг.
5. Висновки.

#### 1.5. Контрольні запитання

1. Що являє собою програма Electronics Workbench?
2. Пояснити можливості бібліотеки електричних і електронних пристроїв програми EWB.
3. Пояснити технологію побудови експериментальних моделей електричних схем в середовищі EWB та установки параметрів їх компонент.
4. Якими засобами вимірювання укомплектована програма EWB?
5. Яким чином виміряти величину струму в гілці електричного кола?
6. Яким чином виміряти величину спаду напруги на ділянці електричного кола?



7. Яким чином вимірюється потужність в електричних колах постійного і змінного струмів в середовищі EWB?

8. Пояснити, як виміряти амплітуду та частоту синусоїдального сигналу за допомогою осцилографа.

9. Яким чином вибираються параметри електрорадіоелементів в середовищі EWB?

10. Охарактеризуйте типи розгортки осцилографа.

11. Пояснити відмінності між режимами AC та DC при спостереженні сигналів на екрані осцилографа.

12. Пояснити хід променів осцилографа в режимі Y/T.

13. Пояснити хід променів осцилографа в режимі V/A.

14. Пояснити хід променів осцилографа в режимі A/V.

15. Яким чином встановлюється швидкість розгортки осцилографа?

16. Чим відрізняється вигляд екрану осцилографа в номінальному та Expand режимах?

17. Пояснити принцип вимірювання часових інтервалів на екрані осцилографа (період імпульсів, частоту сигналів, тривалості фронту та спаду імпульсів, тривалість паузи між імпульсами та ін.).

18. Що таке шпаруватість імпульсної послідовності та коефіцієнт заповнення?

19. Як виміряти амплітуду гармонічного або імпульсного сигналу за екраном осцилографа?

20. Чому під час негативної півхвилі гармонічної напруги на вході найпростішого випрямляча на виході залишається деяка напруга (хоча діод закритий), а під час позитивної півхвилі гармонічної напруги вихідна напруга завжди менше вхідної?

## **Робота 2. Дослідження вольт-амперних характеристик компонентів електричних кіл**

### **2.1 Мета роботи**

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

### **2.2. Основні теоретичні відомості**

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) електричного приладу називається залежність між струмом, що протікає через прилад, і



напругою, яка виділяється на його виводах. Для пасивних компонентів ВАХ визначається за законом Ома

$$U = I \cdot R$$

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

Для джерел постійної напруги ВАХ визначається рівнянням

$$U = E - I \cdot r,$$

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

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

$$I = J - U \cdot g,$$

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

Попередні формули справедливі і для електричних кіл змінного струму.

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

При використанні в електричних схемах резисторів слід мати на увазі, що номінальний опір резистора справедливий тільки для температури 20°C. Якщо схема працює в середовищі з іншою температурою, використовується коригувальний коефіцієнт – температурний коефіцієнт опору (ТКО), який береться з довідникової літератури. Дійсний опір резистора при деякій температурі можна обчислити за такою формулою:

$$R_T = R_0 \cdot \left[ +TC1 \cdot (T_2 - T_H) + TC2 \cdot (T_2 - T_H)^2 \right]$$

де  $R_0$  – опір резистора при температурі 20°C;  $T_H$  – номінальна температура резистора (20° C);  $T_2$  – робоча температура резистора;  $TC1$ ,  $TC2$  – відповідно лінійний та квадратичний температурні коефіцієнти (на 1 градус Цельсія).



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

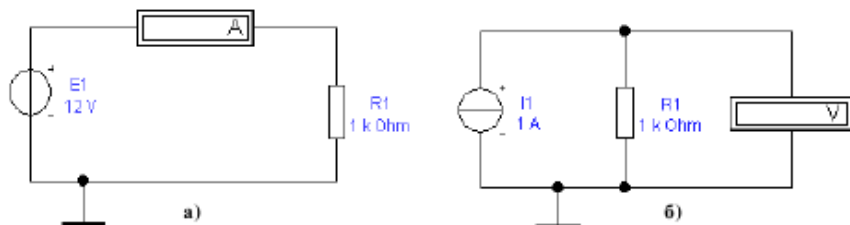


Рис. 2.1. Схеми для дослідження ВАХ резисторів

Для проведення дослідів щодо визначення ВАХ реальних джерел живлення перш за все необхідно створити такі реальні джерела. Для цього послідовно з джерелом ЕРС встановлюється активний опір ( $r_1$ ) величина якого має бути доволі малою. Вона задається відповідно до варіанту. Паралельно з джерелом струму необхідно встановити значний опір ( $r_2$ ), величина якого буде визначати внутрішній опір джерела струму. Схеми, які використовуються для проведення вимірювань з метою побудови ВАХ реальних джерел струму і напруги, представлені на рис. 2.2, а, б.

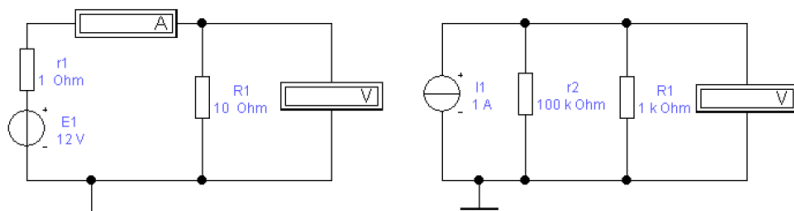


Рис. 2.2. Схеми для дослідження ВАХ реальних джерел струму і напруги

### 2.3. Порядок виконання роботи

1. Використовуючи схему, представлену на рис. 2.1, провести вимірювання для побудови ВАХ резисторів. Експериментальна ВАХ





заміряється при температурі 27°C (номінальний режим роботи резистора в EWB).

2. Встановити відповідно до варіанту лінійний коефіцієнт температурної залежності TC1 і знову провести заміри в тих же точках. Перед тим, як ввести температурний коефіцієнт, треба встановити температуру, при якій працюватиме резистор (у вікні *Resistor Properties* вибрати вкладку *Analysis Setup*, зняти прапорець *Use global temperature* та встановити температуру за варіантом).

3. Встановити квадратичний коефіцієнт температурної залежності TC2 і повторити проведений дослід.

4. Побудувати ВАХ ідеальних джерел живлення.

5. Побудувати схеми за рис. 2.2 і, відповідно варіанта таблиці 2.1, встановити параметри електричного кола. Виконуючи заміри мінімум для 5 точок, побудувати ВАХ реального джерела напруги. Повторити дослід для послідовного з'єднання двох джерел напруги ( $E_1-r_1 - E_2-r_1$ ).

6. Провести аналогічний дослід для заданих параметрів реального джерела струму і навантаження. Повторити дослід для паралельного з'єднання двох джерел струму ( $I_1-r_2 - I_2-r_2$ ).

7. Розробити схеми і провести дослід для визначення еквівалентного опору при паралельному та послідовному з'єднанні резисторів (опори резисторів взяти з таблиці 2.1 –  $R_{1a}$  та  $R_{1b}$ ).

Таблиця 2.1. Таблиця варіантів до схем на рис. 2.1 та рис. 2.2

Номер варіанту	TC1	TC2	T, град.	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$r_1$ , Ом	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$r_2$ , кОм	$R_{1a}$ , Ом	$R_{1b}$ , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>1</b>	0.1	0.3	25	12	200	1	100	700	10	12	100
<b>2</b>	0.2	0.25	30	24	100	1	200	800	15	30	200
<b>3</b>	0.1	0.26	24	36	150	2	300	900	18	60	300
<b>4</b>	0.05	0.23	31	30	170	1	380	700	5	50	350
<b>5</b>	0.15	0.3	23	20	190	1	500	800	5.5	40	50
<b>6</b>	0.18	0.29	32	20	180	1	500	900	7	40	250
<b>7</b>	0.3	0.1	22	25	300	1	130	700	16	80	150
<b>8</b>	0.21	0.2	33	15	120	1	220	800	19	60	200
<b>9</b>	0.22	0.1	21	10	150	2	360	900	11	65	400
<b>10</b>	0.23	0.1	34	30	170	1	350	700	6	34	280
<b>11</b>	0.14	0.18	26	32	180	1.1	210	650	8	22	330

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
11	0.12	0.28	23	14	120	1.2	150	500	6	15	100
12	0.14	0.26	25	18	140	1.3	200	550	7	20	120
13	0.16	0.24	29	22	160	1.4	250	600	8	25	140
14	0.18	0.22	31	26	180	1.5	300	650	9	30	160
15	0.2	0.18	33	30	200	1.6	350	700	10	35	180
16	0.22	0.2	35	34	220	1.7	400	750	11	40	200
17	0.21	0.16	37	40	240	1.8	450	800	12	45	220
18	0.19	0.14	39	44	260	1.9	500	850	13	50	240
19	0.17	0.12	41	48	280	2	475	900	14	55	260
20	0.15	0.1	43	52	300	1.9	425	950	15	60	280
21	0.13	0.27	24	56	320	1.8	375	875	16	65	300
22	0.11	0.25	30	60	340	1.7	325	825	17	70	320
23	0.09	0.23	32	38	360	1.6	275	775	18	75	340
24	0.24	0.21	34	32	380	1.5	225	725	19	80	360
25	0.25	0.19	36	28	400	1.4	175	675	20	85	380

#### 2.4. Вимоги до звіту

1. Побудувати ВАХ резистора.
2. Побудувати графік залежності опору резистора від температури навколишнього середовища.
3. Побудувати ВАХ ідеальних і реальних джерел живлення.
4. Привести і обґрунтувати розроблені схеми для вимірювання еквівалентних параметрів резисторів. Порівняти експериментальні результати з результатами обчислень.
5. У звіті необхідно представити схеми, таблиці і графіки проведених досліджень.

#### 2.5. Контрольні запитання

1. Пояснити різницю між джерелом ЕРС і джерелом струму.
2. Пояснити різницю між ідеальними і реальними джерелами ЕРС та струму.
3. Обґрунтувати способи знаходження еквівалентного опору резистора, ємності конденсаторів, величини індуктивності дроселів при їх послідовному і паралельному з'єднанні.
4. Пояснити, що таке температурний коефіцієнт опору резистора.
5. Пояснити причини температурної залежності опорів. Чи можуть коефіцієнти температурної залежності мати від'ємні значення.



## **Робота 3. Розрахунок електричних кіл постійного струму за допомогою законів Кірхгофа та методом контурних струмів**

### **3.1. Мета роботи**

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

### **3.2. Теоретичні відомості**

Електричні кола діляться на нерозгалужені та розгалужені. Головними складовими електричного кола є вітка та вузол. Вітка – це ділянка кола, яка утворена послідовно з'єднаними елементами, що розміщується між двома вузлами. Вузол – це точка кола, в якій збігається не менше трьох віток.

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

Другий закон Кірхгофа – алгебраїчна сума спадів напруг на резисторах досліджуваного контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС цього контуру.

При складанні рівнянь відповідно до другого закону Кірхгофа спочатку задають напрямки обходу контурів і напрямки протікання струмів у вітках кола. Після цього використовують таке правило: при обході контуру складові беруть із знаком (+), якщо напрямки струму чи ЕРС співпадають із напрямком обходу, і зі знаком (-), якщо напрямки протилежні.

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

За допомогою законів Кірхгофа можна розрахувати будь-яке електричне коло. Але у випадку складних розгалужених кіл потрібно розв'язувати дуже громіздку систему рівнянь. Спростити розрахунки можна за допомогою методу контурних струмів. Суть методу



1. Вводиться поняття про контурні струми, що є умовними та замикаються лише на своїх незалежних контурах.

2. Контурні струми зв'язуються аналітично зі справжніми струмами у вітках.

3. Складається система рівнянь за другим законом Кірхгофа для контурних струмів. Кількість контурних струмів значно менша, ніж справжніх, тож зменшується і кількість рівнянь у системі.

4. Розв'язується система рівнянь і визначаються контурні струми.

5. За допомогою аналітичних залежностей визначаються дійсні струми елементів кола.

Для виконання лабораторної роботи використовується узагальнена електрична схема, представлена на рис. 3.1.

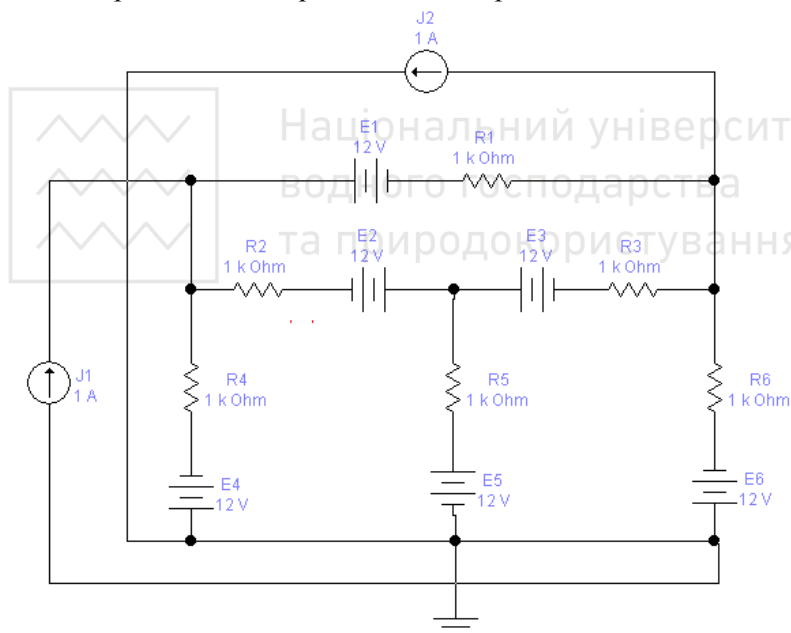


Рис. 3.1. Узагальнена електрична схема для виконання лабораторної роботи №3

Варіанти для виконання роботи представлені в таблиці 3.1. В кожному варіанті наявні 4 джерела ЕРС і одне джерело струму. Величина струму джерела – 1 А. Для непарних варіантів в схемі залишається джерело струму  $J_1$ , а для парних – джерело струму  $J_2$  (вітка



### 3.3. Порядок виконання роботи

1. Проаналізувати схему, представлену на рис. 3.1, і спростити її, виходячи із заданого варіанту.

2. Встановити засоби вимірювання, необхідні для проведення вимірювань струму в гілках електричного кола.

3. Встановити необхідні величини ЕРС джерел живлення і джерела струму з врахуванням їх полярності.

4. Встановити величини опорів відповідно до заданого варіанту.

Таблиця 3.1. Таблиця варіантів до схеми рис. 3.1

№ вар.	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В	$E_4$ , В	$E_5$ , В	$E_6$ , В	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом
1	-	15	45	65	56	-	34	78	44	24	10	16
2	-	-	62	34	13	19	26	36	23	66	98	3
3	36	-	-	87	55	10	89	34	28	39	37	20
4	20	32	-	-	12	77	36	33	56	98	28	46
5	88	12	15	-	-	31	27	38	30	27	25	10
6	21	34	45	26	-	-	25	18	32	77	93	12
7	-	36	43	79	-	94	27	35	19	44	89	35
8	10	-	15	-	24	34	24	28	54	37	11	75
9	32	17	-	25	-	40	28	31	42	61	23	35
10	14	10	20	-	38	-	31	35	47	55	30	44
11	-	13	-	30	36	50	34	39	52	49	37	53
12	16	-	24	35	-	47	37	43	57	43	44	62
13	18	16	-	40	34	-	40	47	62	37	51	71
14	-	19	28	45	32	-	43	51	67	31	58	80
15	-	-	32	50	30	44	46	55	72	25	65	89
16	20	-	-	55	28	41	49	59	77	19	72	98
17	-	22	36	-	26	38	52	63	82	13	79	87
18	22	25	-	-	24	35	55	67	87	23	71	76
19	24	28	40	-	-	32	58	62	83	33	63	65
20	26	31	44	60	-	-	61	57	79	43	55	54
21	28	-	48	65	22	-	64	52	75	53	47	43
22	30	-	52	70	-	29	67	47	71	63	39	32
23	32	34	-	75	20	-	70	42	67	51	31	21
24	-	37	56	-	18	26	73	36	63	45	23	10
25	34	40	-	80	-	23	76	32	59	37	15	47



5. Включити електричну схему і провести вимірювання струмів і напруг, записавши їх значення в підготовлену таблицю.

6. Використовуючи рівняння Кірхгофа провести розрахунок струмів у вітках досліджуваної схеми.

7. Провести аналогічні розрахунки за методом контурних струмів.

8. Порівняти результати вимірювань з проведеними розрахунками і зробити висновки.

### **3.4. Вимоги до звіту**

1. Навести електричну схему досліджуваного кола та результати експериментальних досліджень.

2. Провести розрахунки струмів та напруг в електричному колі згідно варіанту вказаними методами (методом на основі рівнянь Кірхгофа та методом контурних струмів).

3. Навести порівняльну таблицю експериментальних і розрахункових результатів.

4. Розробити програму і виконати розрахунки з використанням персонального комп'ютера.

5. Зробити висновки по роботі.

### **3.5. Контрольні запитання**

1. Сформулюйте перший закон Кірхгофа для кіл постійного струму.

2. Сформулюйте другий закон Кірхгофа для кіл постійного струму.

3. Запропонуйте альтернативні назви першому та другому законам Кірхгофа.

4. Дайте пояснення особливостям використання рівнянь Кірхгофа для розрахунку електричних кіл постійного струму.

5. Поясніть особливості використання методу контурних струмів для розрахунку електричних кіл постійного струму.

6. Сформулюйте закон Ома для ділянки електричного кола.

7. Сформулюйте закон Ома для замкненого електричного кола (ділянки електричного кола з ЕРС).



## **Робота 4. Розрахунок електричних кіл постійного струму за допомогою методів вузлових потенціалів, суперпозиції та еквівалентного генератора**

### **4.1. Мета роботи**

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

### **4.2. Теоретичні відомості**

Струм будь-якої вітки можна знайти з використанням закону Ома для ділянки кола, але для цього необхідно знати потенціали всіх вузлів. Метод, в якому за невідомі змінні, які необхідно знайти, беруться потенціали вузлів, називається методом вузлових потенціалів. Для використання цього методу необхідно прийняти потенціал одного з вузлів як відомий. Краще за все потенціал вибраного вузла прийняти за нульовий. Подальші розрахунки базуються на використанні першого закону Кірхгофа і закону Ома.

Якщо коло має кілька джерел живлення, то для обчислення цих струмів і напруг в цих колах використовується метод суперпозиції (метод накладання). Метод складається з таких кроків:

1. Складне коло замінюється кількома колами, кожне з яких має одне джерело в елементарному колі, інші замінюються опорами, що дорівнюють внутрішнім опорам джерел.
2. Обчислюються елементарні кола, визначаючи величини та напрями струмів у кожній вітці.
3. Після розрахунку кожного кола підсумковий струм знаходиться як алгебраїчна сума струмів від кожного джерела.

Метод еквівалентного генератора базується на тому, що частину схеми, що не представляє інтересу при розрахунках, крім тої, що розглядається, незалежно від кількості пасивних і активних елементів, можна замінити одним активним і одним пасивним елементом (еквівалентним генератором). Основою методу є теорема про активний двополусник: *будь-яке багатоелементне коло, до якого приєднана пасивна або активна вітка, може бути замінено еквівалентним двоелементним двополусником з параметрами  $E_{ек}$ ,  $R_{ек}$  або  $I_{ек}$ ,  $g_{ек}$ . Режим досліджуваної вітки, що приєднана до двополусника, при цьому не зміниться.* Для визначення ЕРС та опору скористаємось режимами холостого ходу та короткого замикання для джере-



## ла напруги.

Послідовність розрахунку:

1. Складаємо еквівалентну схему. Коло розділимо на дві частини: вітка, в якій потрібно визначити струм (зовнішня частина) та все останнє коло (внутрішня частина).

За теоремою про еквівалентний генератор всю внутрішню частину можна замінити одним джерелом енергії з ЕРС  $E_{ек}$  та опором  $R_{ек}$ .

Еквівалентна схема є послідовним з'єднанням елементів вітки, в якій необхідно визначити струм, та еквівалентного джерела ЕРС  $E_e$  з внутрішнім опором  $R_e$ .

2. Обчислюємо параметри еквівалентного генератора. ЕРС еквівалентного генератора  $E_e$  дорівнює напрузі на клеммах внутрішньої частини кола  $U_{xx}$  при відімкненій зовнішній частині кола.

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

4. Струм у вітці визначаємо за формулою:

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

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

Вивчення методів суперпозиції та еквівалентного генератора проводиться з використанням схеми, представленій на рис. 4.2. Вихідні дані для виконання роботи згідно варіантів представлені в таблицях 3.1 (рис. 4.1, а), 4.1 (рис. 4.1, б) та 4.2 (рис. 4.2).

### 4.3. Порядок виконання роботи

1. Проаналізувати схему, представлену на рис. 4.1, а або рис. 4.1, б та спростити її, виходячи з умов вибраного варіанту.

2. Підключити засоби вимірювання, необхідні для проведення вимірювань потенціалів у вузлах розрахункової схеми.

3. Встановити необхідні величини ЕРС джерел з врахуванням їх полярності.

4. Встановити величини опорів відповідно до вибраного варіанту.

5. Включити електричну схему і виконати відповідні вимірювання напруг, записавши їх значення в підготовлену таблицю.

6. Використовуючи рівняння, складені відповідно до закону Ома,



виконати розрахунки струмів у вітках досліджуваної схеми.

7. Встановити необхідну кількість вольтметрів і амперметрів у досліджувану схему для проведення необхідних вимірювань.

8. Включити схему і виконати необхідні вимірювання. Виконати розрахунки відповідно до Вашого варіанту. Отримані результати порівняти з експериментальними даними.

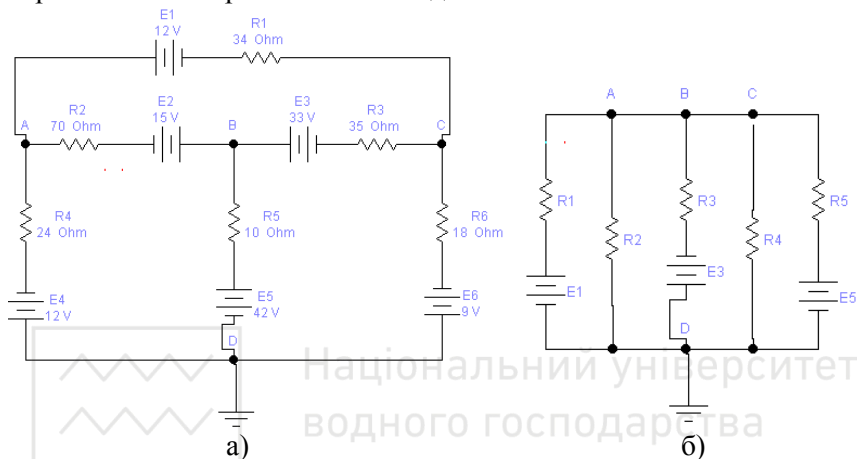


Рис. 4.1. Електричні схеми для вивчення методу вузлових потенціалів

9. Скласти схему, представлену на рис. 4.2, і встановити параметри компонентів відповідно до варіанту.

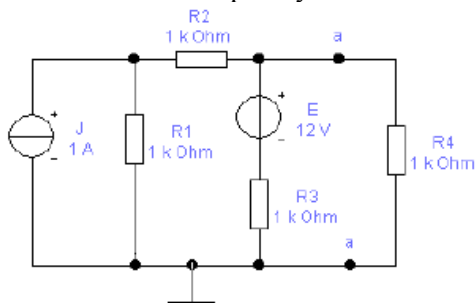


Рис. 4.2. Електрична схема для вивчення методів суперпозиції та еквівалентного генератора

10. Встановити в контрольні вітки вимірювальні прилади і виконати вимірювання струмів при дії обох джерел живлення.

11. Відключаючи по черзі спочатку одне, а потім друге джерело

живлення, і виконати вимірювання струмів у контрольних вітках.

12. Для контрольних точок **а-а**, використовуючи методи холостого ходу і короткого замикання, знайти еквівалентну ЕРС і внутрішній опір та зобразити схему у вигляді активного двополюсника.

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

Таблиця 4.1. Таблиця варіантів до схеми рис. 4.1, б

Номер варіанту	$E_1$ , В	$E_3$ , В	$E_5$ , В	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом
1	12	45	56	34	78	44	24	10
2	24	62	13	26	36	23	66	98
3	36	24	55	89	34	28	39	37
4	20	48	12	36	33	56	98	28
5	88	15	48	27	38	30	27	25
6	21	45	12	25	18	32	77	93
7	12	43	24	27	35	19	44	89
8	10	15	24	24	28	54	37	11
9	32	24	12	28	31	42	61	23
10	14	20	38	31	35	47	55	30
11	18	9	36	34	39	52	49	37
12	16	24	48	37	43	57	43	44
13	18	9	34	40	47	62	37	51
14	12	28	32	43	51	67	31	58
15	18	32	30	46	55	72	25	65
16	20	12	28	49	59	77	19	72
17	15	36	26	52	63	82	13	79
18	22	48	24	55	67	87	23	71
19	24	40	12	58	62	83	33	63
20	26	44	9	61	57	79	43	55
21	28	48	22	64	52	75	53	47
22	30	52	18	67	47	71	63	39
23	32	12	20	70	42	67	51	31
24	9	56	18	73	36	63	45	23
25	34	9	24	76	32	59	37	15

#### 4.4. Вимоги до звіту

1. Привести електричні схеми, дослідження яких проводились в лабораторній роботі.



2. Привести результати експериментальних досліджень.

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

Таблиця 4.2. Таблиця варіантів до схеми рис. 4.2

Номер варіанту	J, А	E, В	R <sub>1</sub> , Ом	R <sub>2</sub> , Ом	R <sub>3</sub> , Ом	R <sub>4</sub> , Ом
1	1	45	34	78	44	24
2	2	62	26	36	23	66
3	3	24	89	34	28	39
4	4	48	36	33	56	98
5	5	15	27	38	30	27
6	6	45	25	18	32	77
7	7	43	27	35	19	44
8	8	15	24	28	54	37
9	7	24	28	31	42	61
10	6	20	31	35	47	55
11	5	18	34	39	52	49
12	4	24	37	43	57	43
13	3	9	40	47	62	37
14	2	28	43	51	67	31
15	1	32	46	55	72	25
16	2	12	49	59	77	19
17	3	36	52	63	82	13
18	4	48	55	67	87	23
19	5	40	58	62	83	33
20	6	44	61	57	79	43
21	7	48	64	52	75	53
22	8	52	67	47	71	63
23	7	12	70	42	67	51
24	6	56	73	36	63	45
25	5	24	76	32	59	37

#### 4.5. Контрольні запитання

1. Поясніть принцип теореми про еквівалентний генератор.
2. Які допоміжні змінні використовуються в методі вузлових потенціалів. Як складаються рівняння згідно даного методу?
3. Поясніть суть методу накладання. Яка його інша назва?



## Робота 5. Дослідження електричних кіл змінного струму

### 5.1. Мета роботи

Вивчення особливостей електричних кіл з джерелами змінного струму, а саме: особливостей вимірювання амплітудних і діючих значень напруг і струмів, їх частоти й фазового зсуву між двома сигналами з використанням осцилографа; особливостей послідовного з'єднання джерел напруги й паралельного з'єднання джерел струму з різними початковими фазами; особливостей вимірювання потужності в колах змінного струму з активним і реактивним навантаженнями.

### 5.2. Теоретичні відомості

Синусоїдальний сигнал  $U(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  є функцією часу з початковою фазою  $\varphi$ , амплітудою  $U_m$  та кутовою частотою  $\omega$ , що вимірюється в рад/с і пов'язана з періодом синусоїдальних коливань  $T$  формулою  $\omega = 2\pi/T$ . Кількість періодів за одну секунду – це частота коливань, яка вимірюється в герцах:  $f = 1/T$ .

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

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

Струм в колі з активним опором, увімкнутим на синусоїдальну напругу, є синусоїдальним та збігається з напругою за фазою. Під час вмикання індуктивності в синусоїдальне коло струм залишається синусоїдальним і відстає від напруги на  $90^\circ$ . Під час вмикання ємності на синусоїдальну напругу у колі встановлюється синусоїдальний струм, що випереджає напругу на  $90^\circ$ .

Віртуальна лабораторія EWB має можливості продемонструвати особливості роботи електричних кіл змінного струму. Джерела змінного струму й напруги знаходяться в меню **Sources**. У вікні **AC Voltage Source Properties** є можливості для встановлення амплітуд напруг і струмів, їх частот, а також початкових фаз. Вимірювання цих параметрів повністю може бути забезпечено за допомогою осцилографа, а діючі значення напруги і струмів можна вимірювати

цифровими амперметром і вольтметром. Для вимірювання потужності необхідно використовувати помножувач (**Multiplier**) двох сигналів, який вибирається з меню **Controls**. Особливості використання помножувача можна вибрати з **Help**, а відповідні схеми з помножувачем будуть запропоновані дещо пізніше.

### 5.3. Порядок виконання роботи

1. Скласти схему відповідно до рис. 5.1 та встановити напругу й частоту відповідно до варіанту (таблиця 5.1). За допомогою осцилографа виміряти амплітуду й частоту напруги. Встановити фазу напруги  $90^\circ$  і виміряти її за допомогою осцилографа. Осцилограми додати до звіту.

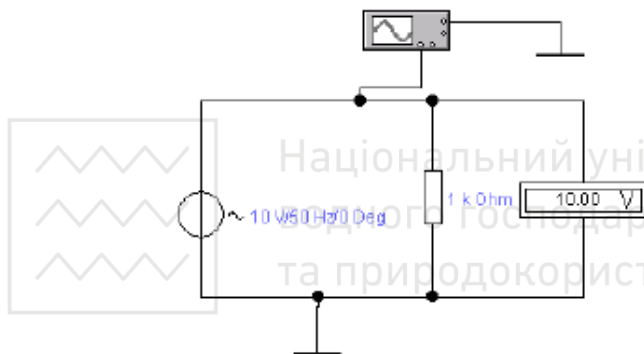


Рис. 5.1. Електрична схема для вимірювання параметрів змінної напруги

2. Встановити послідовно два джерела напруги із заданими амплітудами ( $U_{m1}$  та  $U_{m2}$ ) і фазами ( $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ ). За допомогою осцилографа виміряти кут фазового зсуву між підсумковою напругою й напругою заземленого джерела, а також напругу підсумкового джерела. Побудувати векторну діаграму для визначення підсумкової напруги і її кута фазового зсуву. Зняті осцилограми додати до звіту з лабораторної роботи.

3. Визначення часової діаграми потужності, що виділяється на активному опорі. Побудувати схему з використанням помножувача (рис. 5.2). Записати амплітудні значення напруги і струму, що знімаються з помножувача.

4. Схема, що представлена на рис. 5.3, дає можливість визначити часові діаграми потужності, що виділяється на котушці індуктивно-



сті. Резистор з опором 1 Ом призначений для отримання осцилограми струму, оскільки його величина значно менша, ніж індуктивний опір котушки. За допомогою схеми, представлені на рис. 5.3, необхідно визначити фазові співвідношення між напругою, прикладеною до котушки індуктивності, та струмом, що протікає через неї.

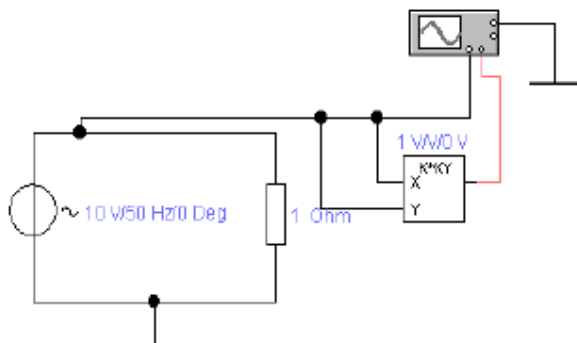


Рис. 5.2. Електрична схема для визначення часової діаграми потужності, що виділяється на активному опорі

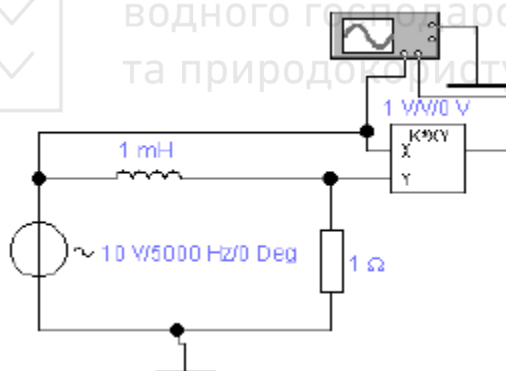


Рис. 5.3. Електрична схема для визначення часової діаграми потужності, що виділяється на котушці індуктивності

5. Замінивши у схемі на рис. 5.3 індуктивність на конденсатор з ємністю 1 мкФ, встановити фазові співвідношення між струмом і напругою на ємнісному навантаженні, а також отримати осцилограму потужності, що циркулює в колі з конденсатором.

#### 5.4. Вимоги до звіту

1. Детально описати способи вимірювання амплітуди, частоти і



початкової фази синусоїдального сигналу й різниці фаз між двома сигналами за допомогою осцилографа. Привести відповідні осцилограми.

2. Привести векторні діаграми для визначення підсумкової напруги і її кута фазового зсуву.

3. Привести часові діаграми потужності, що виділяється на активному опорі, на котушці індуктивності та на конденсаторі.

Таблиця 5.1. Таблиця варіантів до схеми рис. 5.1 – рис. 5.3

Номер варіанту	Рис. 5.1						Рис. 5.2, Рис. 5.3
	U, В	F, Гц	U <sub>m1</sub> , В	U <sub>m2</sub> , В	φ <sub>1</sub> , град.	φ <sub>2</sub> , град.	U, В
1	5	500	3	2	10	100	4
2	10	450	6	4	20	120	6
3	15	400	9	6	30	140	8
4	20	350	12	8	40	160	10
5	25	300	15	10	50	180	12
6	30	250	18	12	60	200	14
7	35	200	21	14	70	220	16
8	40	150	24	16	80	240	18
9	45	100	27	18	90	260	20
10	50	50	30	20	100	280	22
11	55	550	33	22	110	300	24
12	60	600	36	24	120	320	26
13	65	1000	39	26	130	340	28
14	70	950	42	28	140	0	30
15	75	900	45	30	150	20	32
16	80	850	48	32	160	40	34
17	85	800	51	34	170	60	36
18	90	750	54	36	180	80	38
19	80	700	57	38	190	100	40
20	70	650	60	40	200	120	42
21	60	1100	40	42	210	140	44
22	50	1200	35	44	220	160	46
23	40	1300	30	25	230	180	48
24	30	1400	25	20	240	200	50
25	20	1500	12	15	250	220	52



## 5.5. Контрольні запитання

1. Дати пояснення основних параметрів електричного сигналу: амплітуди, частоти, початкової фази.
2. Пояснити, як виконувались вимірювання амплітуди, частоти, початкової фази та різниці фаз.
3. Пояснити фізичну сутність потужності та її складових (активної та реактивної (індуктивної, ємнісної)), а також особливості фазових співвідношень між ними.

## Робота 6. Дослідження електричних кіл змінного струму з послідовним з'єднанням елементів

### 6.1. Мета роботи

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

### 6.2. Теоретичні відомості

При послідовному з'єднанні резистора, конденсатора та котушки індуктивності миттєве значення та комплексна напруга в електричному колі буде дорівнювати:

$$u = u_R + u_L + u_C;$$

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

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

$$\dot{U}_R = \dot{I} \cdot R; \quad \dot{U}_L = \dot{I} \cdot i\omega L; \quad \dot{U}_C = \dot{I} \cdot \left(-i \frac{1}{\omega C}\right).$$

або

$$\dot{U}_R = \dot{I} \cdot R; \quad \dot{U}_L = iX_L \dot{I}; \quad \dot{U}_C = -iX_C \dot{I}.$$

Це дає можливість рівняння напруг при послідовному з'єднанні записати таким чином:

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot \left( R + iX_L - iX_C \right) = \dot{I} \cdot \dot{Z},$$





$$\dot{Z} = R + i(X_L - X_C)$$

називається еквівалентним комплексним опором кола і визначається як сума комплексних опорів, що складають коло.

Повний опір кола має такий вигляд:

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

Уявна складова  $X = X_L - X_C$  називається реактивним опором, який в залежності від величин  $X_L$  та  $X_C$  може носити індуктивний  $X_L > X_C$  чи ємнісний  $X_L < X_C$  характер або мати нульове значення  $X_L = X_C$ . За умови  $X_L = X_C$  має місце явище резонансу напруг. В цьому випадку можна записати:

$$X_L - X_C = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad \text{або} \quad \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad \text{звідки} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

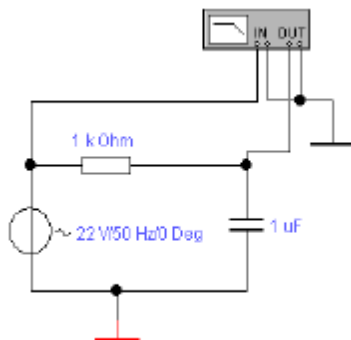
Кутова частота  $\omega_0$  називається резонансною кутовою частотою. Кут зсуву фаз між напругою та силою струму при резонансі дорівнює нулю, оскільки  $\cos \varphi = 1$ .

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

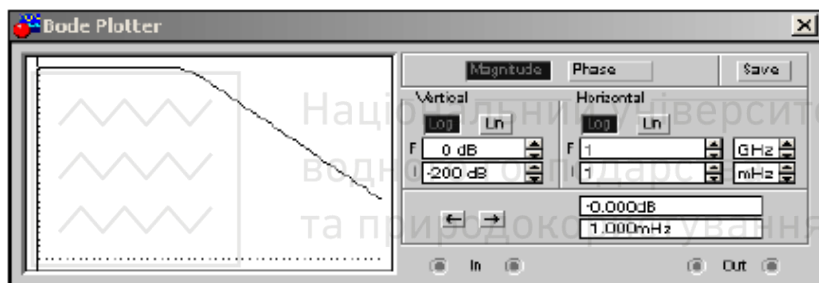
Для виконання лабораторної роботи використовується спеціальний віртуальний прилад, який називається **Bode plotter** (графопобудовник) і призначений для отримання амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик електричних схем. Він вимірює відношення амплітуд сигналів у двох точках схеми і фазовий зсув між ними. Прилад генерує власний спектр частот, діапазон яких можна задавати під час налаштування приладу. Частота змінного джерела в досліджуваній схемі ігнорується, однак схема має містити функціональний генератор або джерело змінного струму.



Bode plotter вибирається в меню **Instruments**, а схема його вмика-  
ння для проведення аналізу та робоче вікно представлені на рис. 6.1,  
а, б.



а)



б)

Рис. 6.1. Схема вмикання Bode plotter для проведення аналізу (а)  
та його робоче вікно (б)

Інструментальна панель плотера включає в себе кнопки з таким  
призначенням:

- *Magnitude* – вимірювання АЧХ (натиснута за замовчуванням);
- *Phase* – вимірювання фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами чотириполіусника (ФЧХ);
- *Vertical* – установка масштабу й типу вертикальної осі частотної характеристики. Можна встановлювати логарифмічний масштаб кнопкою *Log* або лінійний кнопкою *Lin*. Тут встановлюються початкове значення осі ординат I (initial) і кінцеве – F (final), що дає можливість встановити весь діапазон зміни параметрів по осі ординат. Призначення кнопки *Horizontal* повністю повторює попередню.

Вікно з кнопками призначене для точного визначення амплітуд і частот ЛАЧХ або ЛФЧХ, таких як частоти зрізу (зламу), резонансних частот та інше. При натисканні на горизонтальні стрілки по ві-



кн) зображення відповідної частотної характеристики буде переміщуватись вертикальна вісь, а її точки перетину з відповідною частотною характеристикою будуть зображатись у вікні, розміщеному праворуч.

### 6.3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло з послідовно з'єднаних джерела змінної напруги, котушки індуктивності та активного опору з параметрами, що задаються відповідно до варіанту в таблиці 6.1. Виміряти напруги і струм за допомогою електронних приладів, а також зняти осцилограми напруг за допомогою осцилографа.

2. Повторити попередній дослід, однак котушку індуктивності замінити конденсатором і провести аналогічні вимірювання.

3. Провести дослід з послідовним з'єднанням конденсатора, котушки індуктивності та активного опору з джерелом напруги (рис. 6.2). Виміряти і записати напруги й струм елементів схеми, а також зняти осцилограми.

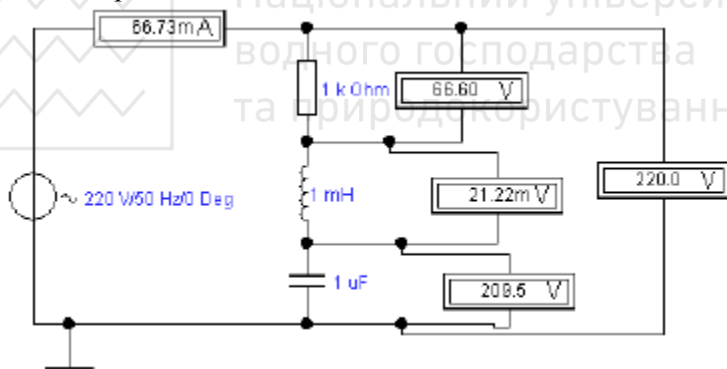


Рис. 6.2. Схема для дослідження послідовного з'єднання конденсатора, котушки індуктивності та активного опору

4. Провести дослід по встановленню залежності напруги на реактивних елементах в режимі резонансу від величини активного опору в послідовному електричному колі. Методологію проведення дослідів розробити самостійно і обґрунтувати у звіті.

5. Повторити дослід п.4 при тій самій резонансній частоті, але збільшивши величину індуктивності котушки в 10 разів.

6. Повторити дослід п.3, замінивши в схемі джерело напруги джерелом струму.

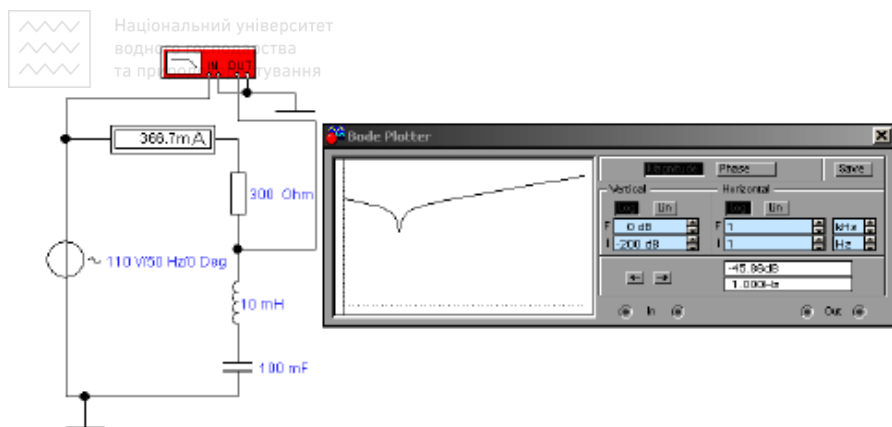


Рис. 6.3. Схема для дослідження послідовного резонансного контуру

Таблиця 6.1. Таблиця варіантів до роботи 6

Номер варіанту	E, В	F, Гц	Φ, град.	I, А	R, Ом	L, Гн	C, мкФ
1	5	50	10	0.1	5	0.1	94
2	10	80	20	0.2	10	0.11	90
3	15	110	30	0.3	15	0.12	86
4	20	140	40	0.4	20	0.13	82
5	25	170	50	0.5	25	0.14	78
6	30	200	60	0.6	30	0.15	74
7	35	230	70	0.7	35	0.16	70
8	40	260	80	0.8	40	0.17	66
9	45	290	90	0.9	45	0.18	62
10	50	320	100	1	50	0.19	58
11	55	350	110	1.1	55	0.2	54
12	60	380	120	1.2	60	0.21	50
13	65	410	130	1.3	65	0.22	46
14	70	440	140	1.4	70	0.23	42
15	75	470	150	1.5	75	0.24	38
16	80	500	160	1.6	80	0.25	34
17	85	530	170	1.7	85	0.26	30
18	90	560	180	1.8	90	0.27	26
19	95	590	190	1.9	95	0.28	22
20	100	620	200	2	100	0.29	18
21	105	650	210	2.1	105	0.3	14
22	110	680	220	2.2	110	0.31	10



## 6.4. Вимоги до звіту

1. Виконати розрахунки напруги і струму в електричному колі для кожного з проведених дослідів.
2. Побудувати векторні і часові діаграми та порівняти результати експериментальних даних із розрахунковими.
3. Обчислити резонансну частоту і порівняти її з отриманою експериментально.
4. Привести схему, в якій використовується *Bode-plotter*. Показати, який вигляд має графік на *Bode-plotter* при резонансі напруг.

## 6.5. Контрольні запитання

1. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги й струму при послідовному з'єднанні активного опору з котушкою індуктивності (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).
2. Пояснити, в чому полягає фізична сутність резонансу напруги в електричному колі. Якими шляхами можна досягти резонансу напруг в електричному колі.
3. Пояснити, від чого залежать величини напруги на реактивних елементах електричного кола при резонансі напруг.
4. Пояснити, чим визначається добротність реактивного елемента та добротність електричного кола.
5. Навести приклади позитивних і негативних сторін резонансу напруг.

## Робота 7. Дослідження електричних кіл змінного струму з паралельним з'єднанням елементів

### 7.1. Мета роботи

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

### 7.2. Теоретичні відомості

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



$$I_1 = UY_1, \quad I_2 = UY_2, \quad I = I_1 + I_2 = U(Y_1 + Y_2) = UY.$$

Тут ми використовуємо такий параметр схеми, що називається провідністю  $Y = Z^{-1}$  і має активну  $G$  і реактивну  $B$  складові, тобто  $Y = G + iB$ .

Явища резонансу струму в розгалуженому колі синусоїдального струму можна характеризувати складовими струмів і потужностей. Коли загальні струми та напруги збігаються за фазою, реактивні складові струму індуктивної та ємнісної віток рівні за величиною та протилежні за фазою:

$$I_C = I_L, \quad I = GU, \quad I_L = B_L U, \quad I_C = B_C U,$$

тобто умовою резонансу струмів буде  $B_L = B_C$ .

Виконання умов резонансу струмів забезпечується за умовою не тільки  $B_L = B_C$ , але й  $G_L = G_C$ , тобто необхідно забезпечити рівності не тільки модулів реактивних складових, але й активних складових паралельних віток. Звідси можна записати:

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

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

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

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

Якщо активні опори  $R_1$  і  $R_2$  (опори індуктивної та ємнісної віток) будуть малими, тобто  $R_1 = R_2 = 0$ , то отримаємо такий результат:

$$B_L = B_C = \sqrt{\frac{C}{L}} = \gamma = \frac{1}{\rho}.$$

Величина  $\gamma$  (зворотна величина хвильовому опору  $\rho$ ) називається хвильовою провідністю.

Відношення  $I$  до  $I_C$  та  $I_L$  при резонансі буде дорівнювати:

$$\frac{I}{I_L} = \frac{I}{I_C} = \frac{GU}{B_L U} = \frac{GU}{B_C U} = \frac{G}{\gamma} = d.$$

Відношення  $d = G\gamma^{-1} = G\rho$  називається затуханням електричного кола, а величина, обернена затуханню – добротністю кола.



### 7.3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло з джерела змінної напруги, активного опору та котушки індуктивності (рис.7.1) з параметрами, що задаються відповідно до варіанту (таблиця 7.1). Виміряти напруги і струм, за допомогою осцилографа зняти осцилограми напруги, а також виміряти кут зсуву фаз між напругами в контрольних точках 23 і 24.

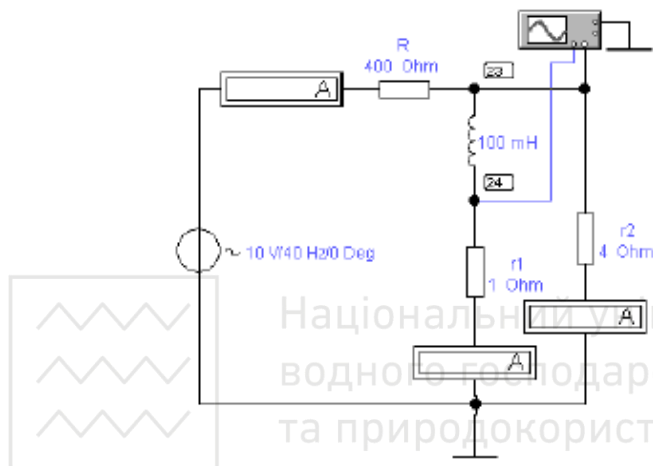


Рис. 7.1. Схема для дослідження паралельного з'єднання віток

2. Повторити дослід, але котушку індуктивності замінити конденсатором і провести аналогічні вимірювання.

3. Провести дослід з паралельним з'єднанням конденсатора та котушки індуктивності (послідовно з кожним реактивним елементом встановити активний опір з опором відповідно до варіанту). Виміряти і записати напруги й струми у вітках схеми, зняти осцилограми напруги.

Змінюючи частоту джерела знайти таке її значення, при якому буде мати місце резонанс струмів в колі. Експеримент по визначенню резонансу струмів проводиться за схемою рис. 7.2. На цьому ж рисунку можна бачити, як виглядає АЧХ при резонансі струмів у вікні Bode-plotter.

4. Встановивши однаковими активні опори у вітках електричної схеми, провести дослід по визначенню залежності величини струмів у вітках резонансного контуру від величини активних опорів.

5. Не змінюючи резонансну частоту і збільшивши величину інду-

ктивності котушки в 10 разів, повторити дослід за п.4.

6. Повторити дослід за п.3, замінивши в схемі джерело напруги джерелом струму (параметри джерела – відповідно варіанту).

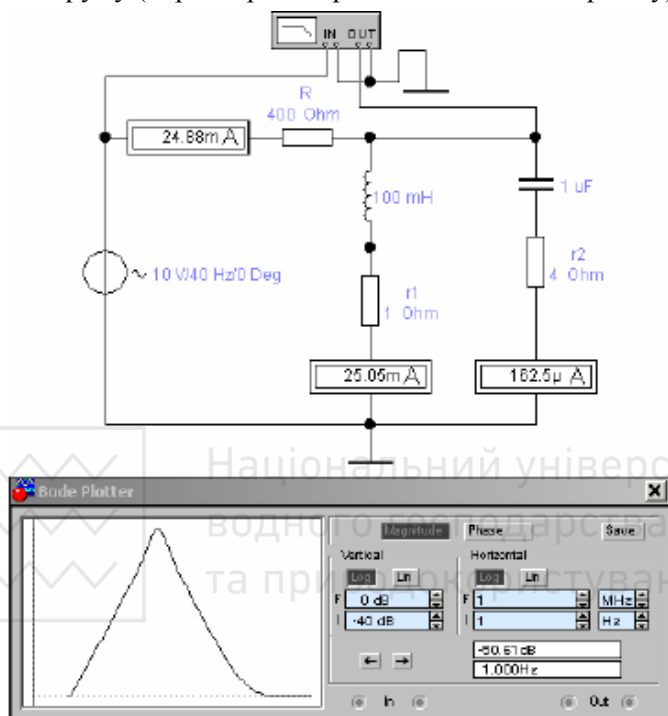


Рис. 7.2. Схема для дослідження паралельного резонансного контуру

Таблиця 7.1. Таблиця варіантів до роботи 7

Номер варіанту	E, В	F, Гц	φ, град.	J, А	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	r <sub>1</sub> , Ом	r <sub>2</sub> , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	50	10	0.1	50	0.1	94	1	4
2	10	80	20	0.2	100	0.11	90	1.5	4.5
3	15	110	30	0.3	150	0.12	86	2	5
4	20	140	40	0.4	200	0.13	82	2.5	5.5
5	25	170	50	0.5	250	0.14	78	3	6
6	30	200	60	0.6	300	0.15	74	3.5	6.5
7	35	230	70	0.7	350	0.16	70	4	7
8	40	260	80	0.8	400	0.17	66	4.5	7.5





1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	45	290	90	0.9	450	0.18	62	5	8
10	50	320	100	1	500	0.19	58	5.5	8.5
11	55	350	110	1.1	550	0.2	54	6	9
12	60	380	120	1.2	600	0.21	50	6.5	9.5
13	65	410	130	1.3	650	0.22	46	7	10
14	70	440	140	1.4	700	0.23	42	7.5	9
15	75	470	150	1.5	750	0.24	38	8	8
16	80	500	160	1.6	800	0.25	34	8.5	7
17	85	530	170	1.7	850	0.26	30	9	6
18	90	560	180	1.8	900	0.27	26	9.5	5
19	95	590	190	1.9	950	0.28	22	10	4
20	100	620	200	2	1000	0.29	18	9	3.5
21	105	650	210	2.1	1050	0.3	14	8	3
22	110	680	220	2.2	1100	0.31	10	7	2.5
23	115	710	230	2.3	1150	0.32	9	6	2
24	120	740	240	2.4	1200	0.33	8	5	1.5
25	125	770	250	2.5	1250	0.34	7	4	1

#### 7.4. Вимоги до звіту

1. Виконати розрахунки напруги і струмів у вітках електричного кола для кожного з проведених дослідів.
2. Побудувати векторні діаграми.
3. Обчислити резонансну частоту паралельного контуру і порівняти її з отриманою експериментально.
4. Побудувати векторні і часові діаграми для режиму резонансу.

#### 7.5. Контрольні запитання

1. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги і струмів у вітках при паралельному з'єднанні активного опору з котушкою індуктивністю (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).
2. Пояснити, в чому полягає фізична сутність резонансу струмів в електричному колі. Якими шляхами можна досягти резонансу струмів в електричному колі.
3. Пояснити відмінності резонансу струмів від резонансу напруг.
4. Назвіть складові провідності кола синусоїдального струму.
5. Пояснити, від чого залежать величини струмів у реактивних елементах електричного кола при резонансі струмів.



6. Пояснити, чим визначається добротність реактивного елемента та добротність електричного кола при резонансі струмів.
7. Навести переваги та недоліки резонансу струмів.

## Робота 8. Дослідження електричних кіл змінного струму зі змішаним з'єднанням елементів

### 8.1. Мета роботи

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

### 8.2. Теоретичні відомості

Обчислення розгалужених схем виконується послідовно, шляхом поетапного знаходження комплексних опорів та струмів. Спочатку знаходиться еквівалентний опір паралельно з'єднаних віток. Одержаний опір шляхом перетворень розділяється на дійсний і уявний складові, тобто:

$$Z_{23} = R_{23} + iX_{23}.$$

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

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

$$\dot{Z}_e = R_1 + R_{23} + iX_1 + X_{23} = Z_e e^{i\varphi_e}.$$

Далі знаходиться комплексне значення струму в спільній вітці схеми:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_e} = I_1 e^{-i\varphi_e}.$$

Обчислюється величина напруг на послідовній та паралельній вітках схеми:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23} = \dot{I}_1 \dot{Z}_1 + \dot{I}_1 \dot{Z}_{23}.$$

Після цього обчислюється струм в паралельних вітках схеми:

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



Після обчислення струмів і напруг на елементах схеми будувється векторна діаграма, яка пояснює взаємозв'язок між ними.

### 8.3. Порядок виконання роботи

1. Згідно варіанту скласти робочу схему. Базова робоча схема для всіх варіантів представлена на рис. 8.1. У вітці 3 елементи (RC або RL) включені послідовно.

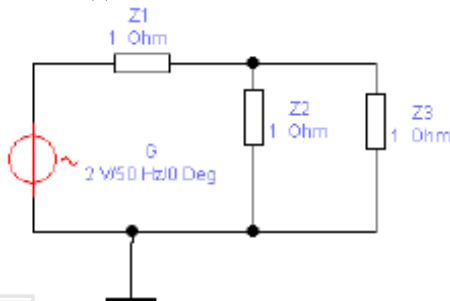


Рис. 8.1. Базова робоча схема для виконання роботи 8

2. Встановити необхідні параметри використовуваних елементів (таблиця 8.1) і запустити схему в роботу.

3. За допомогою осцилографа і попередньо встановлених вимірювальних приладів визначити діючі та амплітудні значення напруг і струмів, а також, використовуючи обидва промені осцилографа – фазові співвідношення між напругами (фазові співвідношення можна виміряти і за допомогою Vode plotter). Всі результати вимірювань записати у відповідну таблицю.

Таблиця 8.1. Таблиця варіантів до роботи 8

Номер варіанту	G	$\varphi_G$ , град.	$A_G$ , В (А)	$Z_1$	$Z_2$	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	$Z_3$	$R_3 - X_3$ , Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	U	10	1	R	L	10	50	-	RC	15 – 20
2	I	20	1.5	L	C	-	55	60	RL	18 – 23
3	U	30	2	R	C	12	-	57	RC	20 – 25
4	I	40	2.5	L	R	14	60	-	RL	22 – 27
5	U	50	3	C	L	-	65	54	RC	15 – 30
6	I	60	3.5	C	R	16	-	51	RL	10 – 20
7	U	70	4	R	L	18	70	-	RC	30 – 20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	I	80	4.5	L	C	-	75	48	RL	12 – 30
9	U	90	5	R	C	20	-	45	RC	25 – 10
10	I	100	5.5	L	R	22	80	-	RL	20 – 35
11	U	110	6	C	L	-	85	42	RC	32 – 17
12	I	120	6.5	C	R	24	-	39	RL	18 – 40
13	U	130	7	R	L	26	90	-	RC	35 – 16
14	I	140	7.5	L	C	-	95	36	RL	30 – 30
15	U	150	8	R	C	28	-	33	RC	24 – 15
16	I	160	8.5	L	R	30	100	-	RL	33 – 20
17	U	170	9	C	L	-	105	30	RC	25 – 50
18	I	180	9.5	C	R	32	-	27	RL	40 – 35
19	U	190	10	R	L	34	110	-	RC	35 – 44
20	I	200	10.5	L	C	-	115	24	RL	18 – 28
21	U	210	11	R	C	36	-	21	RC	30 – 12
22	I	220	11.5	L	R	38	120	-	RL	55 – 15
23	U	230	12	C	L	-	125	18	RC	35 – 12
24	I	240	12.5	C	R	40	-	15	RL	22 – 44
25	U	250	13	R	L	42	130	-	RC	38 – 55

#### 8.4. Вимоги до звіту

1. Виконати розрахунки напруг і струмів у вітках кола.
2. Побудувати векторні і часові діаграми.
3. Порівняти результати експериментальних даних з результатами проведених розрахунків.

#### 8.5. Контрольні запитання

1. Вміти виконувати розрахунок електричних кіл змінного струму при змішаному з'єднанні активних і реактивних елементів.
2. Вміти будувати векторні і часові діаграми, які графічно відображають результати виконаних розрахунків.
3. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги і струмів у гілках при паралельному з'єднанні активного опору з котушкою індуктивності (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).
4. Пояснити векторні (часові) діаграми розподілу напруги і струмів у вітках при послідовному з'єднанні активного опору з котушкою індуктивності (конденсатором) при живленні електричного кола від джерела напруги (струму).



## Робота 9. Дослідження характеристик трансформатора

### 9.1. Мета роботи

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

### 9.2. Теоретичні відомості

Трансформатор – це статичний електромагнітний апарат, що перетворює електричну енергію змінного струму з одними параметрами на електричну енергію з іншими параметрами. В трансформаторі перетворюються напруга, струм та початкова фаза.

Для спрощених досліджень процесів у трансформаторі використовують таке поняття, як ідеальний трансформатор. Це трансформатор, у якого відсутні магнітні потоки розсіювання, а активні опори обмоток дорівнюють нулю. В реальному трансформаторі обмотки мають як активний опір, так і опір розсіювання, тобто крім основного магнітного потоку, що проймає обидві обмотки, є потоки розсіювання первинної та вторинної обмоток. У теоретичних дослідженнях і при побудові схеми заміщення трансформатора користуються таким поняттям, як зведений трансформатор. Це еквівалентний реальному трансформатор, у якого коефіцієнт трансформації дорівнює одиниці. Для заміни реального трансформатора зведеним треба витримати принципи еквівалентності енергетичного стану. Рівняння балансу енергії для реального і зведеного трансформатора виглядає таким чином:

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

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

$$k = \frac{U_{2XX}}{U_1} = \frac{E_{2XX}}{E_1} = \frac{W_2}{W_1} = \frac{I_1}{I_2},$$

де  $W_1$  та  $W_2$  – кількість витків первинної та вторинної обмоток. З



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

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

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

$$Z_H \rightarrow \infty, \quad I_2 = 0.$$

Режим навантаження здійснюється, коли до вторинної обмотки підключено навантаження  $Z_H$ , а у вторинному колі протікає струм  $I_2$ .

Режим короткого замикання – це аварійний режим роботи трансформатора. В режимі короткого замикання опір навантаження  $Z_H = 0$ . В цьому режимі встановлюються великі струми короткого замикання в обмотках. Ці значення настільки великі, що приводять до виходу з ладу обмоток трансформатора. Струм короткого замикання зазвичай у 20...30 разів більший за номінальний і тому треба відрізнати режим короткого замикання від досліду короткого замикання. Дослід проводять при зниженій напрузі  $U_1$  настільки, щоб у вторинному колі протікав струм, що дорівнює номінальному.

Трансформатор вибирається з бібліотеки базових компонентів. Серед трансформаторів, які використовуються в EWB (рис. 9.1), для проведення досліджень необхідно вибирати найпростіший (рис. 9.1, а), оскільки трансформатори, зображені на рис. 9.1, б, в мають значну кількість параметрів, які детально вивчаються в спеціальних курсах.

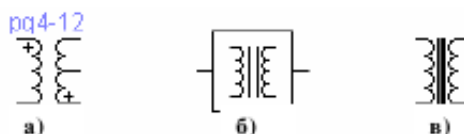


Рис. 9.1. Трансформатори з бібліотеки компонентів EWB

Після вибору трансформатора необхідно задатися робочими параметрами. Подвійне натискання лівої кнопки "миші" приводить до появи вікна *Transformer Properties*, яке зображено на рис. 9.2. З бібліотеки трансформаторів необхідно вибрати *Power*, а у вікні *Model*

вибрати модель ідеального трансформатора *Ideal*. Після цього необхідно натиснути кнопку *Edit* і на екрані з'явиться вікно *Transformer Model "Ideal"*, яке зображено на рис. 9.3. У вікні вибору параметрів трансформатора необхідно встановити відповідні до варіанта значення (таблиця 9.1):

- *Primary-to-secondary turns ratio (N)* – відношення кількості витків первинної обмотки до вторинної (величина, обернена коефіцієнту трансформації;
- *Leakage inductance (LE)* – індуктивність розсіювання, приведена до первинної обмотки, Гн;
- *Magnetizing inductance (LM)* – індуктивність намагнічування, Гн;
- *Primary winding resistance (RP)* – активний опір первинної обмотки, Ом;
- *Secondary winding resistance (RS)* – активний опір вторинної обмотки, Ом.

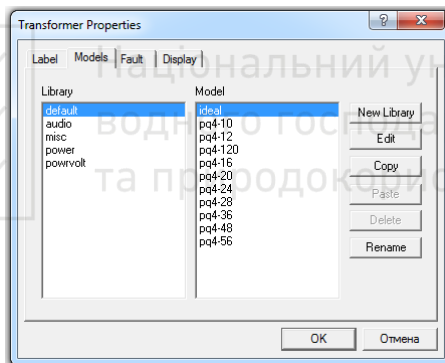


Рис. 9.2. Вікно *Transformer Properties*

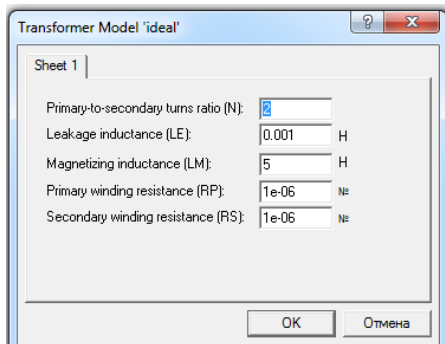


Рис. 9.3. Вікно *Transformer Model "Ideal"*



Усі параметри задаються відповідно до індивідуального варіанту виконання роботи (таблиця 9.1).

### 9.3. Порядок виконання роботи

1. Встановити параметри трансформатора відповідності до заданого варіанту.

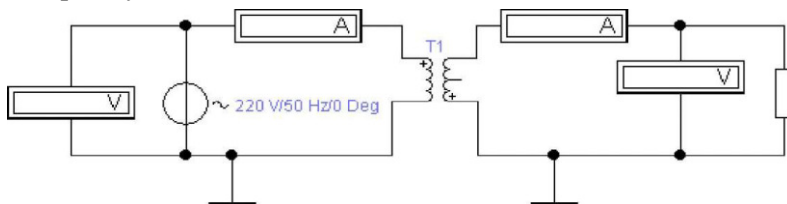


Рис. 9.4. Електрична схема для виконання роботи 9

2. Зібрати електричну схему відповідно до рис. 9.4. Не слід забувати, що вимірювальні прилади після установки в схему необхідно переналаштувати для роботи в колах змінного струму, оскільки за замовчуванням вони встановлені для проведення вимірювань у колах постійного струму.

3. Дослідження трансформатора в режимі холостого ходу. Вторинну обмотку трансформатора залишити розімкненою. Включити схему і провести вимірювання струму й напруги первинної обмотки трансформатора, а також напруги на вторинній обмотці трансформатора. Отримані результати використати для обчислення коефіцієнта трансформації за напругою, а також обчислення величини індуктивності намагнічування.

Провести зворотний дослід. До вторинної обмотки трансформатора приєднати джерело напруги, а первинну обмотку залишити розімкненою. Напругу джерела, підключеного до вторинної обмотки, встановити рівним напрузі, яка була виміряна в попередньому досліді. Результати вимірювань струму вторинної обмотки й напруги первинної використати для обчислення коефіцієнта трансформації як відношення напруг вторинної та первинної обмоток.

4. Дослідження трансформатора при навантаженні зі сторони вторинної обмотки. Для заданої величини опору навантаження отримати показання амперметрів і вольтметрів, підключених до обмоток трансформатора. Зменшуючи опір навантаження, провести вимірювання струмів первинної й вторинної обмоток трансформатора та напруги в навантаженні.





Отримані результати використати для побудови зовнішньої характеристики трансформатора (ВАХ).

5. Збільшити в установках параметрів трансформатора активні опори його обмоток (на 30%) і провести повторні вимірювання для побудови ВАХ. Повторити дослід із попередніми активними опорами і збільшеним значенням індуктивності розсіювання обмоток трансформатора. Побудувати ВАХ трансформатора для кожного з проведених дослідів і зробити висновки щодо впливу активних й індуктивних опорів на вигляд зовнішньої характеристики. Параметри взяти з таблиці 9.1.

6. Проведення дослідів короткого замикання. Для проведення даного дослідів необхідно, щоб в установках трансформатора були встановлені або активні опори обмоток, або індуктивності розсіювання обмоток, або перші й другі параметри. У досліджуваній схемі вторинну обмотку необхідно закоротити через амперметр, а напругу джерела живлення встановити в нуль. Дослід проводиться у такій послідовності:

7. Встановити напругу джерела живлення первинної обмотки на рівні одного відсотка від номінального значення й перевірити величину струму вторинної обмотки. Якщо величина струму менша, ніж струм при підключеному навантаженні, то напругу джерела живлення необхідно збільшити.

8. Збільшення напруги джерела проводиться доти, поки величина струму вторинної обмотки не досягне величини струму при підключеному навантаженні. Виміряна напруга при вказаному значенні струму називається напругою короткого замикання. Вона використовується для обчислення індуктивних опорів розсіювання обмоток трансформатора.

#### **9.4. Вимоги до звіту**

1. Привести результати обчислень потужності, виміряні на стороні первинної і вторинної обмоток трансформатора.

2. Пояснити зв'язок між коефіцієнтами трансформації трансформатора за напругою та струмом.

3. Привести еквівалентні опори, обчислені для первинної і вторинної обмоток, і пояснити їх взаємозв'язок з коефіцієнтами трансформації.

4. Для кожного з проведених дослідів виконати розрахунки на-



водного господарства  
та водокористування

пруг і струму навантаження вторинної обмотки.

5. Побудувати Т-подібну схему заміщення трансформатора для заданого режиму.

Таблиця 9.1. Таблиця варіантів до роботи 9

Номер варіанту	$E_1$ , В	$LE$ , мГн	$R_n$ , Ом	$k$	$LM$ , Гн	$RP$ , Ом	$RS$ , Ом
1	5	1	50	2	0.5	0.1	0.1
2	10	2	60	0.7	1	0.2	0.2
3	15	3	70	3	1.5	0.3	0.3
4	20	4	80	0.75	2	0.4	0.4
5	25	5	90	4	2.5	0.5	0.5
6	30	6	100	0.8	3	0.6	0.6
7	35	7	150	5	3.5	0.7	0.7
8	40	8	200	0.85	4	0.8	0.8
9	45	9	250	6	4.5	0.9	0.9
10	50	10	300	0.9	5	1	1
11	55	9,5	350	7	5.5	0.9	0.9
12	60	8,5	400	0.95	6	0.8	0.8
13	65	7,5	450	8	6.5	0.7	0.7
14	70	6,5	500	0.65	7	0.6	0.6
15	75	5,5	550	9	7.5	0.5	0.5
16	80	4,5	600	0.6	8	0.4	0.4
17	85	3,5	650	10	8.5	0.3	0.3
18	90	2,5	700	0.55	9	0.2	0.2
19	95	1,5	750	11	9.5	0.1	0.1
20	100	2	800	0.5	10	0.2	0.2
21	105	3	850	12	8	0.3	0.3
22	110	4	900	0.45	7	0.4	0.4
23	115	5	950	13	6	0.5	0.5
24	120	6	1000	0.4	5	0.6	0.6
25	125	7	1200	15	4	0.7	0.7

### 9.5. Контрольні запитання

1. Пояснити взаємозв'язок між струмами і напругою первинної й вторинної обмоток трансформатора.
2. Пояснити основні режими роботи трансформатора.
3. Пояснити, від чого залежить величина напруги на вторинній обмотці трансформатора.



4. Пояснити фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі.
5. Привести приклади використання трансформаторів.
6. Який пристрій називається трансформатором? Які параметри електричного кола він перетворює?
7. На якому струмі (постійний, змінний, імпульсний) можлива робота трансформатора?
8. Пояснити термін «коефіцієнт трансформації».

## Робота 10. Дослідження часових характеристик чотириполюсника

### 10.1. Мета роботи

Метою роботи є вивчення часових характеристик найпростіших чотириполюсників та взаємозв'язку між їх часовими і частотними характеристиками. В результаті вивчення роботи студенти мають оволодіти досвідом використання інтегровальних і диференціальних кіл для зміни часових параметрів імпульсних сигналів.

### 10.2. Теоретичні відомості

Значна кількість електронних пристроїв працюють в умовах перехідних процесів, обумовлених накопиченням і віддачею енергії реактивними елементами схем.  $RC$ -кола широко використовуються для організації часових затримок;  $LC$ -кола – для забезпечення примусової комутації силових ключів;  $RL$ -кола – як елементи для забезпечення необхідних траєкторій перемикавання, а також як трансформаторні схеми. В аналоговій схемотехніці здебільшого використовуються часові властивості інтегровального та диференціального  $RC$ -кіл.

Використання інтегровального кола. Напруга на виході такого  $RC$ -кола за умови, що в початковий момент часу  $U_{вих}(0)=0$ , описується рівнянням

$$U_{вих} = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt.$$

З приведенного рівняння легко зробити такі висновки. Якщо конденсатор заряджається постійним струмом, то  $U_{вих} = \frac{I \cdot t}{C}$ , тобто

напруга на конденсаторі з часом наростає лінійно.

Така особливість широко використовується в генераторах лінійно змінної напруги, таймерах точності, схемах часових затримок, а також схемах розширення імпульсів.

За умови  $|U_{вих}| \ll |U_{вх}|$  маємо  $U_{вих} \approx \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt$ , тобто схе-

ма виконує функцію інтегратора. При живленні схеми постійною напругою  $U_{вх} = E$  з приведеної формули знаходимо приблизну фор-

мулу, згідно з якою  $U_{вих} \approx \frac{E \cdot t}{RC}$ .

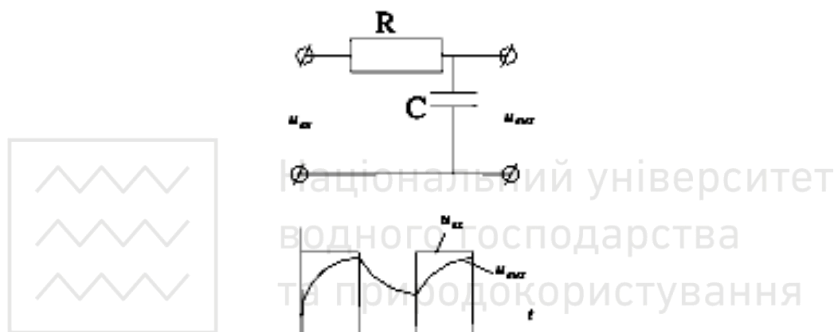


Рис. 10.1. Електрична схема інтегрувального кола

При подачі на RC коло ідеального одиночного прямокутного імпульсу при нульових початкових умовах отримуємо залежність

$U_{вих} \approx E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$ , з якої легко можна отримати попередню

формулу.

Якщо схема живиться від джерела напруги, то за відсутності імпульсу конденсатор буде розряджатися через джерело на резистор. Напруга на конденсаторі при цьому зменшується від початкової на цьому інтервалі часу  $U_0$  до нуля відповідно до формули

$$U_{вих} \approx U_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Останні дві формули описують зміну напруги на конденсаторі і під час дії періодичної послідовності імпульсів. При цьому форма вихідної напруги буде в значній мірі залежати від співвідношення



між періодом імпульсів  $T$  і сталою часу  $RC$ . Від цього ж залежить і характер використання властивостей кола, що розглядається. При  $RC \gg T$  вона здебільшого використовується як фільтр. При  $RC \approx T$  коло використовується як інтегрувальне.

Використання диференціувального кола.

Напруга на виході такої схеми описується формулою

$$U_{\text{вих}} = RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} + RC \left( \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} - \frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \right).$$

Якщо  $\frac{dU_{\text{вих}}}{dt} \ll \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$ , то маємо  $U_{\text{вих}} = RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}$ , тоб-

то  $RC$ -коло може використовуватись як диференціувальне.

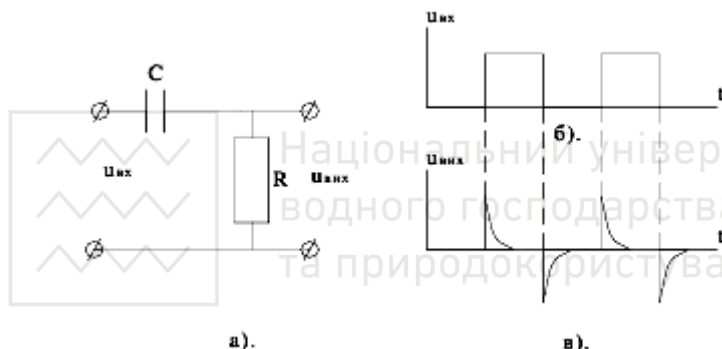


Рис. 10.2. Електрична схема диференціувального кола

Найбільш широко таке коло використовується для скорочення тривалості входних імпульсів. При появі імпульсу конденсатор заряджається, величина струму зменшується і напруга на виході зменшується. Після заряду конденсатора його напруга дорівнює амплітуді імпульсу, а напруга на виході дорівнює нулю. Після закінчення імпульсу напруга конденсатора через джерело живлення прикладається до вихідного резистора, після чого конденсатор розряджається до нуля. За наявності фронту імпульсу умови диференціювання погіршуються, тому необхідно зменшувати сталу часу  $RC$ . Для виділення фронтів  $t_{\text{фр}}$  (тобто виконання умови, щоб тривалість імпульсу на виході схеми приблизно дорівнювала тривалості фронту) необхідним є виконання умови  $RC \approx 0.1t_{\text{фр}}$ .

Зі збільшенням сталої часу умови диференціювання погіршують-



ся і реально має місце лише спотворення вершини імпульсу. На рис. 10.2 представлена ілюстрація дослідження часових характеристик диференціовального кола.

Якщо стала часу буде набагато перевищувати період слідування імпульсів, то таке коло буде повністю передавати вхідні імпульси, але без постійної складової. Цю особливість легко побачити за допомогою осцилографа шляхом перемикання режиму прийому сигналу з постійного струму на змінний.

Для вивчення часових властивостей пасивних чотириполюсників за допомогою EWB можна використовувати два різні способи.

Перший з них полягає у використанні меню *Analysis*, з якого вибирається опція *Transient Analysis*.

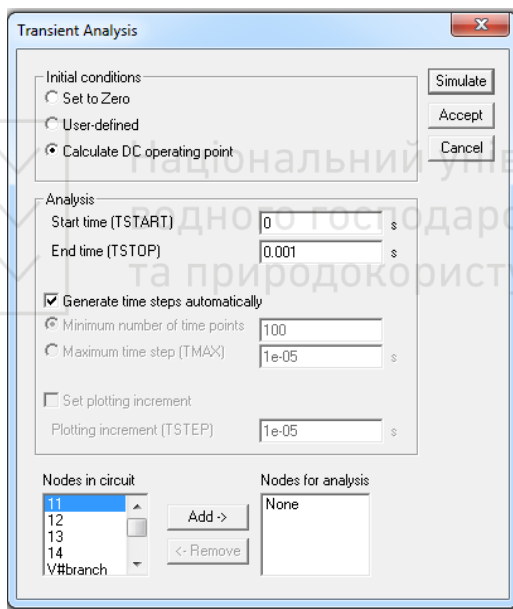


Рис. 10.3. Вікно установки параметрів перехідних процесів

Після її вибору з'являється вікно установки параметрів перехідних процесів, які досліджуються (рис. 10.3). Для виконання лабораторних досліджень у вікні *Initial conditions* установки виконуються так, як зображено на рисунку. У вікні *Analysis* – параметр *Start time* (час початку перехідного процесу) встановлюється в нуль, а параметр *End time* (кінець перехідного процесу) встановлюється у відповідності до планованого часу тривалості перехідного процесу. Ре-



комендації щодо вибору цього параметра можуть бути такими: якщо на вході чотириполюсника діє періодичний імпульсний сигнал або сигнал іншої складної форми, то в усталеному режимі необхідно оцінювати процеси протягом періоду вхідного сигналу. Установку інших параметрів слід доручити самій програмі.

Після установки параметрів натискається кнопка *Simulate*, внаслідок чого з'являється вікно з осцилограмою перехідного процесу (рис. 10.4). На осцилограмі по горизонтальній осі відкладається час перехідного процесу, а по вертикальній – величини вхідної і вихідної напруг.

Інший спосіб уже відомий виконавцям цього циклу лабораторних робіт і полягає в тому, що для визначення часових діаграм використовується осцилограф, один з входів якого приєднується до джерела вхідного сигналу, а другий – до виходу чотириполюсника.

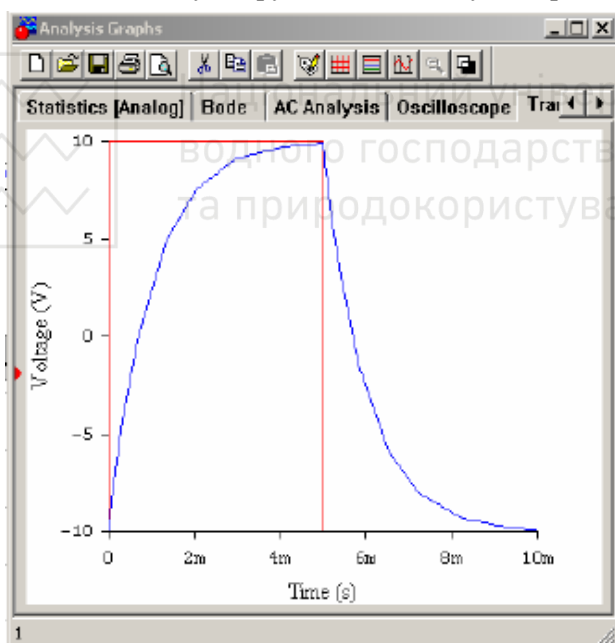


Рис. 10.4. Осцилограма перехідного процесу

В якості джерела вхідного сигналу можна використовувати функціональний генератор напруги, який знаходиться в меню *Instruments*. Вигляд його і схема підключення до досліджуваного чотириполюсника представлені на рис. 10.5, а, б. Функціональний генера-



тор забезпечує генерування сигналів синусоїдальної, пилоподібної та прямокутної форм. Опцією *Frequency* забезпечується зміна частоти в широких межах. Двом останнім формам сигналів прилад забезпечує зміну відношення тривалості одного півперіоду відносно другого. Для прямокутних імпульсів це відношення тривалості імпульсу до періоду.

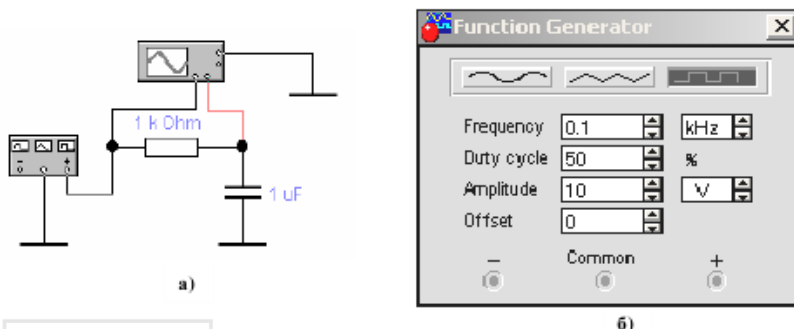


Рис. 10.5. Підключення досліджуваного чотириполюсника

Така особливість забезпечується опцією *Duty cycle*. Опцією *Amplitude* задається амплітуда вихідного сигналу, а опція *Offset* задає зміщення періодичного сигналу відносно горизонтальної осі на постійну величину. Генератор дає можливість подавати на вхід досліджуваної схеми як імпульси позитивної полярності, так і негативної (по відношенню до спільної шини).

Другим генератором, який може використовуватись для дослідження часових характеристик, є генератор синхросигналів *Clock* в меню *Sources*.

### 10.3. Порядок виконання роботи

1. Дослідження часових властивостей фільтра нижніх частот. Проведення досліджень часових характеристик пасивних чотириполюсників необхідно виконувати в тісному взаємозв'язку з результатами дослідження частотних характеристик чотириполюсників. Спочатку необхідно знайти частоту зрізу і сталу часу досліджуваного RC-кола. Дослідження проводяться у такій послідовності:

- встановити частоту функціонального генератора, рівною частоті зрізу фільтра низьких частот і зафіксувати осцилограму вихідної напруги;
- встановити частоту функціонального генератора на декаду ни-





жче частоти зрізу фільтра і зафіксувати осцилограму вихідної напруги;

- встановити частоту функціонального генератора на декаду вище частоти зрізу і зафіксувати осцилограму вихідної напруги.

2. Дослідження часових властивостей фільтра верхніх частот виконується в тій самій послідовності, що і фільтра нижніх частот.

3. Обчислити сталу часу для фільтрів верхніх та нижніх частот.

Таблиця 10.1. Таблиця варіантів до роботи 10

Номер варіанту	Тип схеми	L, мГн	R, Ом	C, мкФ
1	RL	1	50	2
2	RC	2	60	0.7
3	RL	3	70	3
4	RC	4	80	0.75
5	RL	5	90	4
6	RC	6	100	0.8
7	RL	7	150	5
8	RC	8	200	0.85
9	RL	9	250	6
10	RC	10	300	0.9
11	RL	9,5	350	7
12	RC	8,5	400	0.95
13	RL	7,5	450	8
14	RC	6,5	500	0.65
15	RL	5,5	550	9
16	RC	4,5	600	0.6
17	RL	3,5	650	10
18	RC	2,5	700	0.55
19	RL	1,5	750	11
20	RC	2	800	0.5
21	RL	3	850	12
22	RC	4	900	0.45
23	RL	5	950	13
24	RC	6	1000	0.4
25	RL	7	1200	15

#### 10.4. Вимоги до звіту

1. Привести осцилограми для кожного дослід з вивчення часо-



вих характеристик електричних кіл.

2. Зробити висновки й обґрунтувати отримані результати з точки зору фізичних явищ, які мають місце у схемах даних кіл.
3. Обчислити сталі часу електричних кіл та зробити висновки.
4. Зробити висновки по взаємозв'язку між частотними і часовими характеристиками досліджуваних електричних кіл.

### **10.5. Контрольні запитання**

1. Пояснити сутність явищ інтегрування і диференціювання схемами фільтрів нижніх і верхніх частот.
2. Навести часові діаграми сигналу на виході фільтра верхніх частот при подачі на його вхід послідовності імпульсів, якщо їх частота набагато перевищує частоту зрізу фільтра.
3. Як зміниться форма імпульсу на виході фільтра верхніх частот, якщо частоту зрізу останнього, яка дорівнювала частоті повторення імпульсної послідовності, збільшити в десять разів.
4. Як зміниться форма імпульсу на виході фільтра нижніх частот, якщо його частоту зрізу, яка дорівнювала частоті повторення імпульсної послідовності, зменшити в десять разів.

## **Робота 11. Дослідження перехідних процесів в лінійних електричних колах постійного струму**

### **11.1. Мета роботи**

Дослідження перехідних процесів при заряді і розряді конденсатора, а також при ввімкненні котушки індуктивності і конденсатора у коло постійного струму.

### **11.2. Теоретичні відомості**

Перехідним процесом є процес переходу від одного усталеного режиму електричного кола до другого усталеного режиму.

Перехідні процеси виникають при вмиканні або вимиканні електричного кола, при коротких замиканнях в схемі, при різкій зміні параметрів кола та ін. Всі зміни в колі, які викликають перехідні процеси, називаються комутаціями. При цьому відбувається перехід від енергетичного стану докомутаційного режиму до енергетичного стану післякомутаційного режиму кола. Кожному стану енергетичного режиму кола відповідає певний запас енергії в електричному



полі конденсатора  $W_C = \frac{CU_C^2}{2}$  та в магнітному полі котушки індук-

тивності  $W_L = \frac{Li_L^2}{2}$ . Перехід до нового режиму кола зв'язаний з перерозподілом цих енергій між реактивними елементами та незворотним перетворенням електричної енергії в теплову в резистивних елементах.

Струм в індуктивному та напруга на ємнісному елементах визначаються за законами комутації.

Перший закон комутації: в індуктивному елементі струм (і магнітний потік) в момент комутації (при  $t = 0_+$ ) зберігає те ж саме значення, яке він мав безпосередньо перед комутацією (при  $t = 0_-$ ) і далі починає змінюватись саме від цього значення, тобто

$$i_L \left( \bullet \right)_- = i_L \left( \bullet \right)_+$$

Другий закон комутації: на ємнісному елементі напруга (і заряд) в момент комутації зберігає те ж саме значення, яке вона мала безпосередньо перед комутацією, і далі починає змінюватись саме з цього значення, тобто  $U_C \left( \bullet \right)_- = U_C \left( \bullet \right)_+$

При вмиканні кола (рис. 11.1) з послідовно з'єднаними активним опором  $R$  і конденсатором з ємністю  $C$  на постійну напругу  $U_0$  джерела перехідний процес у ньому протікає за рівнянням другого закону Кірхгофа

$$R \cdot i + u_C = U_0$$

або

$$R \cdot C \frac{du_C}{dt} + u_C = U_0,$$

де  $i$  – миттєвий струм;  $u_C$  – миттєве значення напруги на конденсаторі.

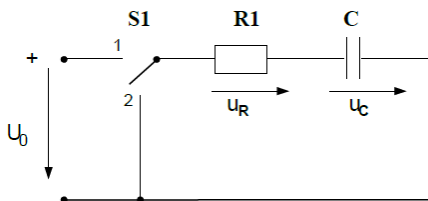


Рис. 11.1. Перехідні процеси в RC-колі



Розв'язок диференціального рівняння будемо шукати у вигляді:

$$U_C = U_{CV} + U_{CB},$$

де  $U_{CV} = U_0$  – усталена (примусова) складова напруги на конденсаторі.

Розв'язанням цього лінійного диференційного рівняння є вираз виду

$$U_C = U_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

де  $\tau = RC$  – стала часу кола.

Струм в колі можна знайти диференціюванням попереднього рівняння і множення цього результату на ємність  $C$  конденсатора:

$$i = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{d}{dt} \left[ U_0 - U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Теоретично перехідний процес в колі триває до безкінечності, але практично він закінчується за час, який дорівнює  $t_{III} = 5\tau$ .

При розряді ємності  $C$  на опір  $R$  (коротке замкнення) перехідний процес описується рівнянням

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0.$$

При цьому напруга і струм на ємності:

$$U_C = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad i = -\frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

На рис. 11.2 представлені залежності  $U_C$  та  $i$  при заряді і розряді конденсатора.

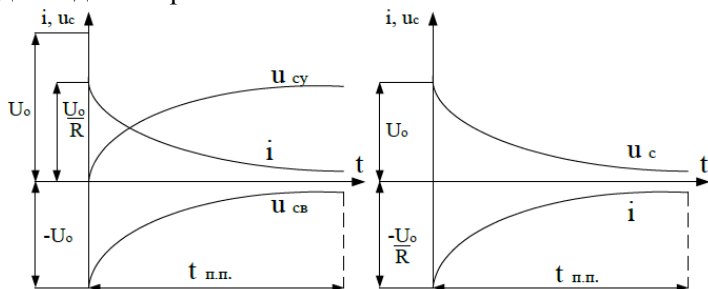


Рис. 11.2. Графіки кривих перехідного процесу в  $RC$ -колі

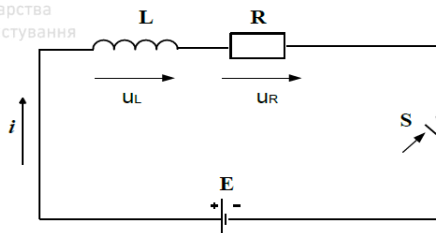


Рис. 11.3. Перехідні процеси в RL-колі

Вмикання котушки з індуктивністю  $L$  на постійну напругу показано на рис. 11.3. При вмиканні кола зростає енергія магнітного поля, доки струм при  $t \rightarrow \infty$  буде мати значення  $I = \frac{E}{R}$ . Рівняння електричної рівноваги має такий вигляд:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E.$$

Воно інтегрується за загальним правилом. В усталеному (примусовому) режимі, якщо струм не змінюється  $\frac{di}{dt} = 0$ , то  $i_V = \frac{E}{R}$ .

Для вільної складової рівняння без правої частини має вигляд

$$L \frac{di_B}{dt} + Ri_B = 0.$$

Звідси

$$i_B = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

де  $\tau = L/R$  – стала часу кола.

Стала інтегрування визначається за першим законом комутації:

$$i = i_V + i_B = \frac{E}{R} + A = 0;$$

$$A = -\frac{E}{R}; \quad i = \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Струм зростає за експоненціальним законом. Теоретично струм у колі буде сталим при  $e^{-\frac{t}{\tau}} = 0$ , тобто при  $t \rightarrow \infty$ .



### 11.3. Порядок виконання роботи

1. Дослідження перехідних процесів при заряді і розряді конденсатора у колі постійного струму з послідовним з'єднанням ємності та резистора.

1.1. Зібрати схему з послідовним з'єднанням  $R$  та  $C$  за рис. 11.4. Встановити параметри елементів згідно до індивідуального варіанту. У схемі використовуються перемикачі  $S1$  та  $S2$  з витримкою часу.

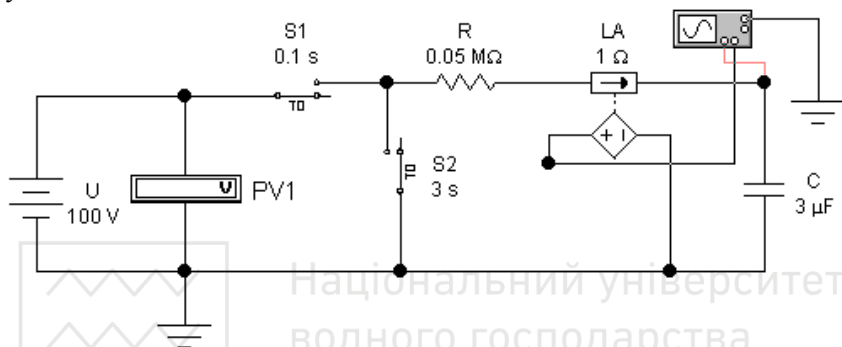


Рис. 11.4. Схема з послідовним з'єднанням  $R$  та  $C$

Схема складається з: джерела живлення постійного струму  $U$ , що подається на резистор  $R$  та конденсатор  $C$ ; вольтметра  $PV1$  – для вимірювання напруги на джерелі постійного струму; сенсора струму  $LA$  для вимірювання струму та зняття його осцилограм.

1.2. Натиснути перемикач у правому верхньому куту схеми. Спостерігати перехідний процес за осцилографом. Для зручності спостереження за напругою і струмом використати канали А і В осцилографа, а відповідні провідники пофарбувати у різні кольори. Після 2...3 с (час контролюємо у нижньому лівому куті) натискаємо кнопку “Pause”. Отримані осцилограми навести у звіті. На рисунках позначити час перехідного процесу і порівняти його з розрахунковим.

1.3. Дослідити процес розряду конденсатора. Осцилограму розряду конденсатора представити у звіті.

До таблиці занести дані розрахунку при заряді та розряді конденсатора.

2. Дослідження перехідних процесів у колах постійного струму з котушкою індуктивності.

2.1. Зібрати схему кола (рис. 11.5) при підключенні котушки ін-



дуктивності до джерела постійного струму, встановити параметри всіх елементів відповідно до варіанту завдання.

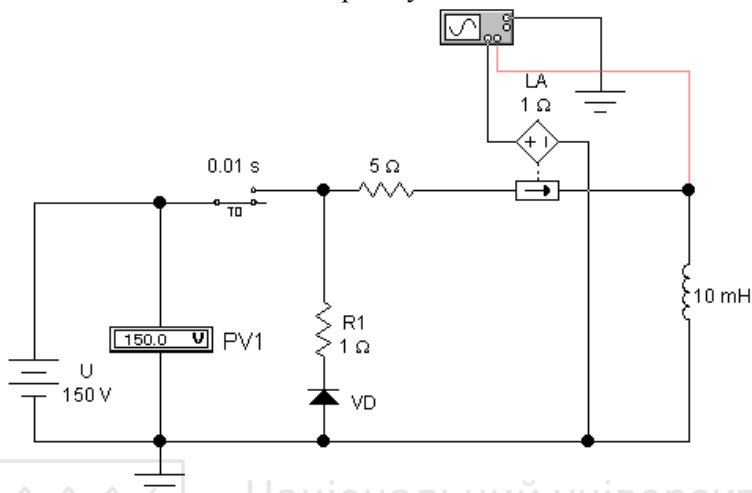


Рис. 11.5. Схема з послідовним з'єднанням R та L

2.2. Увімкнути схему. Спостерігати перехідний процес у колі з котушкою індуктивності. Осцилограми напруги та струму без врахування вітки з діодом VD і резистором R1 представити у звіті. Осцилограми напруги та струму з врахуванням вітки з діодом VD і резистором R1 представити на окремому рисунку.

2.3. До таблиці занести дані розрахунку параметрів кола з котушкою індуктивності в колі постійного струму.

Таблиця 11.1. Таблиця варіантів до роботи 11

Номер варіанту	U, В	RC-коло		RL-коло	
		R, кОм	C, мкФ	R, Ом	L, мГн
1	5	10	50	4	20
2	10	15	45	5	19.5
3	15	20	40	6	19
4	20	25	35	7	18.5
5	25	30	30	8	18
6	30	35	25	9	17.5
7	35	40	20	10	17
8	40	45	15	11	16.5
9	45	50	10	12	16



510	50	55	5	13	15.5
11	55	60	2	14	15
12	60	65	6	15	14.5
13	65	70	10	16	14
14	70	75	12	17	13.5
15	75	80	16	18	13
16	80	85	18	19	12.5
17	85	90	22	20	12
18	90	95	26	21	11.5
19	95	100	30	22	11
20	100	110	34	23	10.5
21	110	120	38	24	10
22	120	130	32	25	9.5
23	130	140	25	26	9
24	140	150	20	27	8.5
25	150	160	15	28	8

#### 11.4. Контрольні запитання

1. Сформулюйте закони комутації.
2. Як визначається стала часу  $\tau$  кола?
3. Як знайти сталу часу RC-кола за експериментальною залежністю  $U_C(t)$ ?
4. Як практично визначається тривалість перехідного процесу?

### Робота 12. Дослідження перехідних процесів в лінійних електричних колах змінного струму

#### 12.1. Мета роботи

Дослідження перехідних процесів в електричних колах змінної синусоїдальної напруги при послідовному включенні котушки індуктивності та активного опору.

#### 12.2. Теоретичні відомості

При вмиканні котушки з індуктивністю  $L$  на синусоїдальну напругу  $U \angle \varphi = U_m \sin(\omega t + \varphi)$  диференціальне рівняння має вигляд:

$$L \frac{di \angle \varphi}{dt} + Ri \angle \varphi = U \angle \varphi$$





Для усталеного режиму  $i_Y = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi)$ , де

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \omega L^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}.$$

Рівняння для вільної складової струму має вигляд

$$L \frac{di_B}{dt} + Ri_B = 0.$$

Його загальний розв'язок  $i_B = A \cdot e^{-\frac{Rt}{L}}$ , а реальний струм, що протікає в колі:

$$i = i_Y + i_B = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

Відповідно до першого закону комутації  $A = -I_m \sin(\psi - \varphi)$ , тобто

$$i = i_Y + i_B = I_m \sin(\omega t + \psi - \varphi) - I_m \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

За аналізом рівнянь вільна складова струму  $i_B$  залежить від моменту вмикання, тобто від початкової фази  $\psi$ . Якщо  $\psi - \varphi = 0$ , то  $i_B = 0$ , тобто не буде перехідного режиму і струм  $i = i_Y = I_m \sin \omega t$ . Якщо  $\psi - \varphi > 0$ , то буде перехідний режим. Якщо  $\psi - \varphi = 90^\circ$ , то  $i_B$  буде максимальним. Значення ударного струму перехідного процесу може становити  $2I_m$ .

Метод розрахунку перехідних процесів в лінійних електричних колах, який базується на інтегруванні диференціальних рівнянь, що зв'язують струми і напруги кола, називається класичним.

### 12.3. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему кола (рис. 12.1), що складається з котушки індуктивності та резистора, підключених до джерела змінного струму.

2. Увімкнути схему. Спостерігати по осцилографу перехідний процес. Осцилограми напруги та струму котушки індуктивності на змінному струмі, коли перехідний процес присутній, навести на в звіті. Розрахувати початкову фазу таку, щоб перехідний процес був відсутній. Осцилограми напруги та струму котушки індуктивності при відсутньому перехідному процесі навести на окремому рисунку.



3. Розрахувати значення ударного і усталеного струмів, а результати розрахунку занести в звіт.

4. Вимкнути схему. Повторити дослід за п.2.

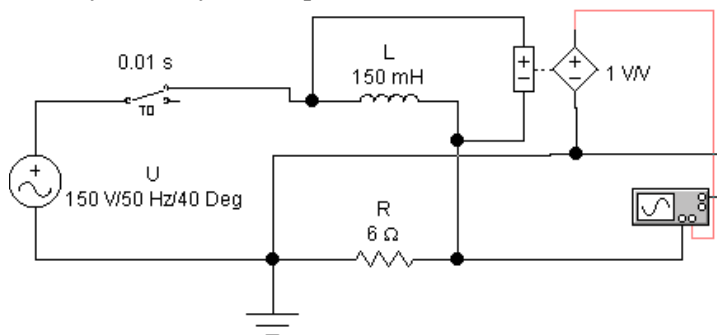


Рис. 12.1. Схема для дослідження перехідного процесу в RL-колі

Таблиця 12.1. Таблиця варіантів до роботи 12

Номер варіанту	U, В	L, мГн	R, Ом	$\Psi$ , град.
1	10	30	1	80
2	15	35	1.5	70
3	20	40	2	60
4	25	45	2.5	50
5	30	50	3	40
6	35	55	3.5	30
7	40	60	4	20
8	45	65	4.5	10
9	50	70	5	0
10	55	75	5.5	90
11	60	80	6	100
12	65	85	6.5	110
13	70	90	7	120
14	75	95	7.5	130
15	80	100	8	140
16	85	105	8.5	150
17	90	110	9	160
18	95	115	9.5	170
19	100	120	10	180
20	105	125	10.5	190



<b>21</b>	110	130	11	200
<b>22</b>	115	135	11.5	210
<b>23</b>	120	140	12	220
<b>24</b>	125	145	12.5	230
<b>25</b>	130	150	13	240

#### 12.4. Контрольні запитання

1. Як визначається вільна складова перехідного струму і напруги?
2. Як визначається примусова складова струму в колі?
3. Як знайти сталу часу RL-кола та тривалість перехідного процесу в такому колі?
4. Чи залежить вільна складова струму від початкової фази і якщо залежать, то як?





## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теоретичні основи електротехніки : Підручник. Т. 1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолوب, І. М. Чиженко. Київ: Політехніка, 2004. 272 с.
2. Гумен М. Б., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область : підручник. Київ : Вища школа, 2004. 358 с.
3. Основи теорії електронних кіл : підручник / Бобало Ю. Я., Мандзій Б. А., Стахів П. Г., Писаренко Л. Д., Якименко Ю. І. Львів: Магнолія Плюс, 2008. 332 с.
4. Паначевний Б. І., Свергун Ю. Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум. Підручник. Київ : Каравела, 2018. 296 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка і мікросхемотехніка: теорія і практикум. Навчальний посібник. Київ : Каравела, 2004. 236 с.
6. Основи теорії кіл : Підручник / Ю. О. Коваль, Л. В. Гринченко, І. А. Мілютенко, А. І. Рибін. Харків: ХНУРЕ, Колегіум, 2004. 436 с.
7. Рудик А. В. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи №1 з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” для студентів спеціальності 141 ”Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної і заочної форм навчання. Рівне: НУВГП, 2016. 28 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/view/shufr/04-03-164.html>
8. Рудик А. В. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи №2 з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” для студентів спеціальності 141 ”Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка”. Рівне: НУВГП, 2016. 37 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/view/shufr/04-03-165.html>