

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

О. О. ПЕТРОВА

МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ
ELECTRONIC WORKBENCH

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Харків
ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
2018

УДК 004.4:004.94(075.8)

ПЗ0

Автор

Петрова Олена Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної математики і інформаційних технологій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рецензенти:

Чуб Ігор Андрійович, доктор технічних наук, професор, начальник кафедри ПШНП Національного університету цивільного захисту України;

Корсун Віктор Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури

Рекомендовано до друку Вченою радою ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, протокол № 6 від 25.01.2018.

Петрова О. О.

ПЗ0 Моделювання схем в програмному середовищі Electronic Workbench : навч. посібник / О. О. Петрова ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 128 с.

ISBN 978-966-695-459-9

У навчальному посібнику подано принципи роботи з електронною системою Electronics Workbench, яка призначена для схемотехнічного моделювання аналогових і цифрових схем. Видання вміщує основні відомості, інструкції, методики організації та проведення експериментів під час дослідження схем.

Для закріплення знань пропонуються детальні пояснення схем, стислі відомості з теорії елементів та пристроїв, контрольні питання, які орієнтують студентів на розуміння цілей експерименту.

Призначено для студентів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, а також усіх тих, хто цікавиться цими питаннями.

УДК 004.4:004.94(075.8)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 Загальні положення.....	5
2 Інтерфейс програми.....	7
2.1 Рядок меню.....	7
2.2 Панель інструментів.....	22
2.3 Стрічка інструментів з вкладками умовних позначень компонентів елементної бази.....	22
3 Склад бібліотек компонентів та їхня стисла характеристика	23
4 Лабораторні роботи.....	64
Лабораторна робота 1 Моделювання простої електричної схеми та аналіз її роботи.....	64
Лабораторна робота 2 Дослідження електричних коливальних процесів у простих колах.....	74
Лабораторна робота 3 Визначення АЧХ та ФЧХ.....	78
Лабораторна робота 4 Напівпровідниковий діод.....	89
Лабораторна робота 5 Дослідження параметричного стабілізатора напруги.....	97
Лабораторна робота 6 Дослідження компенсаційного стабілізатора напруги.....	102
Лабораторна робота 7 Дослідження властивостей випрямних схем.....	104
Лабораторна робота 8 Операційний підсилювач.....	111
Лабораторна робота 9 Дослідження біполярного транзистора....	113
Лабораторна робота 10 Моделювання простих логічних схем...	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	127

ВСТУП

Аналіз стану програмного забезпечення по схемотехнічному моделюванню довів, що на етапі початкового освоєння методів автоматизованого проектування та на етапах проведення пошуково-дослідницьких робіт доцільно використовувати програмне середовище Electronics Workbench (далі EWB), яке легко засвоюється та досить зручне в роботі.

Програма Electronics Workbench розроблена фірмою National Instruments Electronics Workbench Group і використовується для схемотехнічного моделювання аналогових та цифрових радіоелектронних пристроїв різного призначення та дає змогу простими засобами будувати на екрані монітора аналогову або цифрову електронну схему, підключати електро- та радіовимірювальні прилади та отримувати результати або в вигляді цифрових даних на моніторах вимірювальних приладів або на логічному аналізаторі [1]. Порівняння отриманих результатів із розрахунковими на реальних приладах є дуже добрим.

Електронна система моделювання імітує реальне робоче місце дослідника-лабораторію, яка обладана вимірювальними приладами, що працюють у реальному часі. За допомогою системи можна моделювати як прості, так і складні аналогові та цифрові пристрої.

Для роботи з системою необхідні:

- знання та розуміння принципів роботи основних вимірювальних приладів (осцилограф, мультиметр тощо);
- знання окремих елементів радіоелектронних пристроїв.

Робота з електронною системою моделювання включає в себе три головні етапи: створення схеми, вибір та підключення вимірювальних приладів та активацію схеми – розрахунок процесів, які перебігають у пристрої, що досліджується.

Процес створення схеми починається з розміщення на робочому полі програми компонентів із бібліотеки програми [2].

Особливістю програми EWB є наявність контрольно-вимірювальних приладів, які за зовнішнім виглядом, органам управління та характеристиками максимально наближені до їхніх промислових аналогів, що дає змогу отримати навички роботи з найпоширенішими приладами: мультиметром, осцилографом, вимірювальним генератором та іншими.

Студенти спеціальності «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» повинні добре знати фізичні засади комп'ютера, розуміти логічний взаємозв'язок всіх його функціональних блоків, взаємодію апаратного та програмного складників, щоб осмислено ставити та вирішувати складні практичні завдання. У кожній лабораторній роботі навчального посібнику наведені теоретичні положення за темою проведення роботи, практичні схеми, варіанти завдань для самостійного виконання роботи та докладний опис моделювання та аналізу схеми для кожного прикладу лабораторної роботи.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Система схемотехнічного моделювання Electronics Workbench призначена для моделювання та аналізу електричних та електронних схем та може аналізувати схеми на постійному і змінному струмі (режими АС та DC).

Для аналізу на постійному струмі визначається робоча точка схеми в сталому режимі роботи. Результати цього аналізу не відображаються на приладах, вони використовуються для подальшого аналізу схеми.

Аналіз на змінному струмі використовує результати аналізу на постійному струмі для отримання лінеаризованих моделей нелінійних компонентів. Аналізувати схеми у режимі АС можна як у тимчасовій, так і в частотній областях.

В Electronics Workbench можна досліджувати перехідні процеси за умови впливу на схеми вхідних сигналів різної форми. Програма також дає змогу аналізувати цифро-аналогові та цифрові схеми великої складності.

Electronics Workbench дає змогу розмістити схему так, щоб були чітко видно всі з'єднання елементів і одночасно вся схема цілком.

Програма використовує стандартний інтерфейс Windows і є сумісною з програмою P-SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), тобто надає можливість експорту та імпорту схем і результатів вимірювань в її різноманітні версії.

Найявні в програмі бібліотеки включають у себе великий набір широко поширених електронних компонентів, і є можливість підключення і створення нових бібліотек компонентів.

У бібліотеку компонентів програми входять пасивні елементи, транзистори, керовані джерела, керовані ключі, гібридні елементи, індикатори, логічні елементи, тригерні пристрої, цифрові й аналогові елементи, спеціальні комбінаційні та послідовні схеми.

Активні елементи можуть бути представлені моделями як ідеальних, так і реальних елементів. Можливо також створення своїх моделей елементів і додавання їх в бібліотеки елементів. Широкий набір приладів дає змогу вимірювати різні величини, задавати вхідні впливи, будувати графіки [3].

Усі прилади зображуються у вигляді, максимально наближеному до реального, тому працювати з ними просто і зручно. Результати моделювання можна вивести на принтер або імпортувати в текстовий або графічний редактор для їх подальшої обробки.

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

Electronics Workbench дає змогу будувати схеми різного ступеня складності за допомогою таких операцій:

- вибір елементів і приладів із бібліотек;
- переміщення елементів і схем у будь-яке місце робочого поля;

- поворот елементів і груп елементів на кути, кратні 90°;
- копіювання, вставлення або видалення елементів, груп елементів, фрагментів схем і цілих схем;
- зміна кольору дротів;
- виділення кольором контурів схем для зручнішого сприйняття;
- одночасне приєднання декількох вимірювальних приладів і спостереження їхніх показань на екрані монітора;
- присвоєння елементу умовного позначення;
- зміна параметрів елементів у широкому діапазоні.

Усі операції проводяться за допомогою миші та клавіатури. Управління тільки з клавіатури неможливо.

Шляхом налаштування приладів можна виконати таке:

- змінювати шкали приладів залежно від діапазону вимірювань;
- задавати режим роботи приладу;
- задавати вигляд вхідних впливів на схему (постійні й гармонійні струми і напруги, трикутні та прямокутні імпульси).

Графічні можливості програми дають змогу:

- одночасно спостерігати декілька кривих на графіку;
- відображати криві на графіках різними кольорами;
- вимірювати координати точок на графіку;
- імпортувати дані в графічний редактор, що дає змогу зробити необхідні перетворення схеми та виведення її на принтер.

Перед створенням креслення принципової схеми за допомогою програми EWB необхідно виконати таке:

- підготувати на аркуші паперу її ескіз із приблизними розташуванням компонентів та з урахуванням можливості оформлення окремих фрагментів у вигляді підсхем;
- ознайомитися з бібліотекою готових схем програми.

Загалом процес створення схеми починається з розміщення на робочому полі програми компонентів із бібліотеки програми відповідно до підготовленого ескізу.

Після розміщення компонентів виконується з'єднання їхніх виводів за допомогою дротів. Необхідно враховувати, що до виводу компонента можна підключити тільки один дріт.

За необхідності підключення до цих виводів інших дротів використовується точка (символ з'єднання), яку можна використати не тільки для підключення дротів, але й для введення надписів. Для цього необхідно двічі натиснути на точці та в вікні, що відкриється, увести необхідний запис.

Для підключення контрольно-вимірювальних приладів доцільно використовувати кольорові дроти.

Після підготовки схеми рекомендується скласти її опис (**меню Windows/Description**), в якому вказати призначення схеми.

Після складання схеми та її спрощення шляхом оформлення підсхем моделювання починається натисканням вимикача [3].

2 ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМИ

На рисунку 2.1 наведено інтерфейс програми, який складається з рядка заголовка, рядка меню, панелі інструментів, стрічки інструментів із вкладками умовних позначень компонентів (бібліотека елементів програми) та робочого поля.



Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми Electronics Workbench

У бібліотеки елементів програми Electronics Workbench входять аналогові, цифрові й цифро-аналогові компоненти. Можна виокремити такі вкладки (групи): джерела, базові компоненти, діоди, транзистори, логічні компоненти тощо.

2.1 Рядок меню

Меню File призначено для збереження, завантаження файлів, отримання твердої копії обраних для друку складників схеми, а також для імпорту/експорту файлів у формати інших систем моделювання та програм розроблення печатних плат.

Команди New, Open, Save, Save as є типовими для Windows командами роботи з файлами.

Команда Revert to Saved... призначена для знищення всіх змін, які внесені в поточному сеансі редагування, та відновлення схеми в початковому вигляді.

Команди Import/Export забезпечують можливість обміну даних із програмою розроблення печатних плат EWB Layout.

Команда Print (CTRL + P) надає вибір даних для виведення на принтер та має такі опції:

- *Schematic* – схеми (опція включена за замовчуванням);
- *Description* – опис до схеми;
- *Part list* – перелік документів, які виводяться на друк;
- *Label list* – перелік позначень елементів схеми;
- *Model list* – перелік компонентів, які є наявними в схемі;
- *Subcircuits* – підсхеми, що є частиною схеми, є закінченими функціональними вузлами та позначаються прямокутниками з назвою всередині;
- *Analysis options* – перелік режимів моделювання;
- *Instruments* – перелік приладів.

Команда `Print Setup` забезпечує налаштування принтера.

Команда `Exit` призначена для виходу з програми.

Команда `Install` забезпечує установлення додаткових програм із жорсткого диска.

Команда `Export to PCB` призначена для складання списків з'єднань схеми у форматі `OrCAD` та інших програм розроблення печатних плат.

Команда `Import from SPICE` забезпечує імпорт текстових файлів опису схеми та завдання на моделювання у форматі `SPICE` (з розширенням `.cir`) та автоматичної побудови схеми за її текстовим описом.

Команда `Export to SPICE` необхідна для складання текстового опису схеми та завдання на моделювання у форматі `SPICE` (`Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis`) програми схемотехнічного моделювання.

Під час виконання команди `Export` завантажується текстовий файл із вказаним ім'ям. Тестовий файл вміщує опис джерел живлення, перелік резисторів, конденсаторів, транзисторів, що входять до складу схеми, указуються підключення між вузлами котушок індуктивності, наводяться імена міток та параметри директиви розрахунку перехідних процесів.

Під час виконання команди `Import` у програмі будується принципова схема.

Меню Edit дає змогу редагувати схеми та копіювати екран. Команди `Cut`, `Copy`, `Paste` та `Show Clipboard` призначені для вирізання, копіювання, вставлення та перегляду змісту буферу обміну.

Команда `Delete` знищує виокремлену частину схеми.

Команда `Select All` призначена для виділення всієї схеми.

Команда `Copy as Bitmap` копіює екран.

Меню Circuit використовується під час підготовки схем.


Команда `Rotate` (`Ctrl + R`) забезпечує обертання виокремленого компонента, яке виконується проти часової стрілки на 90° при кожному виконанні програми. Для вимірювальних приладів (амперметр, вольтметр тощо) міняються місцями клеми підключення. Цю команду доцільно використовувати на етапі підготовки схем, а не в готовій схемі.

Команда `Flip Horizontal` та `Flip Vertical` призначені для керування розташуванням графічного зображення компонентів: дзеркальне відображення компонентів за горизонталлю та вертикаллю відповідно.

Команда `Component Properties` дає змогу ввести позиційне позначення виокремленого компонента, змінити номінальне значення параметра компонента за допомогою діалогового вікна та обрати модель компонента (напівпровідникового приладу, операційного посилювача, трансформатора тощо). У меню останньої команди обирають:

- перелік бібліотек, в яких містяться компоненти обраного типу;
- перелік моделей компонентів обраної бібліотеки;

– можливість створення нової бібліотеки.

Команда *Component Properties* дає змогу продивитися та змінити властивості вибраного компоненту. Команду можна виконати шляхом натискання на піктограмі . Далі відкривається діалогове вікно з такими вкладками:

- вкладка *Label* – позиційне позначення компонентів, яке в подальшому використовується під час виконання команд **меню Analysis**;
- вкладка *Value* – номінальний опір компонента (резистора), значення лінійного (TC1) та квадратичного (TC2) температурних коефіцієнтів опору.

Дійсний опір резистора R_d визначається за формулою

$$R_d = R[1 + TC1(T - T_n) + TC2(T - T_n)^2],$$

де R – номінальний опір резистора;

T_n – номінальна температура, $T_n = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$;

T – поточне значення температури резистора.

Команда *Create Subcircuit* (Ctrl + B) забезпечує перетворення попередньо виокремленої частини схеми в підсхему. Унаслідок виконання команди викликається діалогове вікно, у рядку *Name* якого необхідно ввести ім'я підсхеми, після чого необхідно обрати варіанти (рис. 2.2):

- підсхема копіюється з указаною назвою в бібліотеку без внесення змін у початкову схему;
- виокремлена частина вирізається із загальної схеми та у вигляді підсхеми з привласненим ім'ям копіюється в бібліотеку;
- виокремлена частина замінюється в початковій схемі підсхемою із привласненим їй ім'ям з одночасним копіюванням у бібліотеку.

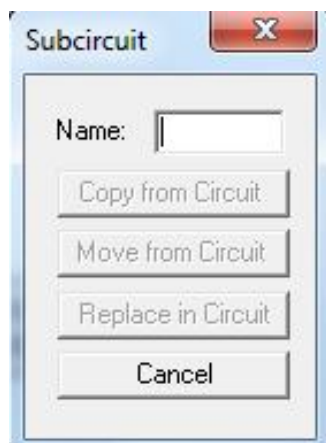


Рисунок 2.2 – Створення підсхеми

Команди *Zoom In/Zoom Out* виконують масштабування схеми із зазначенням масштабу в діапазоні 50–200 %. Ці команди можна виконати за допомогою мнемонічних засобів зі стандартними позначеннями.

Команда *Schematic Options* включає:

- 1) вкладку *Grid* для відтворення сітки для зручності створення схем;
- 2) вкладку *Show/Hide* для відображення інформації про відтворення сітки на екрані та відображення позиційних позначень компонентів;
- 3) вкладку *Fonts* для показу позиційних позначень компонентів (наприклад C1, C2 для конденсаторів), найменування моделі компонентів, показу номіналів компонентів, наприклад резисторів;
- 4) вкладку *Wiring* з опціями:
 - прокладка дротів на схемі та організації їх взаємного з'єднання (*Routing options*);
 - знищення дротів із з'єднань (*Rewiring options*);
 - автоматичне знищення з'єднань, які не використовуються, наприклад дублюють один одного (*Auto-delete connectors*);
- 5) вкладку *Printing* для встановлення масштабу інформації, яка виводиться на принтер (рис. 2.3).

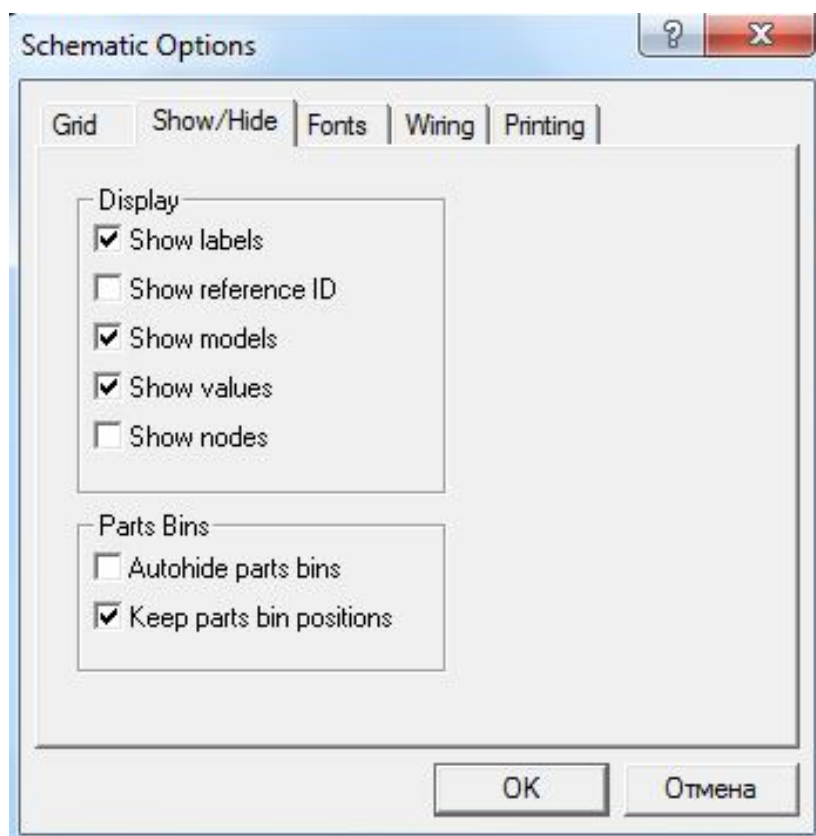


Рисунок 2.3 – Вкладки команди *Schematic Options*

Меню Analysis використовується під час підготовки схем, а також для завдання параметрів моделювання.

У найзагальнішому вигляді процес моделювання в програмі зводиться до такого.

1. Після запуску моделювання дані схеми, що моделюється, зчитиваються програмою (з екрану монітору).

2. Компоненти замінюються їхніми математичними моделями та складається система лінійних, нелінійних або диференціальних рівнянь за методом, який є аналогічним до методу вузлових потенціалів.

3. Система рівнянь (матриця) перетворюється в дві трикутні: нижнього та верхнього рівнів (на зразок методу послідовного виключення змінних Гауса).

4. Для знаходження коренів (потенціалів V_i у кожній nodі) використовується метод Ньютона – Рафсона, який реалізує формулу

$$V_{n+1} = V_n - F(V_n)/F'(V_n),$$

де V_{n+1} , V_n – значення потенціалів в i -й точці схеми на поточному та попередньому кроці ітерації;


$F(V_n)$, $F'(V_n)$ – відповідна функція від V та її похідна.

Ноди – це точки з'єднання виводів двох і більше компонентів.

Меню Analysis призначено для керування процесом моделювання та включає такі команди.

Команда Activate (Ctrl + G) призначена для запуску моделювання.

Команда Pause (F9) забезпечує переривання моделювання.

Команда Stop (Ctrl + T) зупиняє моделювання. Команду можна виконати за допомогою піктограми .

Команда Analysis Options (Ctrl + Y) забезпечує вибір режимів моделювання в діалоговому вікні зі встановленням опцій, які згруповані на таких вкладках (рис. 2.4).

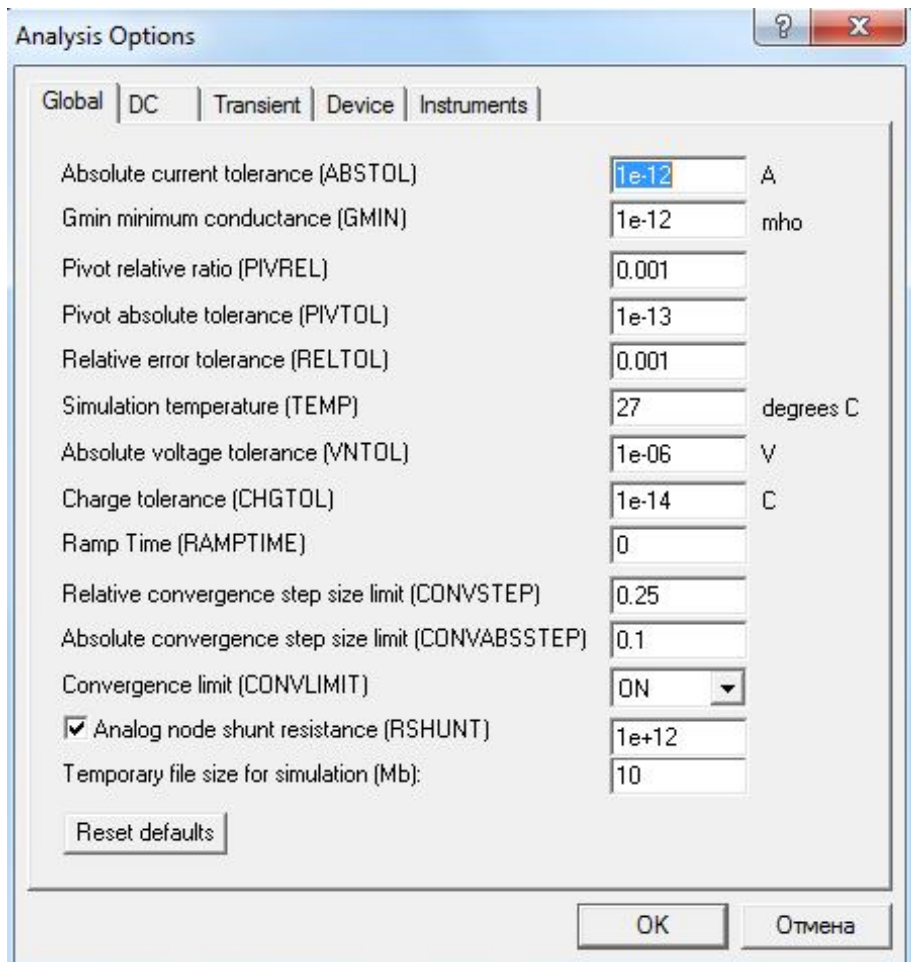


Рисунок 2.4 – Вкладки команди Analysis Options

Вкладка *Global* команди Analysis Options забезпечує налаштування загального значення, параметри якого мають такі призначення (рис. 2.4).

– *ABSTROL* – абсолютна помилка розрахунку струмів. Якщо струми в схемі, яка моделюється, істотно більше вказаного значення ($1e-12$), то з метою підвищення швидкодії значення *ABSTROL* доцільно збільшити згідно з необхідною похибкою розрахунку (наприклад з урахуванням розрядності мультиметру).

– *GMIN* – мінімальна провідність гілки кола. Вказане значення ($1e-12$) змінювати не рекомендується. Збільшення *GMIN* додатньо позначається на збіжності рішення при одночасному зниженні точності моделювання. Цей параметр використовується у разі підключення додаткового *Gmin stepping* алгоритму.

– *PIVREL*, *PIVTOL* – відносна та абсолютна величина елемента рядка матриці вузлових провідностей для його виділення як провідний елемент. Уведення такого елемента в випадку методу Гауса дає змогу підвищити точність проміжних обчислень і, відповідно, зменшити загальну кількість ітерацій. Установлені за замовчуванням значення параметрів змінювати не рекомендується.

– *RELTOL* – відносна помилка моделювання, впливає на збіжність рішення та швидкість моделювання. Значення, що рекомендуються, є від 10^2 до 10^6 .

– *TEMP* – температура, за якої проводиться моделювання.

– *VNTOL* – абсолютна помилка розрахунку напруги.

– *CHGTOL* – абсолютна помилка розрахунку зарядів. Установлені за замовчуванням значення параметрів змінювати не рекомендується.

– *RAMPTIME* – початкова точка відліку часу у процесі аналізу перехідних процесів.

– *CONVSTEP*, *CONVABSSTEP* – відносний та абсолютний розмір автоматично контрольованого кроку ітерацій у процесі розрахунку режиму по постійному струму.

– *CONVLIMIT* – включення або виключення додаткових засобів, які вбудовані в моделі деяких компонентів, для забезпечення збіжності ітераційного процесу.

– *RSHUNT* – опір витoku для всіх нод відносно загальної шини (заземлення). При повідомленнях про помилки «No DC path to ground» (погане заземлення кола) та «Matrix is nearly singular» (матриці дуже близькі, матриці L - та U_p -рівней) значення параметру знаходиться в межах 10^6 – 10^9 Ом.

– *Temporary* – обсяг дискової пам'яті для зберігання тимчасових файлів (Мбайт). У разі складних кіл значення параметру збільшується.

Кнопка `Reset defaults` призначена для встановлення значень параметрів за замовчуванням та використовується в тому разі, якщо після редагування необхідно повернутися до початкових даних.

Вкладка *DC* команди `Analysis Options` забезпечує налаштування для розрахунку режиму по постійному струму (статичний режим) за допомогою діалогового вікна (рис. 2.5), параметри якого мають такі призначення:

– *ITLI* – максимальна кількість ітерацій приблизних розрахунків;

– *GMINSTEPS* – розмір збільшення провідності у відсотках від *GMIN* (використовується за умови слабкої збіжності ітераційного процесу);

– *SRCSTEPS* – розмір збільшення напруги живлення у відсотках від його номінального значення у разі варіації напруги живлення (використовується за умови слабкої збіжності ітераційного процесу).

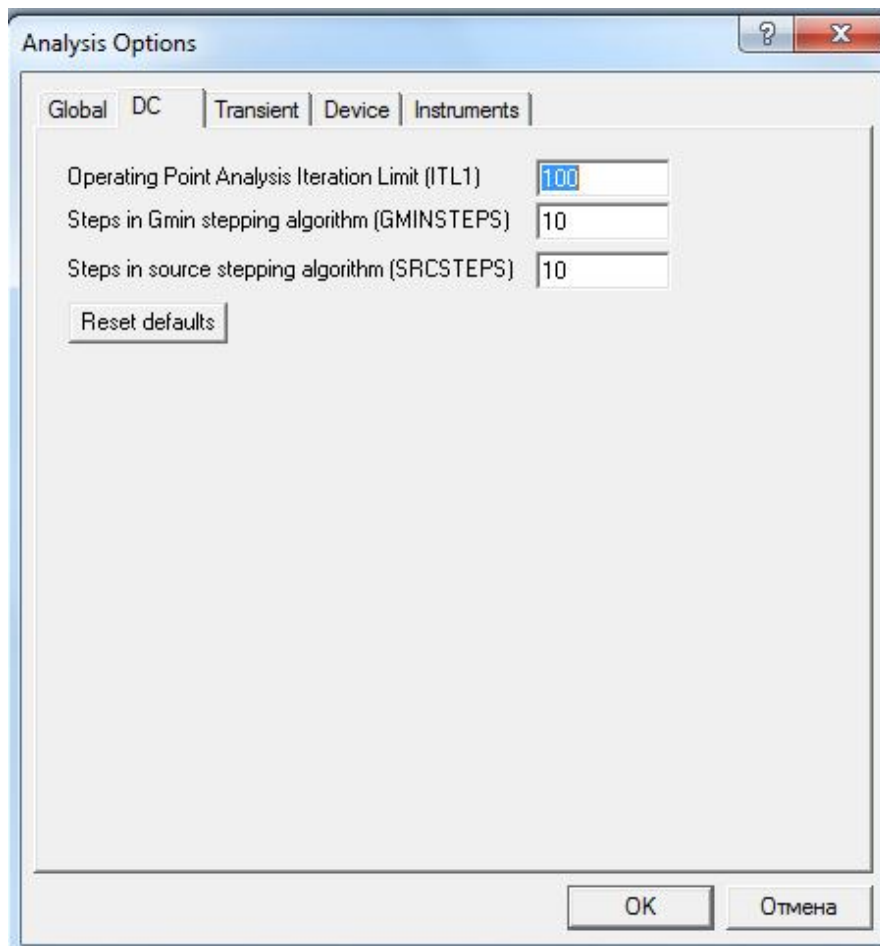


Рисунок 2.5 – Вкладка DC команди Analysis Options

Вкладка *Transient* команди Analysis Options налаштовує параметри режиму аналізу перехідних процесів (рис. 2.6).

Параметри цієї вкладки мають такі призначення:

- *ITL4* – максимальна кількість ітерацій для розрахунку однієї точки перехідних процесів;
- *METHOD* – метод приблизного інтегрування системи диференціальних рівнянь;
- *TRAPEZOIDAL* – метод Ейлера;
- *GEAR* – метод Гіра;
- *TRTOL* – константа, яка визначає точність розрахунків;
- *ACCT* – дозвіл на виведення повідомлення про процес моделювання.

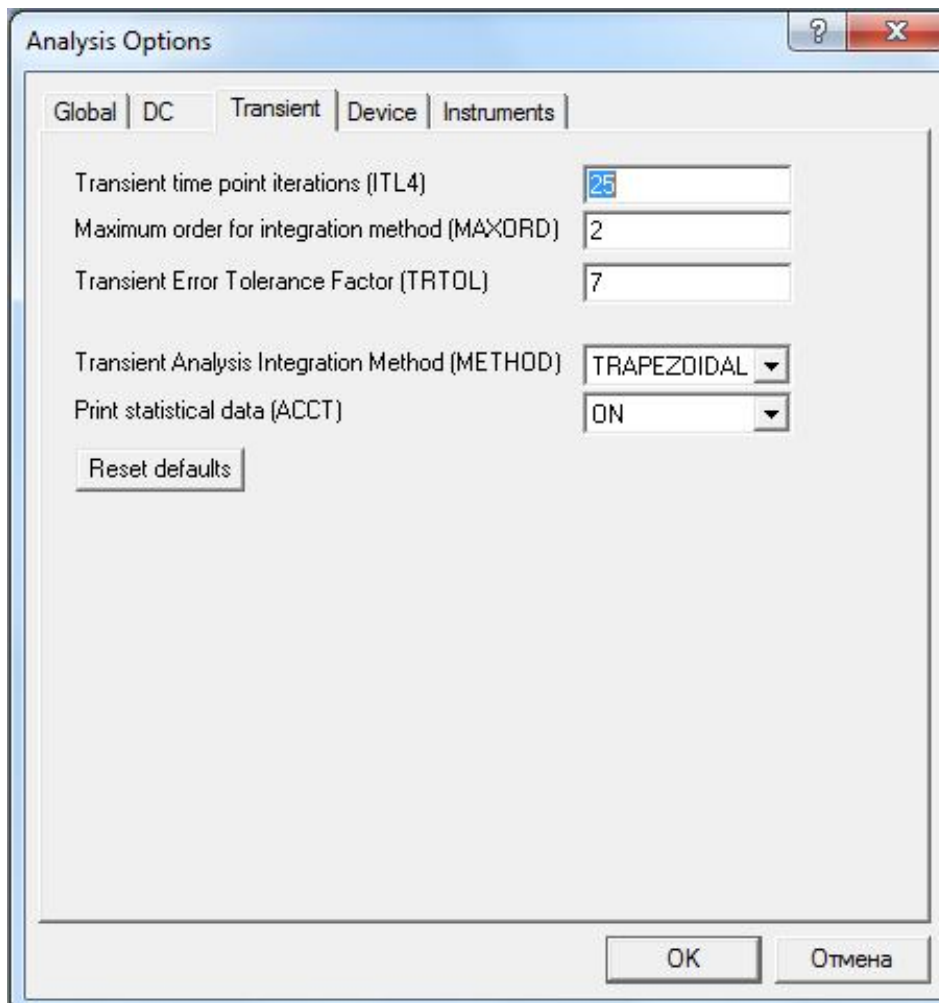


Рисунок 2.6 – Вкладка *Transient* команди Analysis Options

Вкладка *Device* команди Analysis Options (рис. 2.7) дає змогу обрати МОП-транзистори.

Параметри цієї вкладки мають такі призначення:

- *DEFAD* – площа дифузійної області стоку, m^2 ;
- *DEFAS* – площа дифузійної області витoku, m^2 ;
- *DEFL* – довжина каналів польового транзистора, м;
- *DEFW* – ширина каналу, м;
- *TNOM* – номінальна температура компонента;
- *BYPASS* – вмикання або вимикання нелінійної частини моделі компонента;
- *TRYTOSCOMPACT* – вмикання або вимикання лінійної частини моделі компонента.

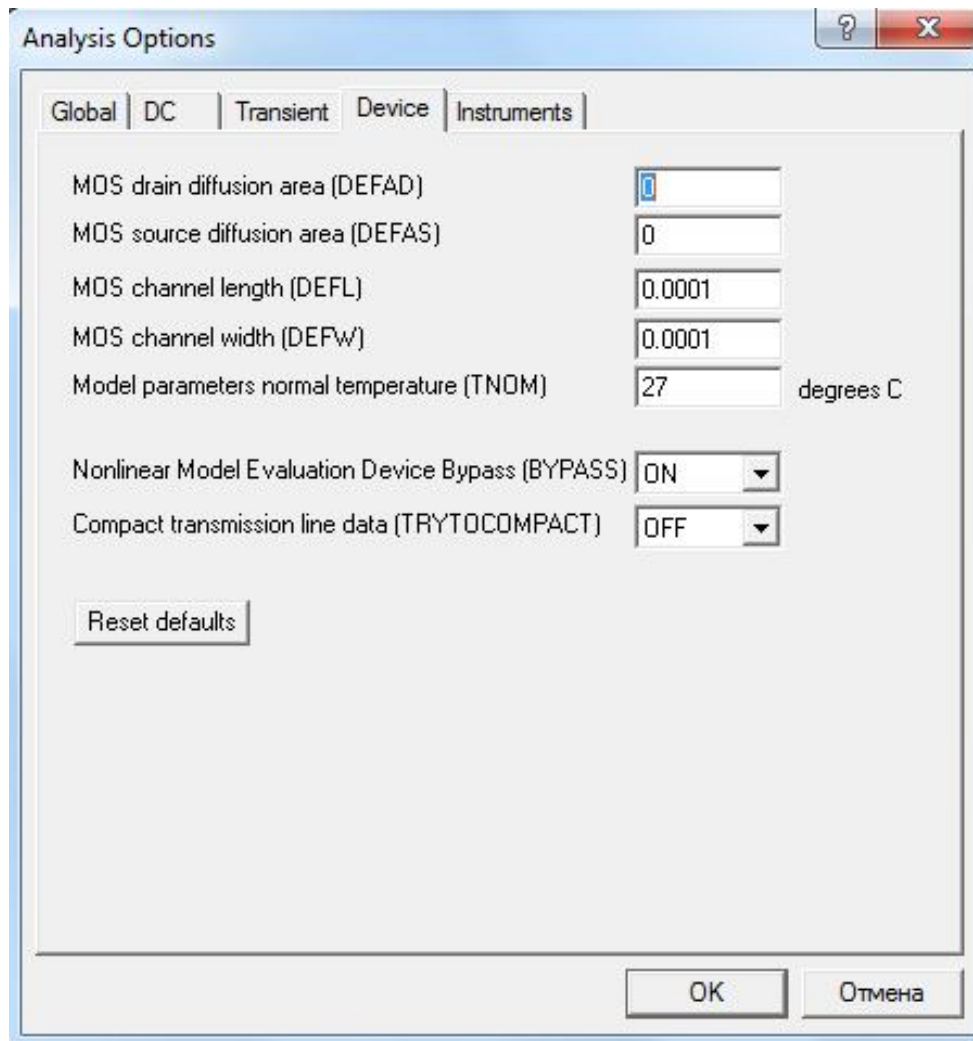


Рисунок 2.7 – Вкладка *Device* команди Analysis Options

Вкладка *Instruments* команди Analysis Options забезпечує налаштування параметрів контрольно-вимірювальних приладів і має такі параметри (рис. 2.8):

- *Pause after each screen* – тимчасове призупинення моделювання після заповнення екрана осцилографа;
- *Generate time steps automatically* – автоматичне установлення тимчасового кроку (інтервалу) виводу інформації на екран;
- *Minimum number of time points* – мінімальна кількість точок, що зображуються на екрані, за час спостереження (регістрації);
- *TMAX* – проміжок часу від початку до кінця моделювання;
- *Set to Zero* – установлення в поточний стан контрольно-вимірювальних приладів перед початком моделювання;
- *User-defined* – ручний пуск та зупинення процесу моделювання користувачем;
- *Calculate DC operating point* – виконання розрахунку режиму по постійному струму;

- *Points per cycle* – кількість точок, що відображаються, у разі виводу амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик (**Bode – plotter**);
- *Use engineering notation* – використання інженерної системи позначень одиниць вимірювання.

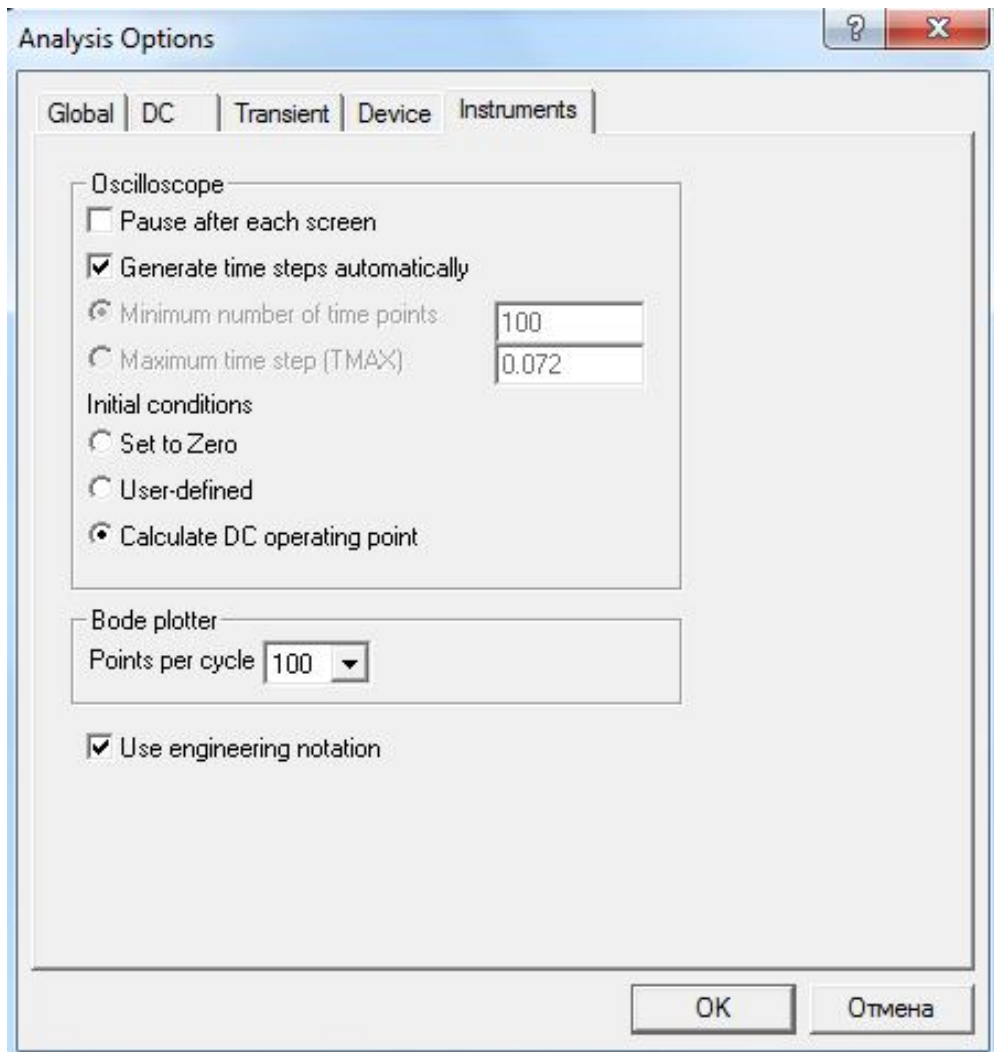


Рисунок 2.8 – Вкладка *Instruments* команди *Analysis Options*

Команда *DC Operating Point* дає змогу розрахувати режим по постійному струму. У цьому режимі зі схеми, яка моделюється, виключаються всі конденсатори (обрив кола) та закорочуються всі індуктивності.

Команда *AC Frequency* дає змогу розрахувати частотні характеристики (рис. 2.9). Виконання команди починається з налаштування в діалоговому вікні таких параметрів:

- *FSTART, FSTOP* – межі частотного діапазону (мінімальне та максимальне значення частоти);
- *Sweep type* – масштаб за горизонталлю;
- *Number of points* – число точок, що розраховуються;

- *Vertical scale* – масштаб за вертикаллю;
- *Nodes in circuit* – список усіх нод кола;
- *Nodes for analysis* – номери нод, для яких розраховуються характеристики схеми;
- *Simulate* – кнопка запуску моделювання.

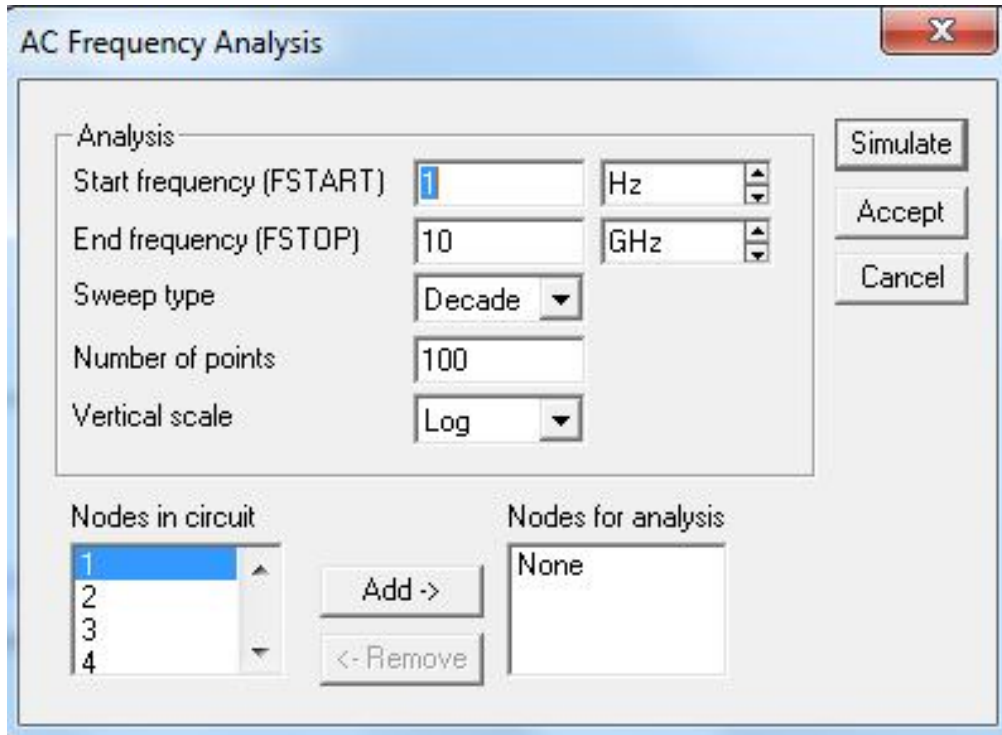


Рисунок 2.9 – Вікно вибору параметрів моделювання в режимі розрахунку частотних характеристик

Команда *Transient* розраховує перехідні процеси. Діалогове вікно команди має такі пункти (рис. 2.10):

- *Initial conditions* – установлення початкових умов моделювання;
- *Tstart* – час початку аналізу перехідних процесів;
- *Tstop* – час закінчення аналізу;
- *Generate time steps automatically* – розрахунок перехідних процесів зі змінним кроком;
- *Tstep* – тимчасовий крок виводу результатів моделювання на екран монітора.

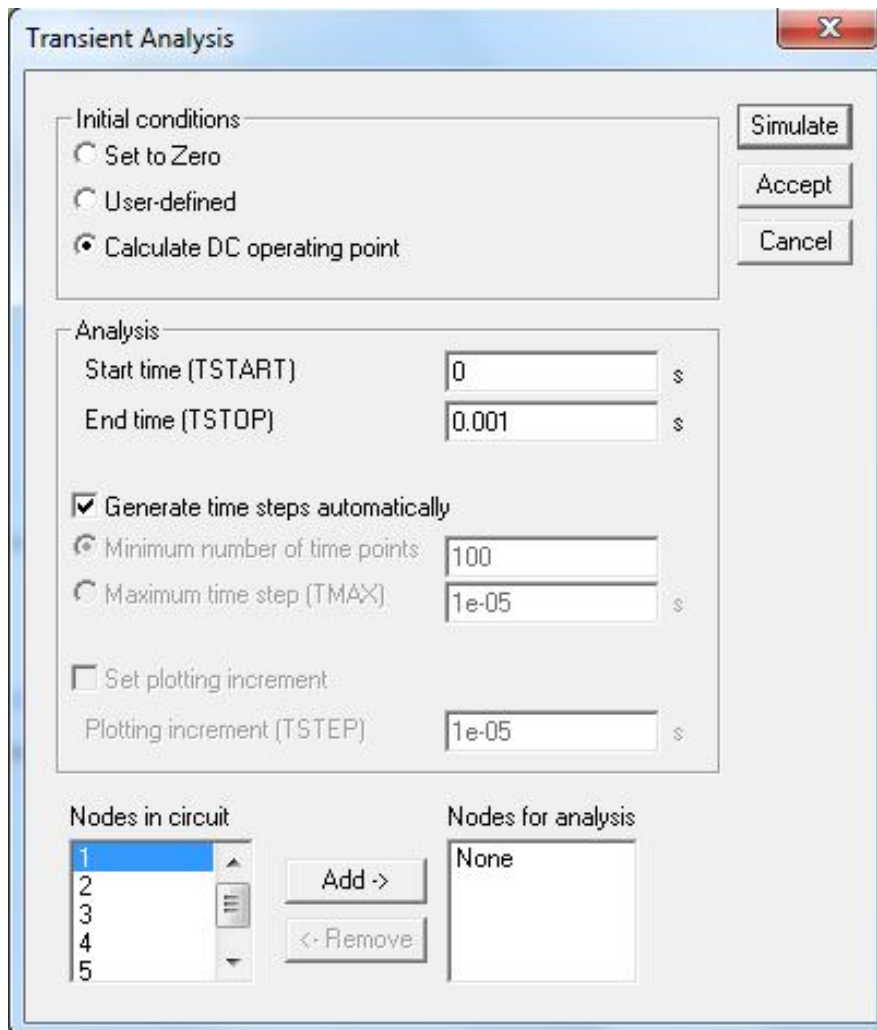


Рисунок 2.10 – Задання режимів моделювання перехідних процесів

Команда `Fourier` дає змогу проведення Фур'є-аналізу (спектрального аналізу). Діалогове вікно команди має такі пункти (рис. 2.11):

- *Output node* – номер контрольної точки (ноди), в якій аналізується спектр сигналу;
- *Fundamental frequency* – основна частота коливань (частота першої гармоніки);
- *Number harmonic* – кількість гармонік, які аналізуються;
- *Advanced* – набір опцій для визначення структури сигналу, який аналізується за допомогою додаткових можливостей;
- *Result* – виведення на екран розподілення фаз та амплітуд всіх гармонічних складових у вигляді безперервних функцій.

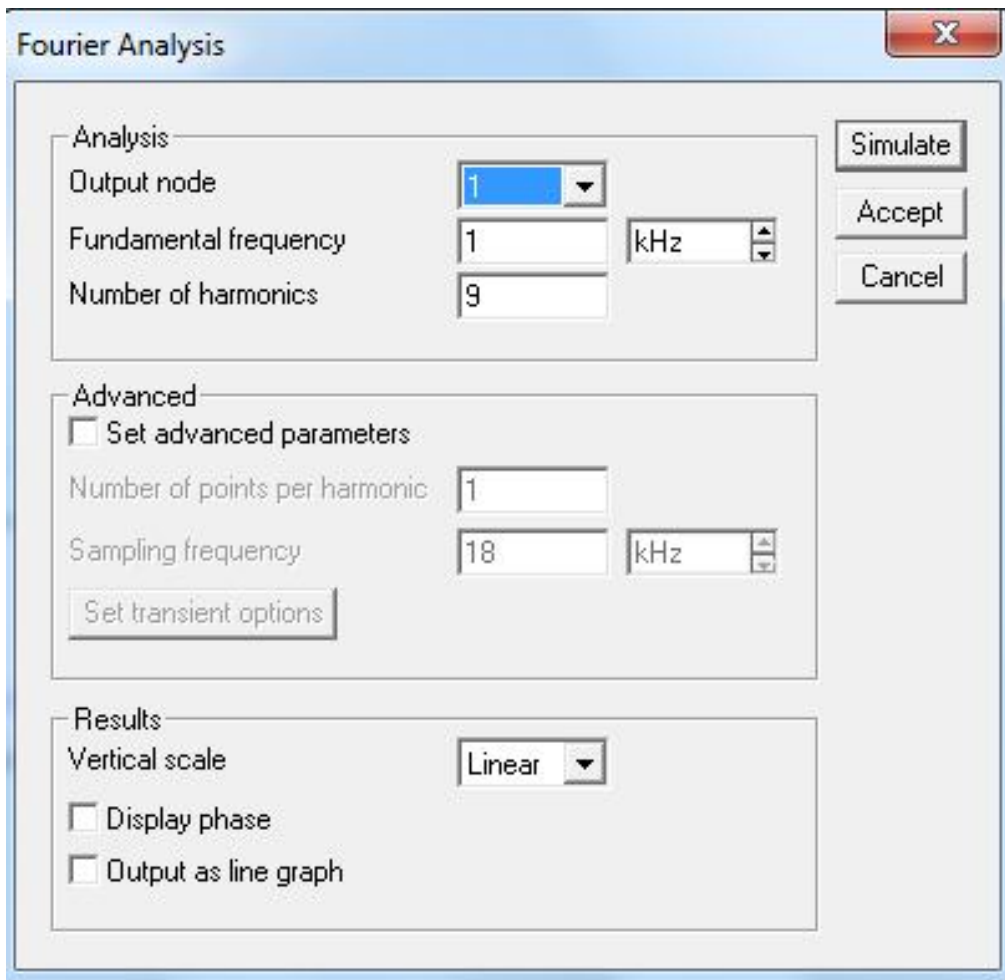


Рисунок 2.11 – Вікно установлення Фурье-аналізу

Команда Monte Carlo призначена для проведення статистичного аналізу за методом Монте-Карло (розрахунок чутливості та розкиду характеристик схеми при змінні параметрів компонентів). У діалоговому вікні (рис. 2.12) команди задаються такі параметри:

- *Number of runs* – кількість статистичних випробувань;
- *Seed* – початкові значення випадкової величини;
- *Distribution type* – закон розподілення випадкової величини: рівномірне та гаусове розподілення.

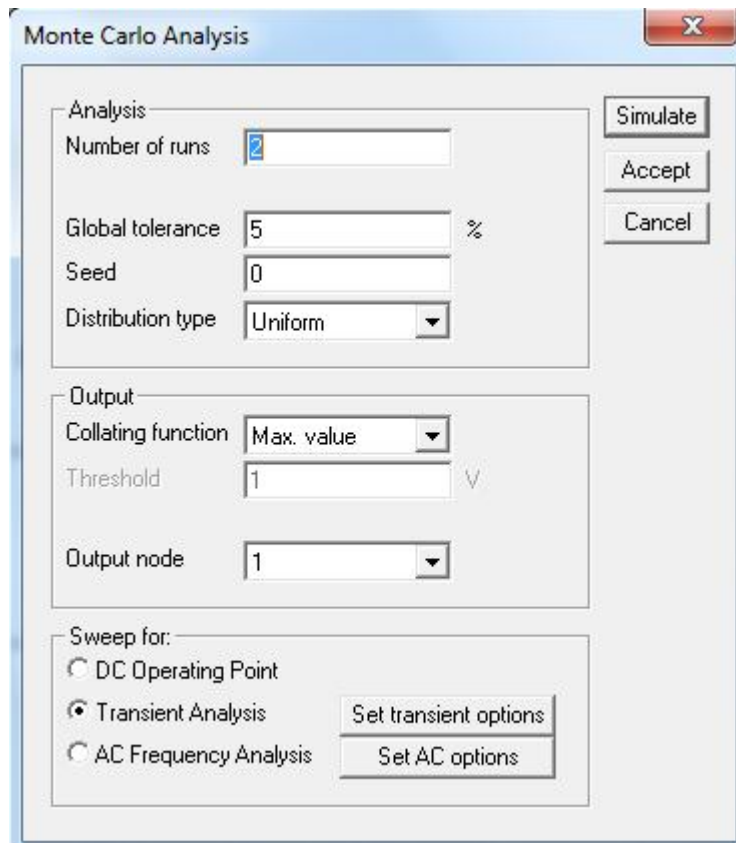


Рисунок 2.12 – Вікно установлення значень параметрів для розрахунку за методом Монте–Карло

За допомогою команди `Display Graphs` викликаються на екран графіки результатів виконання команд моделювання.

Меню Window уміщує такі команди:

- команда `Arrange` (`Ctrl + W`) призначена для упорядкування інформації в робочому вікні шляхом перезапису екрану, при цьому виправляються спотворення зображень компонентів та з'єднувальних дротів;
- команда `Circuit` призначена для виведення схеми на передній план;
- команда `Description` (`Ctrl + D`) призначена для виведення на передній план опису схеми (якщо воно є) або вікна-ярлика для його підготовки.

Меню Help побудовано стандартним для Windows способом і вміщує стислі відомості за всіма командами програми, бібліотечними компонентами та вимірювальними приладами, а також відомості про саму програму.

2.2 Панель інструментів

На панелі інструментів розташовані піктограми команд, які найчастіше використовуються (рис. 2.13).

Це стандартні для Windows-додатків команди створення нового файлу, відкриття та збереження наявного файлу, команди роботи з буфером обміну та отримання довідкової інформації.



Рисунок 2.13 – Піктограми команд, які найбільш часто використовуються

На панелі інструментів розташовані піктограми команд, які зазвичай використовуються в графічних середовищах: команди обертання та дзеркального відображення об'єктів, команди масштабування зображення.

Програма EWB також оперує командами створення підсхем, побудови графіків, змінення властивостей компонентів.


2.3 Стрічка інструментів з вкладками умовних позначень компонентів елементної бази

На стрічці інструментів розташовані вкладки з бібліотеками компонентів (рис. 2.14). У програмі реалізовані такі вкладки: **Favorites**, **Sources**, **Basic**, **Diodes**, **Transistors**, **Analog ICs**, **Mixed ICs**, **Digital ICs**, **Logic Gates**, **Digital Indicators**, **Controls**, **Miscellaneous**, **Instruments**.



Рисунок 2.14 – Стрічка інструментів із бібліотеками компонентів

3 СКЛАД БІБЛІОТЕК КОМПОНЕНТІВ ТА ЇХНЯ СТИСЛА ХАРАКТЕРИСТИКА

У вкладці **Favorites**  (допоміжні компоненти) розміщуються підсхеми, якщо вони є в півній схемі (у початковому стані розділ є пустим). Заповнення розділу моделями компонентів або підсхем виконується програмою автоматично одночасно з загрузкою схемного файлу та очищується після закінчення роботи з ним.

У вкладці **Sources** наведені джерела сигналів та деякі джерела, що є керованими (рис. 3.1).

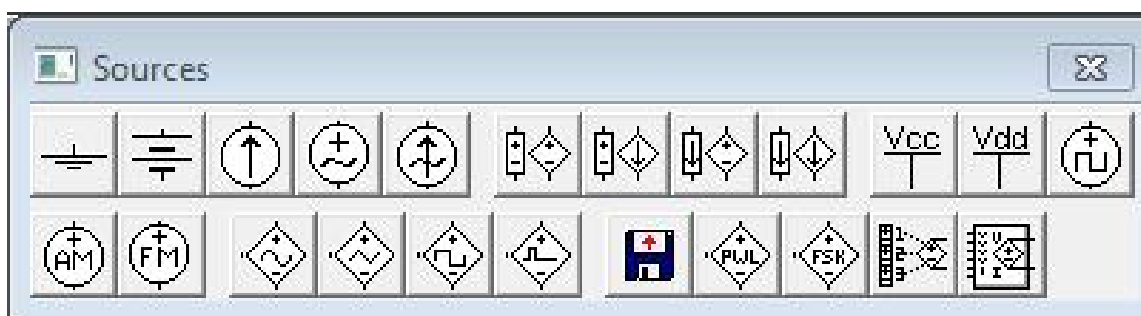
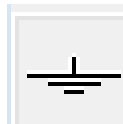


Рисунок 3.1 – Вкладка **Sources**



Ground – заземлення (мітка) – загальна точка схеми. Будь-які дві точки схеми, до яких підключено заземлення, вважаються з'єднаними між собою.

Не всі схеми потребують заземлення для моделювання, проте будь-яка схема, яка містить: операційний підсилювач, трансформатор, кероване джерело та осцилограф повинна бути обов'язково заземлена, інакше прилади не будуть проводити вимірювання або їхні показання виявляться неправильними.



Battery – батарея – джерело постійної напруги. Електрорушійна сила джерела постійної напруги або батареї вимірюється у вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Довга полоска на позначені батареї відповідає додатній клемі.

Власним опором батареї в Electronics Workbench, а також нестабільністю напруги батареї, спричиненої її розрядом, програма нехтує, тому, якщо необхідно використовувати дві паралельно підключені батареї, потрібно включити послідовно між ними невеликий опір, наприклад в 1 Ом.



DC Current Source – джерело постійного струму. Струм джерела постійного струму (direct current, **DC**) вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).



AC Voltage Source – джерело змінної синусоїдальної напруги (ефективне значення напруги, частота, фаза).

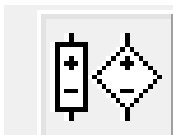
Діюче значення напруги джерела вимірюється в вольтах і задається похідними величинами (від мкВ до кВ). Є можливість установлення частоти та початкової фази.

Діюче значення напруги V_{RMS} , що виробляється джерелом змінної синусоїдальної напруги, обумовлюється його амплітудним значенням V_{PEAK} таким співвідношенням:

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



AC Current Source – джерело змінного синусоїдального струму (ефективне значення струму, частота, фаза). Діюче значення струму джерела вимірюється в амперах і задається похідними величинами (від мкА до кА).



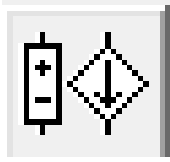
Voltage-Controlled Voltage Source – джерело напруги, яке кероване напругою (кероване джерело).

Відношення вихідної напруги до вхідної визначається коефіцієнтом пропорційності E , який задається такою формулою:

$$E = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} ,$$

де V_{OUT} – вихідна напруга джерела;

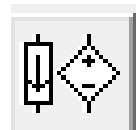
V_{IN} – вхідна напруга джерела.



Voltage-Controlled Current Source – джерело напруги, кероване струмом (кероване джерело). Передатний опір має розмірність опору, вимірюється в мОм, Ом і кОм і задається такою формулою:

$$H = \frac{V_{OUT}}{I_{IN}},$$

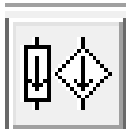
де V_{OUT} – вихідна напруга джерела;
 I_{IN} – вхідний струм джерела.



Current-Controlled Voltage Source – джерело струму, кероване напругою (кероване джерело). Відношення вихідного струму до керувальної напруги (коефіцієнт G) вимірюється в одиницях провідності (1/Ом або сіменс) і задається такою формулою:

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

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



Current-Controlled Current Source – джерело струму, кероване струмом (кероване джерело).

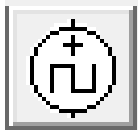
Вхідний і вихідний струми обумовлюються коефіцієнтом пропорційності F , який визначає відношення вихідного струму до струму в керувальній гілці і задається такою формулою:

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

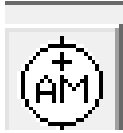
де I_{OUT} – вихідний струм джерела;
 I_{IN} – вхідний струм джерела.



+Vcc Voltage Source та **+Vdd Voltage Source** – джерела фіксованої напруги +5 та +15 В відповідно.



Clock – генератор однополярних прямокутних імпульсів (тактових імпульсів), який виробляє послідовність прямокутних імпульсів (амплітуда, частота, коефіцієнт заповнення). Відлік амплітуди імпульсів генератора виконується від виводу, який є протилежним виводу «+».



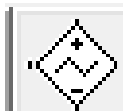
AM Source – генератор амплітудно-модульованих коливань (напруга та частота несучої, коефіцієнт та частота модуляції. На значку графічного зображення компонента коефіцієнт модуляції не вказано.



FM Source – генератор частотно-модульованих коливань (напруга та частота несучої, індекс та частота модуляції. На значку графічного зображення компонента індекс модуляції не вказано.



Voltage-Controlled Sine Wave Oscillator – джерело напруги синусоїдальної форми, кероване напругою.



Voltage-Controlled Triangle Wave Oscillator – джерело напруги трикутної форми, кероване напругою.



Voltage-Controlled Square Wave Oscillator – джерело напруги прямокутної форми, кероване напругою.



Controlled One-Shot – мультивібратор, що чекає.



Piecewise Linear Source – джерело напруги з кусково-лінійною залежністю сигналу, що генерується, від часу, який визначається зовнішнім файлом (ім'я файлу).



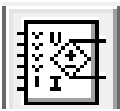
Voltage-Controlled Piecewise Linear Source – кусково-лінійне джерело напруги, кероване напругою.



Frequency-Shift-Keying Source – джерело синусоїдальних коливань із двома зумовленими частотами, вибір однієї з яких визначається зовнішнім сигналом (амплітуда, частота, частота).



Polynomial Source – поліноміальне джерело живлення (напруги) (коефіцієнти полінома).



Nonlinear Dependent Source – нелінійне джерело напруги (різновид нелінійної залежності).

Вкладка **Basic** – бібліотека базових компонентів, в якій зібрані всі пасивні компоненти та комунікаційні пристрої (рис. 3.2).

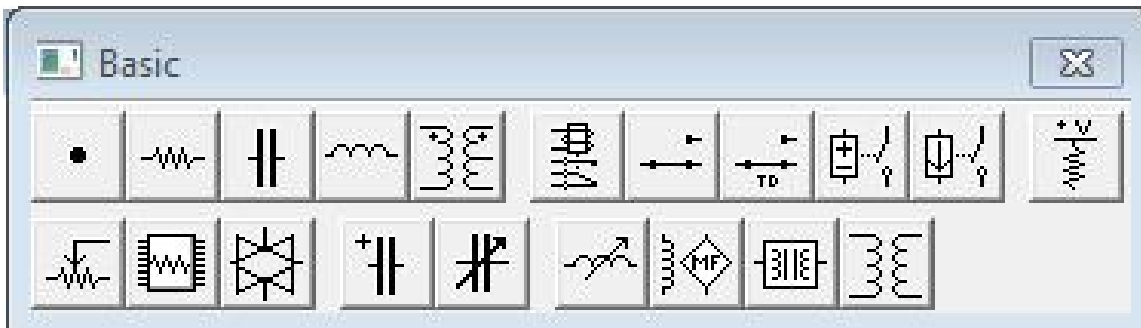


Рисунок 3.2 – Вкладка **Basic**



Connector – точка з'єднання використовується для з'єднання не більше чотирьох дротів та створення контрольних точок.

Точку з'єднання також можна використовувати для введення на схему надписів довжиною не більше ніж 14 символів. Для цього необхідно вставити на креслення точку та подвійним щикликом миші по точці викликати діалогове вікно, в якому і виконується відповідний напис (рис. 3.3).

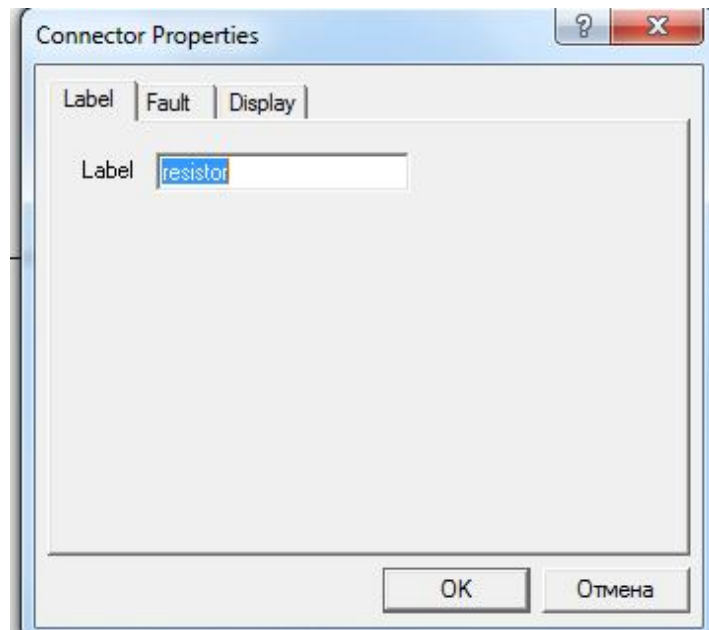
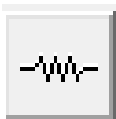
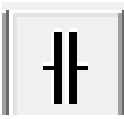


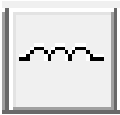
Рисунок 3.3 – Властивості точки з'єднання провідників



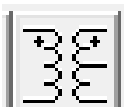
Resistor – опір резистора вимірюється в Омах і задається похідними величинами (від Ом до МОм).



Capacitor – конденсатор (ємність). Ємність конденсатора вимірюється у Фарадах і задається похідними величинами (від пФ до Ф).



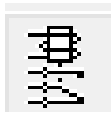
Inductor – котушка (індуктивність). Індуктивність котушки (дроселя) вимірюється в Генрі та задається похідними величинами (від мкГн до Гн).



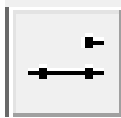
Transformer – трансформатор. У програмі користувачем задаються такі параметри трансформатора:

- коефіцієнт трансформації (Primary-to-secondary turns ratio n);
- індуктивність розсіювання (Leakage inductance L_e , Гн);
- індуктивність первинної обмотки (Magnetizing inductance L_m , Гн);
- опір первинної обмотки (Primary winding resistance R_p , Ом);
- опір вторинної обмотки Secondary winding resistance R_s , Ом).

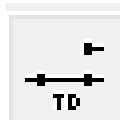
Програма моделює трансформатор тільки в тому разі, якщо обидві його обмотки (первинна і вторинна) заземлені.



Relay – реле.



Switch – перемикач на два положення, який керується шляхом натискання клавіші клавіатури, яка задається (за замовчуванням – клавіша пробіл).

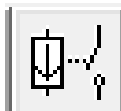


Time-Delay Switch – перемикач, який автоматично спрацьовує через заданий час на включення або вимикання (у секундах).



Voltage-Controlled Switch – керований напругою вимикач, який спрацьовує в заданому діапазоні вхідних напруг. Ключ, керований напругою, має два керувальних параметри: вмикальна (V_{on}) і вимикальна (V_{off}) напруги. Цей програмний пристрій замикає свої контакти, якщо напруга, що надходить на його вхід, більше або дорівнює V_{on} , і розмикає контакти, якщо напруга на його вході стає менше або дорівнює V_{off} .

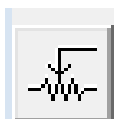
Напруга V_{on} і V_{off} визначається користувачем.



Current-Controlled Switch – вимикач, який спрацьовує в заданому діапазоні вхідних струмів. Ключ, керований струмом, працює аналогічно до ключа, керованого напругою. Коли струм через керувальні виводи перевищує струм включення I_{on} , ключ замикається; коли струм падає нижче струму виключення I_{off} – ключ розмикається.



Pull-Up Resistor – джерело постійної напруги з послідовно ввімкненим резистором (напруга, опір).



Potentiometer – потенціометр (пасивний компонент), параметри якого задаються за допомогою діалогового вікна (рис. 3.4).

Параметр *Key* визначає символ клавіатури (за замовчуванням R), унаслідок натискання якого опір зменшується на задану величину у відсотках або збільшується на таку ж величину (Shift + R).

Параметр *Resistance* визначає номінальне значення опору, а параметр *Setting* задає початкові налаштування опору у відсотках.

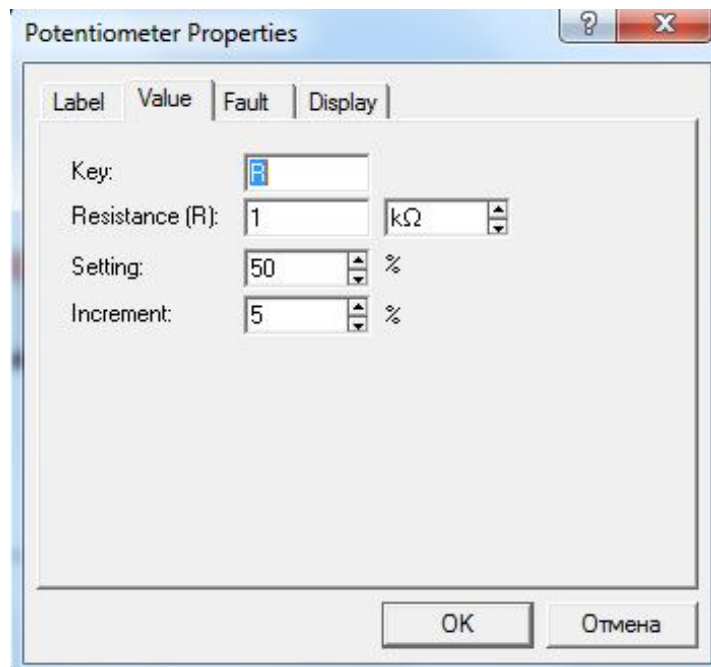


Рисунок 3.4 – Діалогове вікно задання параметрів потенціометра



Resistor Pack – збірка з восьми незалежних резисторів однакового номіналу (опір).



Polarized Capacitor – електролітичний конденсатор (ємність).



Variable Capacitor – конденсатор змінної ємності, який діє аналогічно до потенціометра.



Variable Inductor – котушка змінної індуктивності, яка діє аналогічно до потенціометра.

Вкладка **Diodes** (активні компоненти) вміщує напівпровідникові діоди (рис. 3.5).

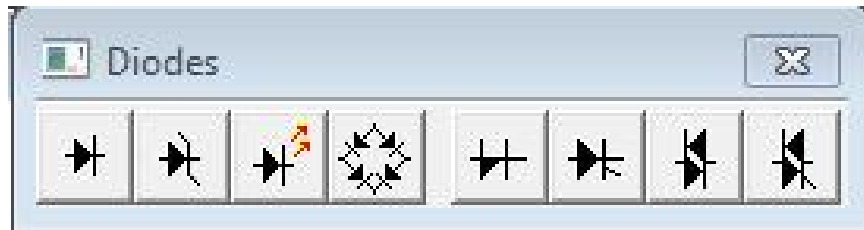
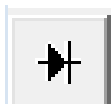


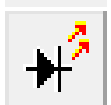
Рисунок 3.5 – Вкладка **Diodes**



Diode – напівпровідниковий діод. Струм через діод може протікати тільки в одному напрямі – від анода **A** до катода **K**.



Zener Diode – стабілітрон (діод Зеннера), який зазвичай використовують для стабілізації напруги. Для стабілітрона робочою є негативна напруга.



LED – світлодіод. Діоди LED випромінюють видиме світло, коли струм, який проходить через нього, перевищує порогову величину.



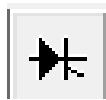
Full-Wave Bridge Rectifier – мостовий випрямляч призначений для випрямлення змінної напруги. При подачі на випрямляч синусоїдальної напруги середнє значення випрямленої напруги V_{dc} можна приблизно обчислити за формулою:

$$V_{dc} = 0,636(V_p - 1,4),$$

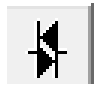
де V_p – амплітуда вхідної синусоїдальної напруги.



Shockley Diode – діод Шоклі – це напівпровідниковий діод, що має $p-n-p-n$ або $n-p-n-p$ структуру, у характеристиках якого є область негативного диференціального опору. Діод Шоклі на відміну від простого діода, знаходиться в відключеному стані доти, доки напруга на ньому не перевищить фіксованого рівня порогової напруги.



Silicon-Controlled Rectifier – тиристор або диністор (керований вентиль). У тиристора крім анодного та катодного виводів є додатковий вивід керувального електрода, який дає змогу керувати моментом переходу приладу в провідний стан.



Diac – симетричний диністор або діак. Диністор – це керований анодною напругою двонаправлений перемикач.



Triac – симетричний триністор або триак.

Вкладка **Transistors** (активні компоненти) уміщує біполярні та польові транзистори (рис. 3.6).

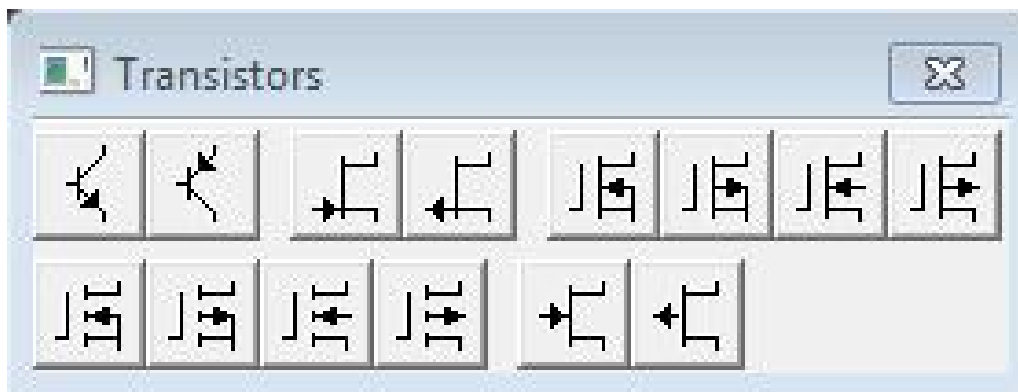


Рисунок 3.6 – Вкладка **Transistors**

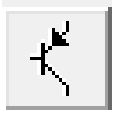
Біполярні транзистори є підсилювальними пристроями, керованими струмом, і можуть бути двох типів: *p-n-p* і *n-p-n*. Букви означають тип провідності напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений транзистор. У транзисторах обох типів стрілкою відзначається емітер, напрям стрілки вказує напрям протікання струму.



NPN Transistor – біполярні *n-p-n* транзистори, які мають дві *n*-області та одну *p*-область.

У пристроях автоматики і телемеханіки транзистор зазвичай використовують як електронний ключ. Найпоширенішою схемою включення транзистора є схема включення із загальним емітером. При такому схемному вирішенні роль ключа виконують обидва *p-n* переходи. У режимі «відкрито» обидва переходи повинні бути відкриті (режим насичення), у режимі «закрито» – закриті (режим відсічення).

Транзистори $n-p-n$ використовуються в тих випадках, коли сигналом до відкриття є перепад керувальної напруги від негативної до позитивної відносно загальної точки.



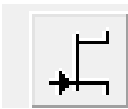
PNP Transistor – біполярні $p-n-p$ транзистори, які мають дві p -області та одну n -область.

Транзистори типу $p-n-p$ використовуються в тих випадках, коли сигналом до відкриття є перепад керувальної напруги від позитивної до негативної відносно загальної точки.

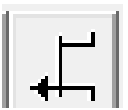
Польові транзистори керуються напругою на затворі, тобто струм, що протікає через транзистор, залежить від напруги на затворі.

Польовий транзистор включає в себе протяжну область напівпровідника n -типу або p -типу, яку називають каналом. Канал закінчується двома електродами, які називаються виток і сток. Крім каналу n - або p -типу, польовий транзистор включає в себе область із протилежним каналу типом провідності.

Польовий транзистор із керувальним $p-n$ переходом – це уніполярний транзистор, керований напругою, в якому для керування струмом використовується наведене електричне поле, яке залежить від напруги затвора.



N-Channel JFET – польові транзистори з керувальним $n-p$ переходом. В n -канальному польовому транзисторі затвор складається з p -області, яка оточена n -каналом.



P-Channel JFET – польові транзистори з керувальним $p-n$ переходом. У p -канальному польовому транзисторі затвор складається із n -області, оточеної p -каналом.

Польові транзистори на основі металооксидної плівки.

Керування струмом, що протікає через польовий транзистор на основі металооксидної плівки (**МОП-транзистор** або **MOSFET**), також здійснюється за допомогою електричного поля, що прикладається до затвора.

У Electronics Workbench є вісім типів МОП-транзисторів:

- чотири типи МОП-транзисторів зі вбудованим каналом;
- чотири типи МОП-транзисторів з індукованим каналом.

МОП-транзистор із вбудованим каналом.

Подібно польовим транзисторам із керувальним $p-n$ переходом, МОП-транзистор зі вбудованим каналом складається з протяжної області напівпровідника, яку називають каналом.

Для p -канального транзистора ця область є напівпровідником p -типу, для n -канального транзистора – n -типу.



3-Terminal Depletion N-MOSFET – трививідний n -канальний МОП-транзистор зі вбудованим каналом з'єднаними виводами підложки та стоку.



3-Terminal Depletion P-MOSFET – трививідний p -канальний МОП-транзистор зі вбудованим каналом з'єднаними виводами підложки та стоку.



4-Terminal Depletion N-MOSFET – чотирівивідний n -канальний МОП-транзистор зі вбудованим каналом із розподіленими виводами підложки та стоку.



4-Terminal Depletion P-MOSFET – чотирівивідний p -канальний МОП-транзистор зі вбудованим каналом із розподіленими виводами підложки та стоку.

МОП-транзистори з індукованим каналом не мають фізичного каналу між стоком і виток, як МОП-транзистори зі вбудованим каналом.

Замість цього область провідності може розширюватися на весь шар двоокису кремнію.

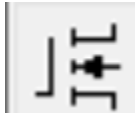
МОП-транзистор з індукованим каналом працює тільки за умови позитивної напруги сток - затвор.



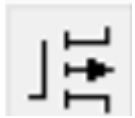
3-Terminal Enhancement N-MOSFET – трививідний n -канальний МОП-транзистор з індукованим каналом.



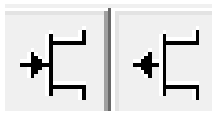
3-Terminal Enhancement P-MOSFET – трививідний *p*-канальний МОП-транзистор з індукованим каналом.



4-Terminal Enhancement N-MOSFET – чотирівивідний *n*-канальний МОП-транзистор з індукованим каналом.



4-Terminal Enhancement P-MOSFET – чотирівивідний *p*-канальний МОП-транзистор з індукованим каналом.



N-Channel GaAsFET та **P-Channel GaAsFET** – арсенід-галієві польові транзистори. Як їхню математичну модель використовують модель Куртиса, модель Рейтеона та TriQuint модель.

Вкладка **Analog ICs** (активні компоненти) вміщує аналогові мікросхеми (рис. 3.7).

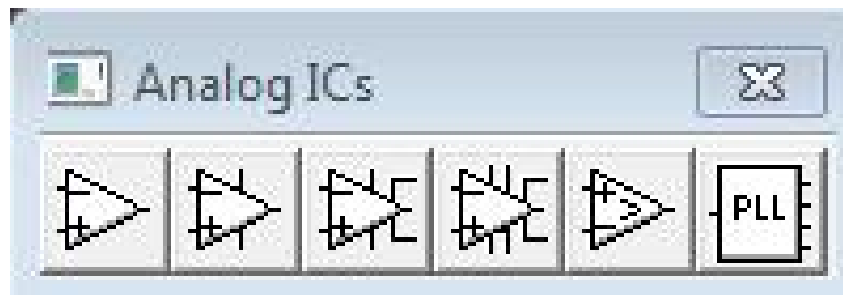
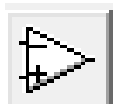
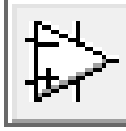


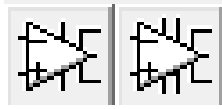
Рисунок 3.7 – Вкладка **Analog ICs**



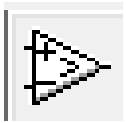
3-Terminal Opamp – лінійна модель операційного підсилювача. Операційний підсилювач – це підсилювач, який призначений для роботи зі зворотним зв'язком. Модель операційного підсилювача дає змогу задавати такі параметри: коефіцієнт підсилення, напруга зсуву, вхідні струми, вхідний і вихідний опори.



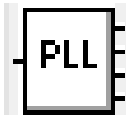
5-Terminal Opamp – нелінійна модель операційного підсилювача. Операційний підсилювач із п'ятьма виводами має два додаткових виводи: додатній та від'ємний для підключення живлення.



7-Terminal Opamp та 9-Terminal Opamp – операційні підсилювачі з сімома та дев'ятьма виводами.



Comparator – компаратор напруги.



Phase-Locked Loop – мікросхема для систем фазової автопідстройки частоти, яка складається з фазового детектора, фільтра нижніх частот та керованого напругою генератора.

Вкладка **Mixed ICs** (активні компоненти) уміщує мікросхеми змішаного типу (гібридні) (рис. 3.8).

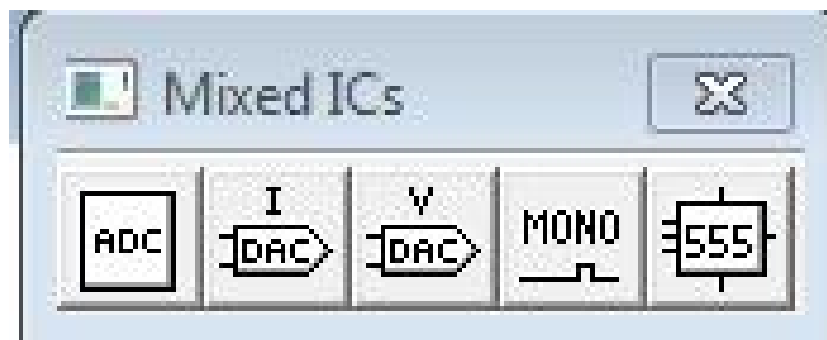


Рисунок 3.8 – Вкладка **Mixed ICs**



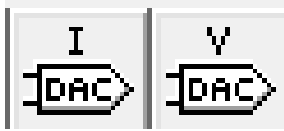
Analog-to-Digital Converter (ADC) – восьми-розрядний аналого - цифровий перетворювач (далі АЦП), для якого перші два параметри позначають діапазон напруг, які перетворюються, третій – час перетворення, четвертий – ціну молодшого розряду.

Аналого-цифровий перетворювач виконує перетворення аналогової напруги в число.

Представлений АЦП переводить аналогову напругу U_{ex} на вході у восьми-розрядне двійкове число $N_{вих}$ за формулою:

$$N_{вих} = (U_{ex} / U_{fs}) 256,$$

де U_{fs} – різниця напруг на опорних входах.



Digital-to-Analog Converter – цифрово-аналогові перетворювачі (далі ЦАП) з зовнішнім опорним джерелом струму або напруги.

Цифро-аналоговий перетворювач перетворює цифровий сигнал в аналоговий. Наведений ЦАП має вісім цифрових входів і два входи для подачі опорного струму I_{on} .

ЦАП формує на виході струм $I_{вих}$, який пропорційний до вхідного числа N_{ex} . Вихідний струм визначається за формулою:

$$I_{вих} = (N_{ex} / 256) I_{on},$$

де I_{on} – опорний струм, який визначається послідовно підключеними до входу U_{on+} або U_{on-} джерелом напруги U_{on} та опором R .

Другий вихід є доповненням першого, і його струм визначається з виразу:

$$I_{вих} = I_{on} - I_{вих}.$$

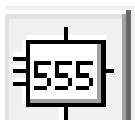
В Electronics Workbench також є ЦАП, який перетворює цифровий сигнал у напругу на виході, що визначається за формулою:

$$U_{вих} = (N_{ex} / 256) U_{on},$$

де U_{on} - опорна напруга.



Monostable Multivibrator – моностабільний мультивібратор. Одновібратор виробляє імпульс фіксованої протяжності у відповідь на керувальний перепад на його вході. Довжина імпульсу визначається RC-колом, яке задає час.



555 Timer – інтегральний таймер (мікросхема багатofункціонального таймеру 555). Таймер – це елемент, який має вхід та

вихід, і який характеризується часом затримання. Змінення стану на його виході відбувається через час, який визначається часом затримання.

555 таймер складається з двох компараторів, дільника напруги, тригера та розряджувального транзистора.

Для компонентів цього розділу бібліотеки, за винятком таймеру, допускається редагування в діалоговому вікні таких параметрів:

- верхній рівень вхідної напруги;
- нижній рівень вхідної напруги;
- час установалення у разі переходу від нижнього рівня до верхнього і навпаки;
- порогова напруга.

Вкладка **Digital ICs** (активні компоненти) уміщує цифрові мікросхеми (рис. 3.9).

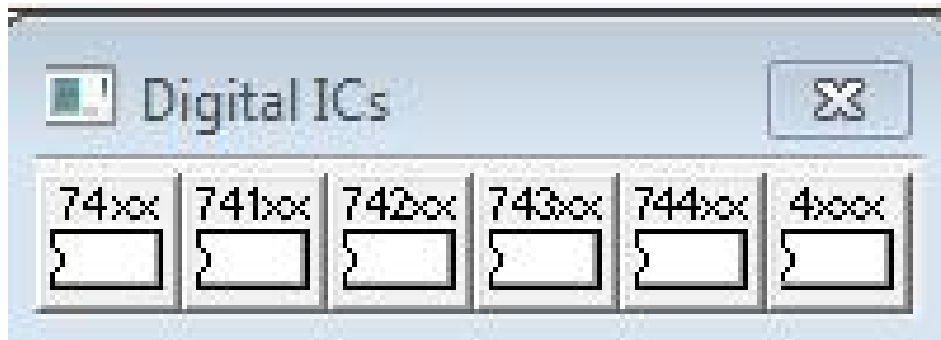


Рисунок 3.9 – Вкладка **Digital ICs**

Для певних інтегральних мікросхем (далі ІМС) замість символів **xx** ставляться відповідні номери, наприклад, SN7407 – це шість буферних елементів з відкритим колектором.

Вкладка **Logic Gates** уміщує логічні елементи та логічні цифрові мікросхеми (активні компоненти) (рис. 3.10): **I**, **I-НІ**, **АБО**, **АБО-НІ**, **виключне АБО**, **виключне АБО-НІ**, **НІ**, **буфер**, **тристабільний буфер** (елемент із трьома станами), **мікросхеми** та дає змогу задавати їхні основні характеристик, зокрема тип елемента: ТТЛ або КМОП. Кількість входів логічних елементів схем можна встановити в межах від двох до восьми, але вихід елемента може бути тільки один [4].

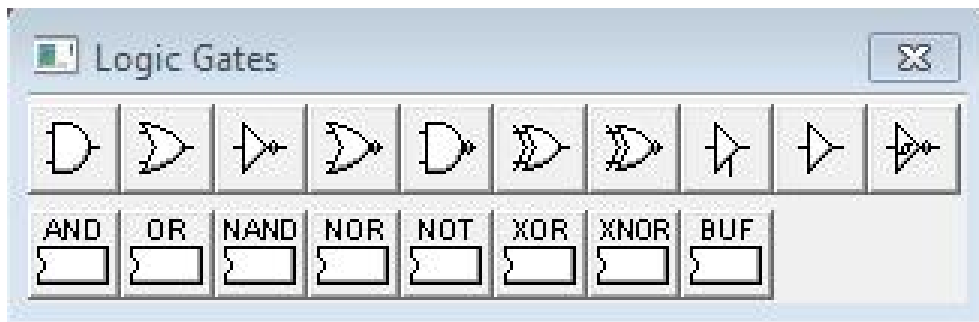


Рисунок 3.10 – Вкладка **Logic Gates**



2-Input AND Gate – логічне **І**. Елемент **AND** реалізує функцію логічного множення, і рівень логічної одиниці на його виході з'являється в разі, коли на кожен вхід елемента надходить рівень логічної одиниці.

$$Y = X_1 \cdot X_2$$

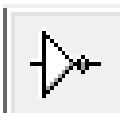
Вирази булевої алгебри для логічного **І** такі: $Y = X_1 \wedge X_2$.



2-Input OR Gate – логічне **АБО**. Елемент **OR** реалізує функцію логічного додавання, і рівень логічної одиниці на його виході з'являється в разі, коли хоча б на один із входів елемента **АБО** надходить рівень логічної

$$Y = X_1 + X_2$$

одиниці. Вирази булевої алгебри для логічного **АБО** такі: $Y = X_1 \vee X_2$.



NOT Gate – логічне **НІ**. Елемент **NOT** або інвертор змінює стан вхідного сигналу на протилежний, і рівень логічної одиниці з'являється на його виході, коли на вході – нуль, і навпаки.

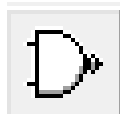
$$Y = X'$$

Вирази булевої алгебри для логічного **НІ** такі: $Y = \overline{X}$.



2-Input NOR Gate – логічне **АБО-НІ**. Елемент **АБО-НІ** реалізує функцію логічного додавання з наступною інверсією результату. Елемент **АБО-НІ** побудований шляхом поєднання логічного елемента **АБО** з інвертором шляхом приєднання логічного елемента **НІ** до виходу елемента **АБО**.

Вирази булевої алгебри для логічного **АБО-НІ** такі:
$$Y = (X_1 + X_2)'$$
$$Y = \overline{X_1 + X_2}$$



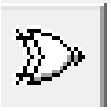
2-Input NAND Gate – логічне **І-НІ**. Елемент **І-НІ** реалізує функцію логічного множення з наступною інверсією результату. Елемент **І-НІ** побудований шляхом поєднання логічного елемента **І** з інвертором.

Вирази булевої алгебри для логічного **І-НІ** такі:
$$Y = (X_1 \cdot X_2)'$$
$$Y = \overline{X_1 \cdot X_2}$$

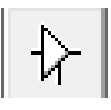


2-Input XOR Gate – **виключне АБО**. Сигнал логічної одиниці на виході елемента буде спостерігатися, якщо на входах присутні сигнали обох логічних рівнів, незалежно від їх відсоткового співвідношення. Якщо на всіх входах елемента подані сигнали того самого логічного рівня, то на виході буде спостерігатися сигнал логічного нуля. Двійкове число на виході елемента **виключного АБО** є молодшим розрядом суми двійкових чисел на його входах.

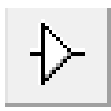
Вирази булевої алгебри для логічної **XOR** такі:
$$Y = X_1 \oplus X_2$$
$$Y = \overline{X_1}X_2 + X_1\overline{X_2}$$



2-Input XNOR Gate – **виключне АБО-НІ**. Елемент **XNOR** побудований шляхом поєднання логічного елемента **виключне АБО** з інвертором.



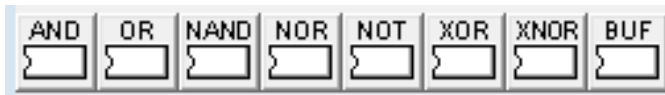
Tristate Buffer – тристабільний буфер (елемент із трьома станами) має додатковий дозволяючий вхід.



Buffer – буфер використовується для подачі великих струмів у навантаження. Цей буфер є таким, що не інвертує.



Schmitt Triggered Inverter – тригер Шмідта.



цифрові ІМС ТТЛ- та КМОП-

серій (тип мікросхем)

Вкладка **Digital** вміщує комбіновані цифрові компоненти мікросхеми (активні компоненти) (рис. 3.11).

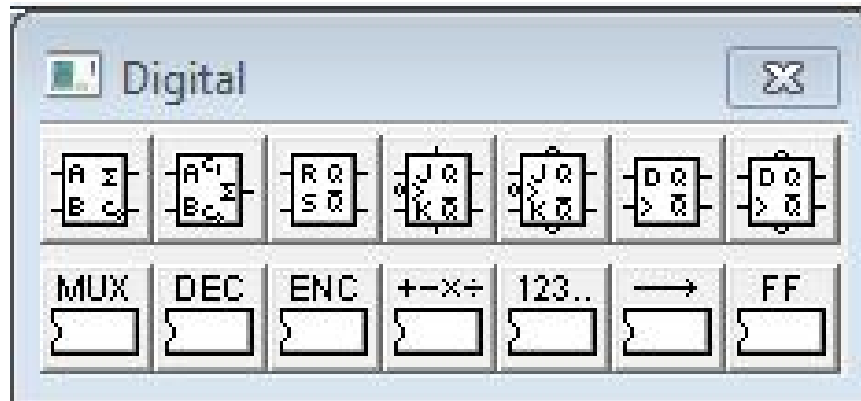
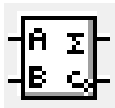


Рисунок 3.11 – Вкладка **Digital**

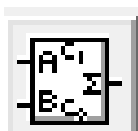


Half Adder – полусуматор виконує додавання двох однорозрядних двійкових чисел і має два входи доданків: А, В і два виходи: суми (Sum) і перенесення (Carry). Додавання виконується за допомогою елемента **виключне АБО**, а перенесення за допомогою елемента **І**.

Вирази булевої алгебри для полусуматора такі:

$$\text{Сума} = X_1 \oplus X_2$$

$$\text{Перенесення} = X_1 + X_2$$

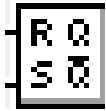


Full Adder – повний двійковий суматор виконує складання трьох однорозрядних двійкових чисел. Результатом є дворозрядне двійкове число, молодший розряд якого названий сумою, старший розряд – перенесенням. Пристрій має три входи: доданків А, В і перенесення – CarryIN та два виходи: суми – Sum і перенесення – CarryOUT.

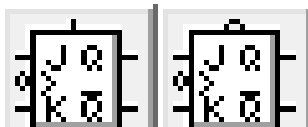
Повний двійковий суматор можна реалізувати на двох полусуматорах і одному елементі **АБО**.

Тригер – найпростіший послідовний елемент із двома станами, що містить елементарну клітину, що запам'ятовує, і схему управління, яка змінює стан елементарної клітини. Стан тригера залежить як від комбінації на входах, так і від попереднього стану. Тригерні пристрої лежать в основі комп'ютерної

оперативної пам'яті й використовуються в множині послідовних схем. Тригер можна створити з простих логічних елементів.



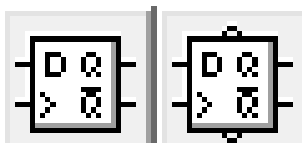
RS Flip-Flop – RS-тригер (тип) має тільки два встановлювальних входи: S (set) – установа виходу Q в одиницю і R (reset) – скидання виходу Q у нуль. Тому для тригера є неприпустимою одночасна подача команд установа та скидання ($R = S = 1$), оскільки стан виходу в цьому разі залишається невизначеним і, отже, не описується.



JK Flip-Flop – JK-тригер із прямим та інверсним тактовим входом та виходом предустановлення.

JK-тригер із входами установа логічної одиниці, відмінною особливістю якого є наявність двох інформаційних входів: J і K. Ці входи визначають зміну стану тригера по фронту імпульсу на рахунковому вході.

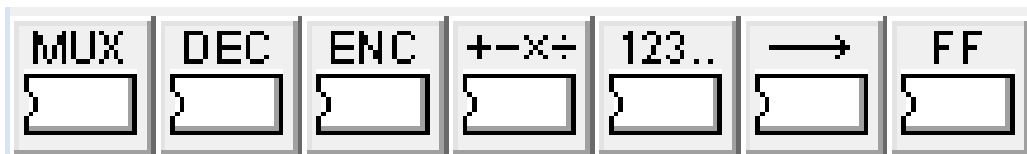
JK-тригер із входами установа логічного нуля подібний до JK-тригеру, описаному вище, за винятком того, що установа тригера виконується логічним нулем.



D Flip-Flop – D-тригери без предустановлення та зі входами предустановлення.

Інформація у D-тригері з входу D заноситься в тригер по позитивному перепаду тактового імпульсу і зберігається до наступного позитивного перепаду на рахунковому вході.

D-тригер з входами установа логічного нуля подібний до D-тригеру, описаному вище, за винятком того, що у нього є два встановлювальних входи: установа (Present) і скидання (Clear), які працюють як у RS-тригера.



серійні мікросхеми мультиплексорів, декодерів/демультиплексорів, кодерів, елементів арифметико-логічних пристроїв (тип мікросхеми), серійні мікросхеми тригерів, лічильників та регістрів (тип мікросхеми).



Серійні мікросхеми мультиплексорів.

Мультиплексор із восьми в одиницю (селектор даних) здійснює операцію передачі сигналу з обраного входу на вихід.

Цей мультиплексор має 12 входів, вісім з яких – входи даних (D0 – D7); три – входи адреси (A, B, C) і один – дозволяючий вхід (EN). Мультиплексор працює у разі подачі на вхід дозволу логічного нуля. Вихід W є доповненням виходу Y ($W = Y'$).

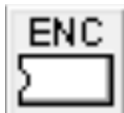


Серійні мікросхеми декодерів/демультиплексорів.

Дешифратор має три входи адреси (A, B, C), два дозволяючих входи (G1, G2) і вісім виходів (Y0 ... Y7). Номер виходу, який має активний стан, дорівнює числу N, який визначається станом адресних входів $N = 2^2C + 2^1B + 2^0A$.

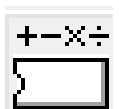
Активним рівнем є рівень логічного нуля. Дешифратор працює, якщо на вході G1 високий потенціал, а на G2 – низький. В інших випадках усі виходи пасивні, тобто мають рівень логічної одиниці.

Демультиплексор виконує операцію, зворотну мультиплексору. Він передає дані зі входу на той вивід, номер якого дорівнює адресі. Цей пристрій має чотири входи та вісім виходів. Якщо на вході G є логічна одиниця, то на всіх виходах – також логічна одиниця.



Серійні мікросхеми кодерів.

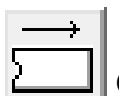
Пріоритетний шифратор виконує операцію, зворотну дешифратору. Тільки один із входів шифратора повинен мати активний рівень. Цей шифратор за наявності на декількох входах активного стану активним вважає вхід зі старшим номером. Крім того, вихід дешифратора інверсний, тобто значення розрядів двійкового числа на виході інвертовані.



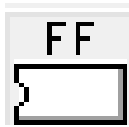
Серійні мікросхеми елементів арифметико-логічних пристроїв (тип мікросхеми).



Серійні мікросхеми лічильників (тип мікросхеми).



Серійні мікросхеми регістрів (тип мікросхеми).



Серійні мікросхеми тригерів (тип мікросхеми).

Вкладка **Indicators** (індикаторні пристрої) (активні компоненти) уміщує амперметр та вольтметр із цифровим відліком, одиночні та багатосегментні світлоіндикатори, восьмирозрядні пристрої запису даних та звуковий сигнал (зумер) (рис. 3.12).

Найпростішими приладами в Electronics Workbench є вольтметр і амперметр, які не потребують налаштувань, автоматично змінюючи діапазон вимірювань. В одній схемі можна застосовувати декілька таких приладів одночасно, спостерігаючи струми в різних гілках і напруги на різних елементах.

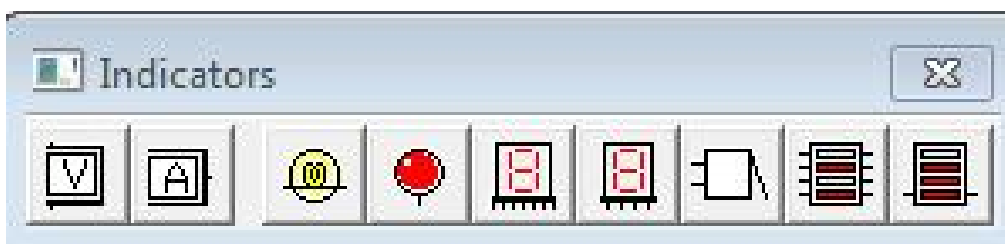


Рисунок 3.12 – Вкладка **Indicators**



Voltmeter – вольтметр використовується для вимірювання змінної та постійної напруги. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує вольтметр, відповідає негативній клемі. Шляхом подвійного натискання миші на зображенні вольтметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів вольтметра: виду вимірюваної напруги; величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку *Resistance*, вид вимірюваної напруги (опція *Mode*) обирається зі списку. Під час вимірювання змінної синусоїдальної напруги (AC) вольтметр показуватиме діюче значення напруги U_d , що визначається за формулою:

$$U_d = \frac{U_M}{\sqrt{2}}$$

де U_M – амплітудне значення напруги.

Внутрішній опір вольтметра 1 МОм, встановлений за замовчуванням, зазвичай мало впливає на роботу схеми і його значення можна змінити, проте використання вольтметра з дуже високим внутрішнім опором у схемах із низьким вихідним імпедансом може призвести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми. Як вольтметр можна використовувати мультиметр.



Ammeter – амперметр використовується для вимірювання змінного та постійного струму. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, відповідає негативній клемі.

Подвійним натисканням миші на зображенні амперметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів амперметра: виду вимірюваного струму, величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку *Resistance*, вид вимірюваного струму (опція *Mode*) вибирається зі списку. Під час вимірювання змінного синусоїдального струму (АС) амперметр буде показувати його діюче значення I_D , що визначається за формулою:

$$I_D = \frac{I_M}{\sqrt{2}}$$

де I_M – амплітудне значення струму.

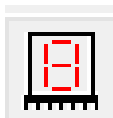
Внутрішній опір 1 мОм, встановлене за замовчуванням, зазвичай мало впливає на роботу схеми та його значення можна змінити, проте використання амперметра з дуже маленьким внутрішнім опором у схемах із високим вихідним опором може призвести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми. Як амперметр можна використовувати мультиметр.



Bulb – лампа накаливання. Індикаційний елемент резистивного типу, що перетворює електроенергію в світлову енергію, і який змінює свій колір («спалахує») за умови досягнення напруги на ньому значення від $0,5 V_{max}$ до V_{max} , де V_{max} – встановлене користувачем значення максимальної напруги.



Red Probe – світлоіндикатор (колір світла). Пробник логічного рівня визначає логічний рівень (0 або 1) у певній точці схеми. Якщо досліджувана точка має рівень логічної одиниці, індикатор загоряється червоним кольором. За допомогою команди *Value* в меню **Circuit** можна змінити колір світіння пробника.



Seven-Segment Display – семисегментний індикатор (тип). Кожен із семи виводів індикатора керує відповідним сегментом, від а до г. Найменування сегментів семисегментного індикатора наведені на рисунку 3.13.

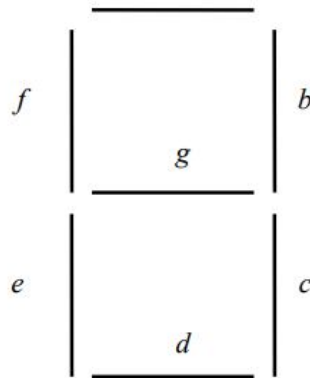
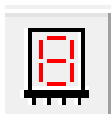
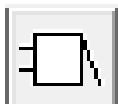


Рисунок 3.13 – Найменування сегментів семисегментного індикатора



Decoded Seven-Segment Display – семисегментний індикатор із дешифратором слугує для відображення на своєму дисплеї шістнадцятирічних чисел від 0 до F, що задаються станом на вході індикатора.



Buzzer – звуковий індикатор. Зумер застосовується для звукової сигналізації про перевищення напруги, яка підводиться до нього. За допомогою команди Value з меню **Circuit** можна задати порогову напругу та частоту звукового сигналу.



Bargraph Display – лінійка з 10 незалежних світлодіодів (напруга, номінальний та мінімальний струм).



Decoded Bargraph Display – лінійка з 10 світлодіодів з вбудованим АЦП (максимальна та мінімальна напруга).

Вкладка **Control** уміщує аналогові обчислювальні пристрої (активні компоненти) (рис. 3.14).

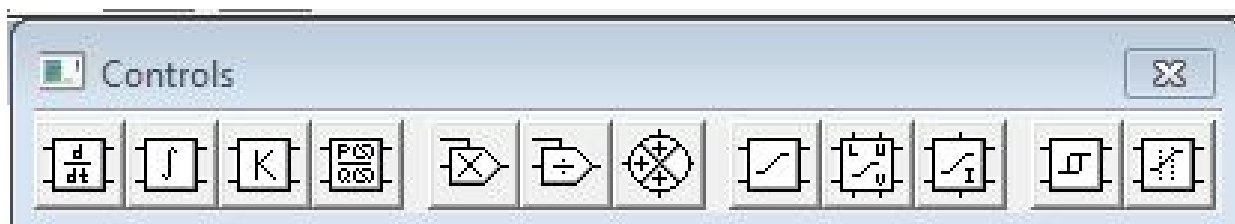
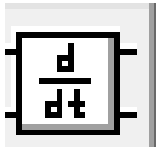
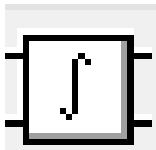


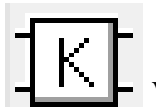
Рисунок 3.14 – Вкладка **Control**



Voltage Differentiator – диференціатор.



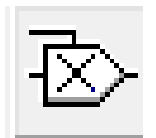
Voltage Integrator – інтегратор.



Voltage Gain Block – звено, що масштабує.



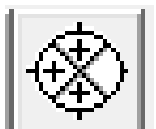
Transfer Function Block – формувач передатних функцій.



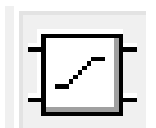
Multiplier – аналоговий помножувач (коефіцієнт передачі).



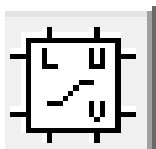
Divider – аналоговий пристрій ділення (коефіцієнт передачі).



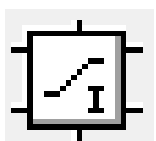
Three-Way Voltage Summer – тривхідний суматор.



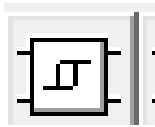
Voltage Limiter – некерований обмежувач напруги.



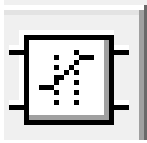
Voltage – Controlled Limiter – керований обмежувач напруги.



Current Limiter Block – обмежувач струму.



Voltage Hysteresis Block – блок із гістерезисною характеристикою.



Voltage Slew Rate Block – селектор сигналів.

Вкладка **Miscellaneous** уміщує компоненти змішаного типу (активні компоненти) (рис. 3.15).

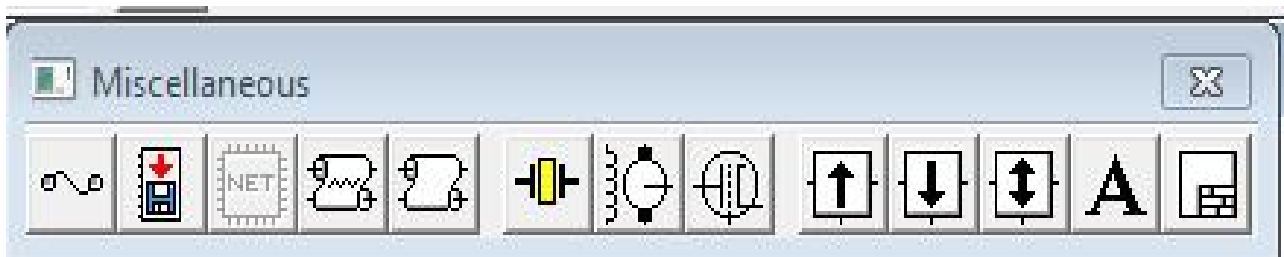


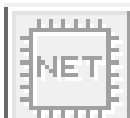
Рисунок 3.15 – Вкладка **Miscellaneous**



Fuse – плавкий запобіжник – елемент, що захищає коло від протікання по ньому струму, який перевищує задану користувачем максимальну величину. Якщо в колі, в якому включений запобіжник, струм досягає встановленої користувачем величини, запобіжник розмикає коло, і струм у ньому стає рівним нулю.



Write Data – восьмирозрядний пристрій запису даних.

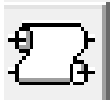


Netlist Component – набір макромоделей (підсхем) у форматі SPICE.

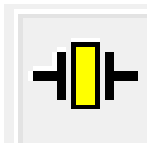


Lossy Transmission Line – лінія передачі з втратами, яка характеризується такими параметрами, як довжина лінії, опір на одиницю довжини, індуктивність на одиницю довжини, ємність на одиницю довжини,

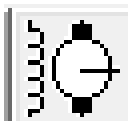
провідність на одиницю довжини, кількість послідовно ввімкнутих елементарних сегментів.



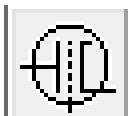
Lossless Transmission Line – лінія передачі без втрат з можливістю редагування хвильового опору, часу затримання розповсюдження сигналу в лінії, кількості послідовно ввімкнутих елементарних сегментів.



Crystal – кварцовий резонатор.



DC Motor – колекторний електродвигун постійного струму.



Triode Vacuum Tube – електровакуумний тріод.



Boost (Step-Up) Converter – імпульсний стабілізатор напруги підвищувального типу.



Buck (Step-Down) Converter – імпульсний стабілізатор напруги знижувального типу.



Buck-Boost Converter – імпульсний стабілізатор напруги.



Textbox – тестовий блок.



Title Block – блок заголовка.

Вкладка **Instruments** (активні компоненти) уміщує контрольно-вимірювальні прилади.

В Electronics Workbench є сім приладів із декількома режимами роботи, кожен з яких можна використовувати в схемі тільки один раз. Ці прилади розташовані на панелі приладів:

- прилади для формування та спостереження аналогових величин: мультиметр, функціональний генератор, осцилограф, Бодє-плоттер;
- прилади для формування і спостереження логічних величин: генератор слів, логічний аналізатор, логічний перетворювач (рис. 3.16).

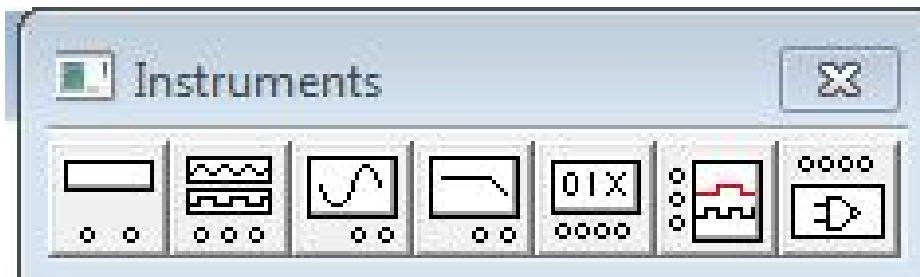


Рисунок 3.16 – Вкладка **Instruments**



Multimeter – цифровий мультиметр (рис. 3.17).




Рисунок 3.17 – Цифровий мультиметр

Мультиметр використовується для вимірювання напруги (постійної та змінної), струму (постійного та змінного), опору, рівня напруги в децибелах: V, A, Ω або dB відповідно.

На лицевій панелі мультиметра розташовано дисплей для відображення результатів вимірювання, клеми для підключення до схеми та кнопки керування.

Кнопки керування  забезпечують вибір режиму вимірювання струму, напруги, опору та ослаблення (затухання).

Кнопки керування  забезпечують вибір режиму вимірювання змінного та постійного струму.

Кнопка **Settings** забезпечує режим налаштування параметрів мультиметра, які виконуються в діалоговому вікні (рис. 3.18) .

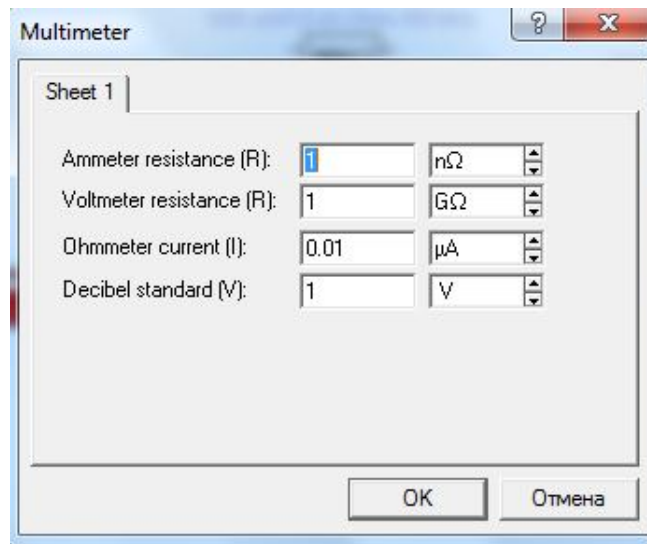


Рисунок 3.18 – Налаштування цифрового мультиметра

До цих параметрів належить налаштування внутрішнього опору амперметра, вхідний опір вольтметра, струм через об'єкт, який контролюється, та установлення еталонної напруги V_1 для вимірювання послаблення або посилення в децибелах (за замовчуванням $V_1 = 1$ В). Для коефіцієнта передачі використовується формула:

$$K[\text{дБ}] = 20\log(V_2/V_1),$$

де V_2 – напруга в точці, яка контролюється.

Для налаштування мультиметра необхідно подвійним натисканням миші на його зображенні відкрити діалогове вікно, в якому обрати одиниці вимірювання, вид сигналу, що вивчається (змінний або постійний), режим установлення параметрів мультиметра.

Як амперметр і вольтметр мультиметр використовується так само, як і стандартні прилади.

Мультиметр – єдиний в Electronics Workbench стандартний прилад, призначений для вимірювання опору.

Для використання мультиметра як омметра його потрібно під'єднати паралельно до ділянки кола, опір якої потрібно виміряти, на збільшеному зображенні мультиметра, натиснути кнопку Ω і кнопку з символом « \leftrightarrow » (перемикання в режим вимірювання постійного струму) та включити схему. На табло мультиметра з'явиться виміряне значення опору. Щоб уникнути помилкових показань, схема повинна мати з'єднання з землею та не мати контакту з джерелами живлення, які необхідно виключити зі схеми, до того ж ідеальне джерело струму необхідно замінити розривом кола, а ідеальне джерело напруги – короткозамкненою ділянкою.

Для вимірювання рівня напруги в децибелах на збільшеному зображенні мультиметра потрібно натиснути кнопку dB. Мультиметр підключається одним

із виводів до точки, рівень напруги в якій потрібно виміряти, а іншим виводом – до точки, щодо якої проводиться вимірювання.

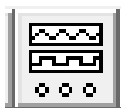
Під час вимірювання рівня змінної напруги вимірюється рівень діючого значення. Після включення схеми на табло мультиметра з'явиться виміряне значення рівня напруги. Рівень напруги в децибелах підраховується за формулою:

$$dB = 20 \lg \frac{U_{ex}}{U_{on}},$$

де U_{ex} – напруга, прикладена до виводів мультиметра;

U_{on} – опорна напруга, відносно якої вимірюється рівень напруги.

За замовчуванням опорна напруга становить 1 В.



Function Generator – функціональний генератор.

Функціональний генератор є ідеальним джерелом напруги, який виробляє сигнали синусоїдальної, прямокутної або трикутної форми. Середній вивід генератора за умови підключення до схеми забезпечує загальну точку для відліку амплітуди змінної напруги. Для відліку напруги відносно нуля загальний вивід заземлюють. Крайні правий і лівий виводи слугують для подачі змінної напруги на схему. Напруга на правому виводі змінюється в позитивному напрямі щодо спільного виводу, напруга на лівому виводі – у негативному напрямі.

Шляхом подвійного натискання мишею по зображенню функціонального генератора відкривається його збільшене зображення.

Для установлення форми сигналу необхідно обрати потрібну форму вихідного сигналу та натиснути на кнопку з відповідним зображенням.

Форму прямокутної та трикутної форми сигналів можна змінити, зменшуючи або збільшуючи значення в поле *Duty Cycle* (скважність).

Для трикутної форми напруги цей параметр задає тривалість (у відсотках від періоду сигналу) між інтервалом наростання напруги й інтервалом спаду. Встановивши, наприклад, значення 20, можна отримати тривалість інтервалу наростання 20 % від періоду, а тривалість інтервалу спаду – 80 %.

Для прямокутної форми напруги цей параметр задає співвідношення між тривалістю позитивної та негативної частини періоду.

Для установлення частоти сигналу, яка може регулюватися від 1 Hz до 999 MHz, необхідно значення частоти встановити в рядку *Frequency* за допомогою клавіатури або кнопок зі стрілками.

У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця вимірювання (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц відповідно).

Для установлення амплітуди вихідної напруги, яка може регулюватися від 0 мВ до 999 кВ, необхідно значення амплітуди встановити в рядку *Amplitude* за допомогою клавіатури та кнопок зі стрілками.

У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця вимірювання (mV, V, kV – мВ, В, кВ відповідно).

Для установлення постійного складника вихідної напруги необхідно встановити це значення в рядку *Offset* за допомогою клавіатури або кнопок зі стрілками. Постійний складник вихідної напруги може мати як позитивне, так і негативне значення, що дає змогу отримати, наприклад, послідовність однополярних імпульсів.

Лицева панель генератора наведена на рисунку 3.19.

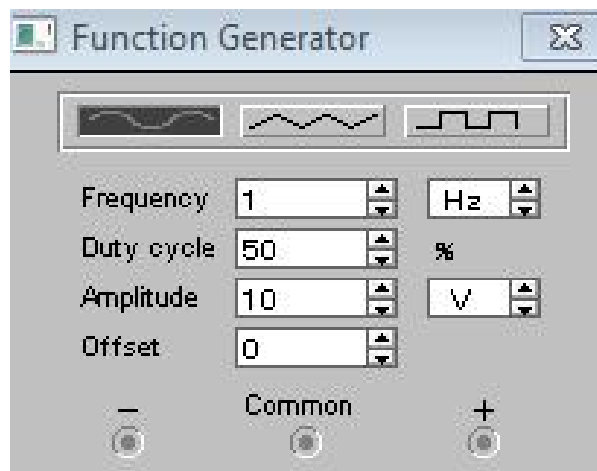


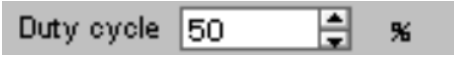


Рисунок 3.19 – Лицева панель генератора

Управління генератором виконується такими засобами:

1) кнопки керування  забезпечують вибір форми вихідного сигналу: синусоїдальна (обрана за замовчуванням), трикутна та прямокутна;

2) поле вводу  забезпечує установлення частоти вихідного сигналу;


3) поле вводу  забезпечує установлення коефіцієнта заповнення у відсотках:

– для імпульсних сигналів це відношення тривалості імпульсу до періоду повторення та є величиною, зворотною скважності;

– для трикутних сигналів це відношення між тривалістю переднього та заднього фронтів;

4) поле вводу  забезпечує установлення амплітуди вихідного сигналу;

5) поле вводу  забезпечує установлення зміщення (постійного складника) вихідного сигналу;

6) вихідні затискачі . У разі заземлення клеми Common (загальна) на клеммах «-» та «+» отримуємо парафазний сигнал.



Oscilloscope – двоканальний осцилограф має два канали А та В з окремим регулюванням чутливості в діапазоні від 10 мкВ/діл (mV/Div) до 5кВ/діл (kV/Div) та регулюванням зміщення за вертикаллю (Y Position).

Осцилограф, який імітується програмою Workbench, являє собою аналог двопробеневого запам'ятовувального осцилографа і має дві модифікації: просту та розширену. Розширена адаптація апарата за своїми можливостями наближається до кращих цифрових запам'ятовувальних осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження за простою моделлю, а для докладного дослідження процесів використовувати розширену модель.

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

Шляхом подвійного натискання миші по зображенню відкривається зображення передньої панелі простої моделі осцилографа з кнопками керування, інформаційними полями й екраном (рис. 3.20).

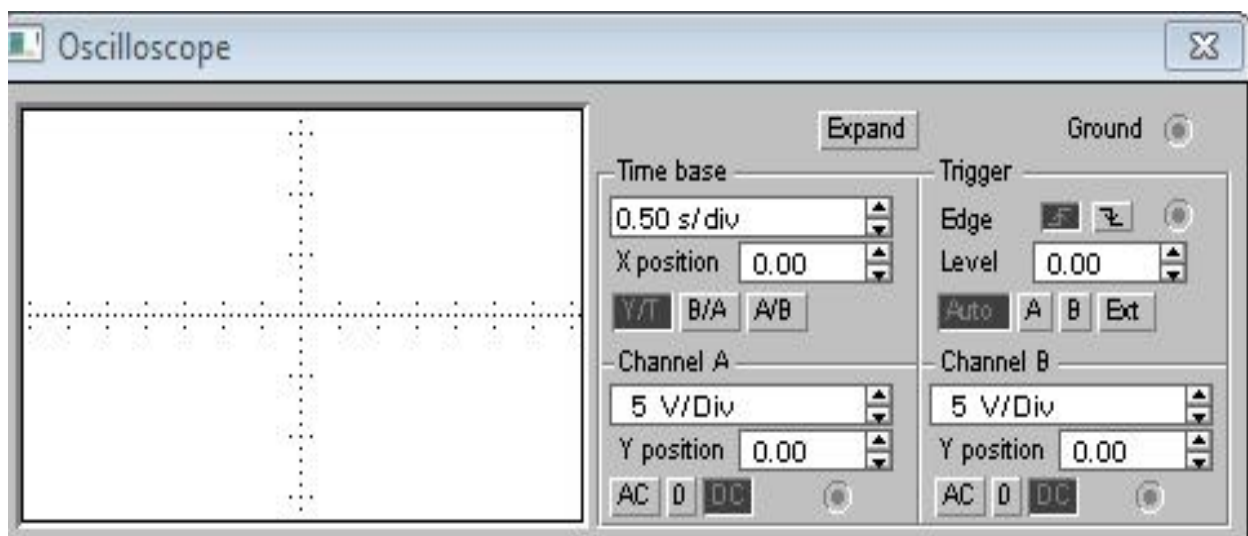


Рисунок 3.20 – Лицева панель осцилографа

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно налаштувати, для чого потрібно задати:

- 1) розташування осей, за якими відкладається сигнал;
- 2) потрібний масштаб розгортки по осях;
- 3) зміщення початку координат по осях;
- 4) режим роботи по входу: закритий чи відкритий;
- 5) режим синхронізації: внутрішній або зовнішній.

Налаштування осцилографа проводиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування, яка має загальний для обох модифікацій осцилографа вигляд і розділена на чотири поля керування:

- 1) горизонтальною розгорткою (Time base);
- 2) синхронізацією (Trigger);
- 3) каналом А;
- 4) каналом В.

Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) слугує для налаштування масштабу горизонтальної осі осцилографа у разі спостереження напруги на входах каналів А і В залежно від часу.

Тимчасовий масштаб задається в: с/діл, мс/діл, нс/діл (s/div, ms/div, ns/div) відповідно. Величину одного поділу можна встановити від 0,1 нс до 1 с. Масштаб може дискретно зменшуватися на один крок шляхом натискання мишею на кнопку праворуч від поля та збільшуватися шляхом натискання на кнопку ліворуч від поля.

За допомогою кнопок, розташованих у полі рядка X Position, можна дискретно зрушувати початок осцилограми по горизонтальній осі. У цьому полі розташовані три кнопки: Y/T, A/B, B/A, що дають змогу задавати різновид залежності сигналів, що відображаються (режими розгортки).

У режимі Y/T (звичайний режим, увімкнений за замовчуванням) реалізуються такі режими розгортки: за вертикаллю – напруга сигналу, за горизонталлю – час. У цьому режимі тривалість розгортки (Time Base) може бути задана в діапазоні від 0,1 нс/діл (ns/div) до 1 с/ діл (s/div) із можливістю установлення зміщення в тих самих одиницях за горизонталлю, тобто по осі X (X Position).

Шляхом натискання на кнопку A/B по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу А, по горизонтальній осі – каналу В, а шляхом натискання на кнопку B/A – навпаки. При цьому масштаб осей визначається за допомогою установлення відповідних каналів.

У режимах A/B і B/A можна спостерігати частотні й фазові здвиги (фігури Ліссажу), петлі гістерезис, вольт-амперні характеристики тощо.

Дві нижніх частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів А і В відповідно.

Верхнє вікно в поле дає змогу керувати масштабом осі напруги, що відображається, по вертикальній або горизонтальній осі. Ціна ділення може дискретно встановлюватися від 10 mV/div до 5 kV/div. Масштаб для кожної осі

установлюється окремо. Для отримання зручного для роботи зображення на екрані осцилографа перед початком експерименту потрібно встановити масштаб, відповідний очікуваній напрузі. Нижче розташовано поле, яке дає змогу дискретно зрушувати ось X вгору або вниз. Для того щоб розвести зображення від каналів A і B, потрібно скористатися зрушенням по осі Y (Y Position) для одного або двох каналів.

Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи осцилографа по входу.

Режим AC призначено для спостереження тільки сигналів змінного струму (його ще називають режимом «закритого входу», оскільки в цьому режимі на вході підсилювача вмикається розділовий конденсатор, який не пропускає постійну складову сигналу).

Шляхом натискання на кнопку 0 вхід осцилографа з'єднується із загальним виводом осцилографа, що дає змогу визначити положення нульової позначки по осі Y.

У режимі 0 вхідний затискач замикається на землю.

У режимі DC (увімкнене за замовчуванням) можна проводити осцилографічні вимірювання як постійного, так і змінного струму. Цей режим ще називають режим «відкритого входу», оскільки вхідний сигнал надходить на вхід вертикального підсилювача безпосередньо. З правої сторони від кнопки DC розташовано вхідний зажим.

Верхнє праве поле управління Trigger визначає момент початку відображення осцилограми на екрані осцилографа.

Кнопки в рядку Edge налаштовують момент запуску осцилограми по фронті або по зрізу імпульсу на вході синхронізації.

Поле Level дає змогу задавати рівень, у разі перевищення якого запускається осцилограма. Значення рівня можна зрушити на три ділення вниз або вгору.

Осцилограф має чотири режими синхронізації:

1. Автоматичний режим (Auto) – запуск осцилограми проводиться автоматично при підключенні осцилографа до схеми або при її включенні. Коли «промінь» доходить до кінця екрану, осцилограма знову прописується з початку екрану (новий екран).

2. Режими запуску по входу A чи B, в яких сигналом, що запускає, є сигнал, який надходить на відповідний вхід.

3. Режим «Зовнішній запуск» (EXT - external). У цьому разі сигналом запуску є сигнал, що надходить на вхід синхронізації.

Натискання кнопки Expand на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа. Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними табло, на які виводяться результати вимірів. Крім того, безпосередньо під екраном знаходиться лінійка прокрутки, що дає змогу спостерігати будь-який часовий відрізок процесу від моменту включення до моменту виключення схеми. Загалом, розширена модель осцилографа це зовсім

інший прилад, що дає змогу набагато зручніше і точніше проводити чисельний аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовані два курсора, що позначаються 1 і 2, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруг у будь-якій точці осцилограми. Для цього потрібно просто перетягнути мишею курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення.

Координати точок перетину першого курсора з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсора – на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниць між відповідними координатами першого і другого курсорів.

Результати вимірювань, які отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл командою **Save** (Зберегти) і в діалоговому вікні ввести ім'я файлу. Для повернення до колишнього зображення осцилографа, потрібно натиснути клавішу *Reduce*, розташовану в правому нижньому куту.



Bode Plotter – графічний пристрій, який використовується як вимірювач амплітудно-частотних (далі АЧХ) та фазо-частотних характеристик (далі ФЧХ) схеми.

Боде-плотер вимірює відношення амплітуд сигналів у двох точках схеми та фазовий зсув між ними. Відношення амплітуд сигналів може вимірюватися в децибелах. Для вимірювання Боде-плотер генерує власний спектр частот, діапазон якого можна задавати при налаштуванні приладу.

Частота змінного джерела в досліджуваній схемі ігнорується, проте схема повинна включати будь-яке джерело змінного струму.

Боде-плотер має чотири затискачі: два вхідних (IN) і два вихідних (OUT). Для вимірювання відношення амплітуд або фазового зсуву потрібно підключити позитивні виводи входів IN і OUT (ліві виводи відповідних входів) до досліджуваних точках, а два інших виводи – заземлити.

Шляхом подвійного натискання мишею по зображенню Боде-плотера відкривається його збільшене зображення (рис. 3.21).

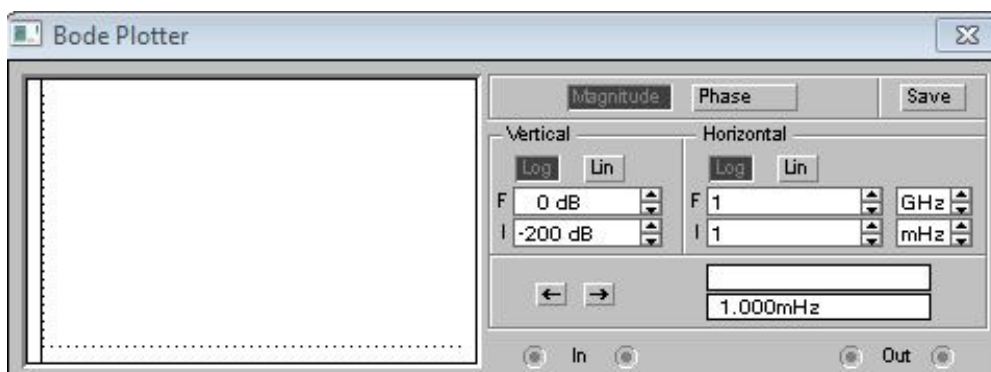


Рисунок 3.21 – Лицева панель Боде-плоттера

Верхня панель плотера задає різновид одержуваної характеристики: АЧХ або ФЧХ.

Для отримання АЧХ потрібно натиснути кнопку Magnitude, для отримання ФЧХ – кнопку Phase.

Ліва панель керування (Vertical) задає:

– початкове (I-initial) і кінцеве (F-final) значення параметрів, що відкладаються по вертикальній осі;

– вид шкали вертикальної осі – логарифмічна (LOG) або лінійна (LIN).

Права панель управління (Horizontal) налаштовується аналогічно.

У разі отримання АЧХ по вертикальній осі відкладається відношення напруг:

– в лінійному масштабі від 0 до $10E9$;

– в логарифмічному масштабі від -200 dB до 200 dB.

При отриманні ФЧХ по вертикальній осі відкладаються градуси від -720 до $+720$. По горизонтальній осі завжди відкладається частота в герцах або в похідних одиницях.

На початку горизонтальної шкали розташований курсор, який можна переміщати натисканням на кнопки зі стрілками, розташованими праворуч від екрана, або переміщувати за допомогою миші. Координати точки перетину курсора з графіком характеристики виводяться на інформаційних полях знизу справа.

За допомогою Бодє-плотера можна побудувати топографічну діаграму на комплексній площині для будь-якої схеми.



Word Generator – генератор слів (кодовий генератор), що використовується для завдання цифрових послідовностей. На схему виводиться зменшене зображення генератора слів.

На шістнадцять входів у нижній частині генератора паралельно подаються біти слова, що генерується.

На вихід тактового сигналу надходить послідовність тактових імпульсів з заданою частотою.

Вхід синхронізації використовується для подачі сигналу, що синхронізується, від зовнішнього джерела (рис. 3.22).

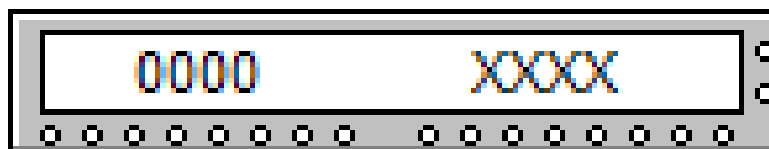


Рисунок 3.22 – Генератор слів

Для відкриття кодового генератора необхідно двічі натиснути на його зображенні (рис. 3.23).

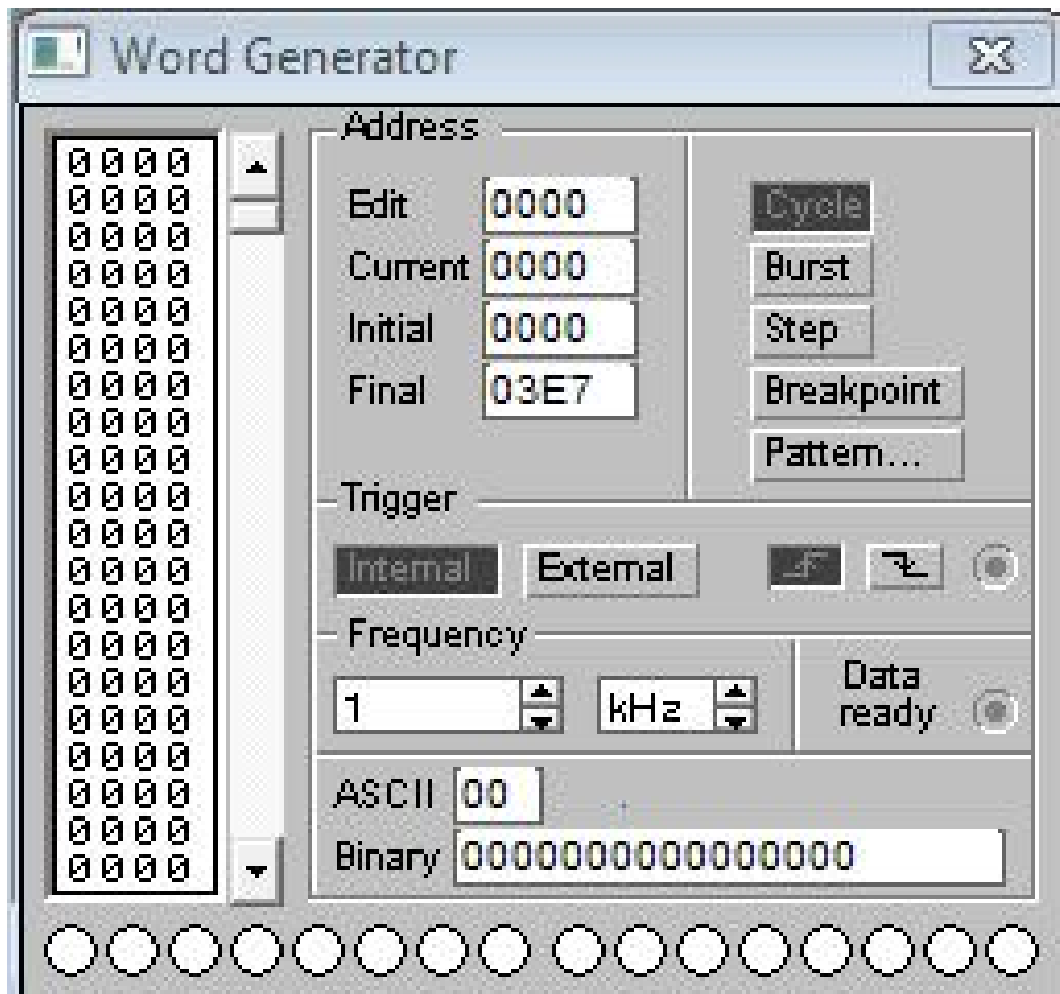


Рисунок 3.23 – Вікно кодового генератора

Ліва частина генератора містить 1023 слова. Виділенням відзначається слово, активне в цей момент. Значення цього слова відображаються:

- у шістнадцятирічній системі (ліве вікно),
- у двійковій системі (вікно Binary);
- у міжнародній системі кодів (вікно ASCII).

Уведення слів проводиться або у вікні Binary або у вікні ASCII за допомогою миші та клавіатури: шляхом натискання на ліву кнопку миші виділяється потрібний біт, а введення значення виконується з клавіатури.

Для подальшого використання встановленого набору слів (шаблону) необхідно його зберегти натисканням кнопки Pattern... на панелі генератора слів із подальшим вибором команди **Save** і введенням ім'я файлу.

Шаблон зберігається у вигляді файлу з розширенням *.dp і для подальшої роботи з шаблоном він відкривається за допомогою команди **Load**.

Генератор може працювати в трьох режимах:

- 1) безперервний (усі слова циклічно передаються на вихід генератора протягом необхідного часу);
- 2) циклічний (на вихід генератора одноразово послідовно надходять усі слова);
- 3) покроковий (кожен раз після подачі чергового слова на вихід генератор зупиняється).

Для зміни режиму роботи генератора необхідно натиснути кнопки *Cycle*, *Burst* та *Step*, які переводять генератор у безперервний, у циклічний та у покроковий режим виконання відповідно.

Для переривання роботи генератора необхідно ще раз натиснути кнопку *Cycle* або комбінацію клавіш *CTRL + T* на клавіатурі.

Панель керування *Trigger* визначає момент початку роботи генератора. Момент запуску можна задати за позитивним або негативним фронтах імпульсу, що синхронізується.

У режимі *Internal* (внутрішня синхронізація) генератор виробляє внутрішню синхронізацію передачі слів на вихід. Для синхронізації роботи схеми з генератором можна встановити частоту імпульсів у межах від Гц до МГц у вікні *Frequency*.

У режимі *External* (зовнішня синхронізація) передача слів на вихід генератора синхронізується за допомогою імпульсів, що надходять на вхід запуску. З приходом кожного імпульсу на виході генератору видається одне слово.



Logic Analyzer – восьми-канальний логічний аналізатор. На схему виводиться зменшене зображення логічного аналізатора. Логічний аналізатор підключається до досліджуваної схеми за допомогою виводів у його лівій частині. Одночасно можуть спостерігатися сигнали в шістнадцяти точках схеми.

Правий нижній затискач використовується для подачі синхронізувальних імпульсів. Шляхом подвійного натискання миші по зображенню відкривається розширене зображення логічного аналізатора (рис. 3.24).

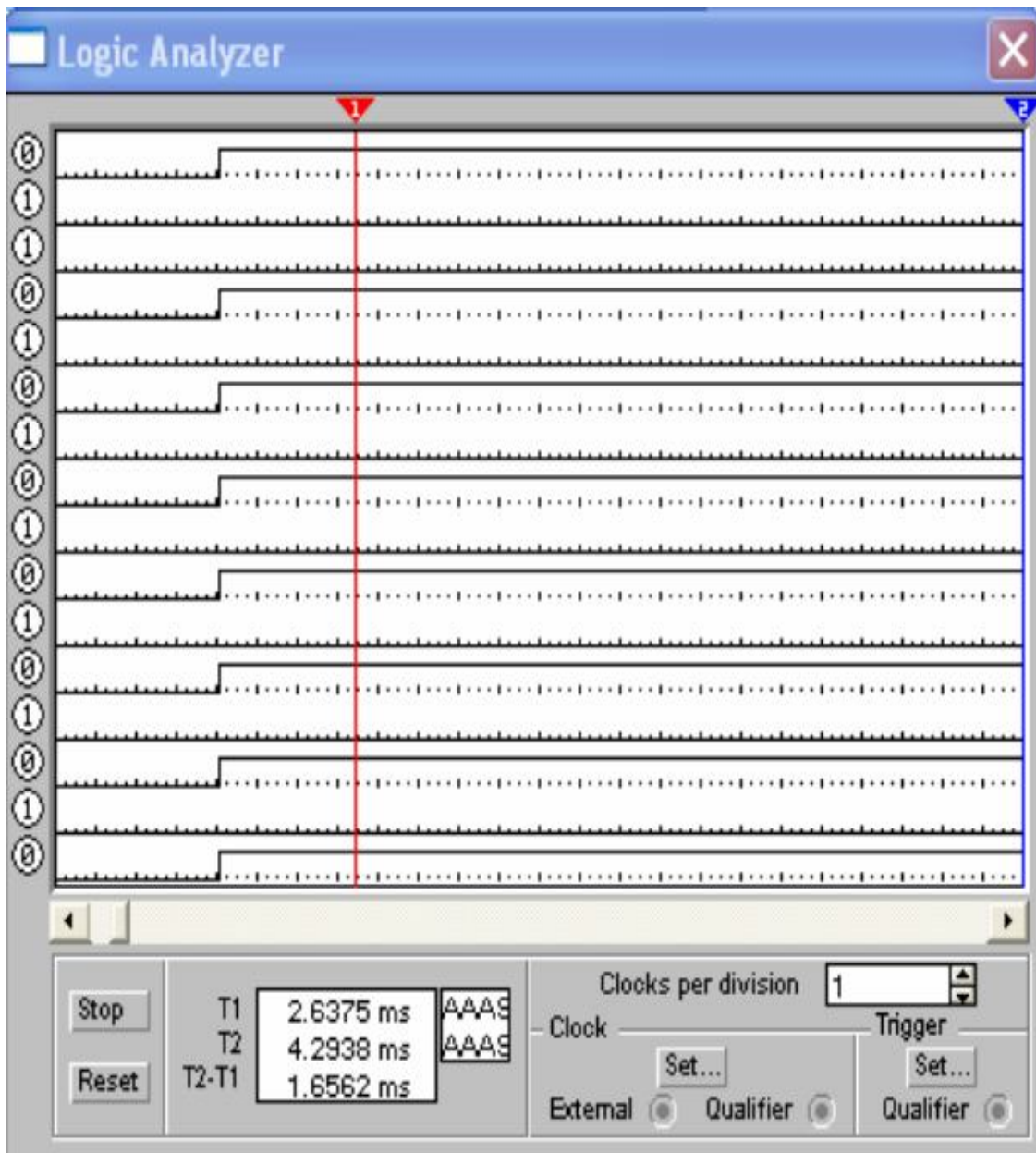


Рисунок 3.24 – Розширене зображення логічного аналізатора

Тимчасові діаграми сигналів на екрані 16-канального логічного аналізатора зображуються у вигляді прямокутних імпульсів. Крім того, круглі вікна в лівій частині аналізатора показують поточний стан входів аналізатору. Кожне вікно відповідає одному з його входів.

Рівні сигналів, які в поточний момент надходять на вхід аналізатору, відображаються на екрані праворуч.

Правий крайній вхід аналізатору відповідає середній тимчасовій діаграмі на екрані аналізатора.



Logic Converter – логічний перетворювач – це прилад, який не має аналогів у реальному світі, і призначений для виконання різних функціональних перетворень у схемі. За допомогою логічного перетворювача можна здійснювати такі операції:

- 1) отримання таблиці істинності досліджуваної схеми;
- 2) перетворення таблиці істинності в логічний вираз;
- 3) перетворення логічного висловлювання на таблицю істинності;
- 4) створення логічних схем по заданому логічному виразу;
- 5) синтез логічних схем на елементах **I-НІ** по заданому логічному виразу.

На екран виводиться зменшене зображення логічного перетворювача (рис. 3.25).

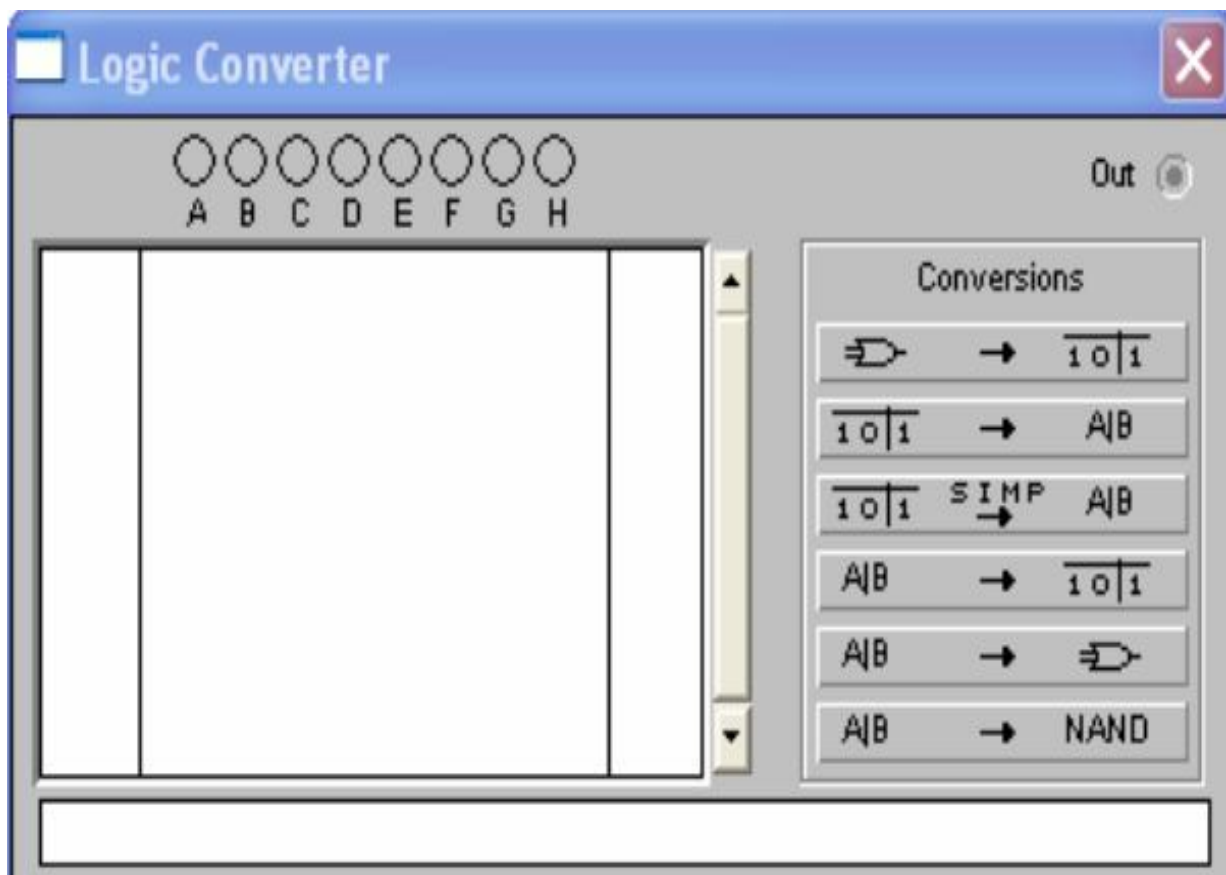
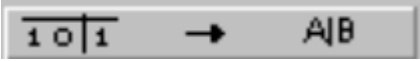


Рисунок 3.25 – Зменшене зображення логічного перетворювача

Шляхом натискання на кнопці  створюється таблиця істинності схеми.

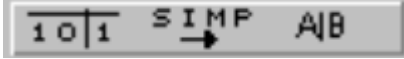
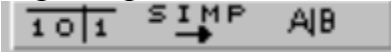
Для отримання таблиці істинності схеми необхідно підключити входи А, В, С, D, Е, F, G, Н логічного перетворювача до входів досліджуваної схеми (не більше восьми), а вихід OUT логічного перетворювача з'єднати з виходом схеми.


Шляхом натискання на кнопці  виконується введення та перетворення таблиці істинності.


Для того щоб створити таблицю істинності, необхідно в лівій верхній частині приладу вибрати число змінних від А до Н (натиснути на відповідну букву лівою кнопкою миші). Уся ліва половина екрану заповниться комбінаціями нулів та одиниць, які визначають початкові вхідні умови.

Стовпець вихідних значень OUT (реакція на вхід) на початку процесу заповнений нулями. Змінюючи в правій колонці нулі на одиниці або Х (байдужий стан), можна описати стан виходу для будь-якої початкової умови.

Натискання на кнопці в нижньому рядку зображення приладу призведе до появи логічного виразу.

Шляхом натискання на кнопці  виконується спрощення виразів булевої алгебри. Якщо таблиця істинності містить велику кількість змінних, то логічний вираз функції виходить громіздким і для його перетворення в компактну форму потрібно натиснути кнопку .

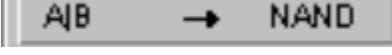
Шляхом натискання на кнопці  виконується введення та перетворення логічного виразу. Для отримання таблиці істинності функції, заданої логічним виразом, необхідно:

- 1) ввести в рядок перетворювача за допомогою клавіатури логічне вираз;
- 2) натиснути кнопку .

При введенні виразів інверсія позначається апострофом, логічне додавання знаком «+». Логічне множення не позначається.

Шляхом натискання на кнопці  виконується синтез схеми по логічному виразу.

Після натискання цієї кнопки на робочому полі Electronics Workbench з'явиться еквівалентна логічному виразу схема. Усі елементи в схемі будуть виділені червоним кольором. Якщо потрібно використовувати для побудови схеми тільки елементи I-II, то необхідно скористатися кнопкою

.

4 ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ТА АНАЛІЗ ЇЇ РОБОТИ

Мета роботи – складання та редагування простої схеми, дослідження процесів у простих колах за допомогою віртуальних вимірювальних приладів: амперметра, вольтметра та мультиметра.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися з інтерфейсом програми моделювання електронних пристроїв Electronic Workbench.
2. Отримати практичні навички створення електричних принципових схем і їх моделювання.
3. Зібрати схему електричну принципову (рис. 4.1).

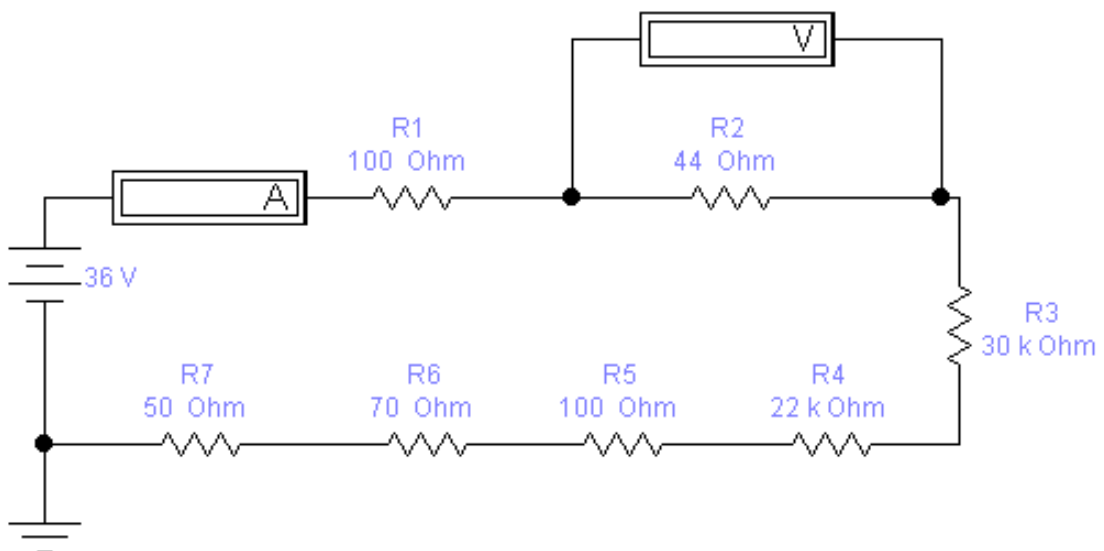


Рисунок 4.1 – Схема 1 електрична принципова

- 3.1. Виміряти напругу на кожному резисторі та струм у колі.
- 3.2. Занести результати вимірювань у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1– Результати вимірювань струму у колі та напруги на кожному резисторі

Показники	E, B	I, A	U_1, B	U_2, B	U_3, B	U_4, B	U_5, B	U_6, B	U_7, B
Результати									

3.3. Розрахувати за вимірним значенням напруги і струму опір кожного резистора.

3.4. Занести результати розрахунку в таблицю 4.2.

3.5. Перевірити виконання закону Ома.

3.6. Розрахувати потужність кожного резистивного елемента.

4. Вилучити зі схеми (рис. 4.1) вимірювальні прилади (амперметр та вольтметр)

4.1. Заміряти за допомогою мультиметра опори резистивних елементів R_1 – R_7 та загальний опір кола.

4.2. Занести результати розрахунку в таблицю 4.2.

4.3 Порівняти значення опорів отриманих дослідним і розрахунковим шляхом.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку опору кожного резистора

Резистори	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_4, Ом$	$R_5, Ом$	$R_6, Ом$	$R_7, Ом$	$R_{заг}, Ом$
Експеримент								
Розрахунок								

5. Зібрати та проаналізувати схему електричну принципову (рис. 4.2) [5].

6. Змінити частоту джерела живлення на 50 Гц та проаналізувати схему.

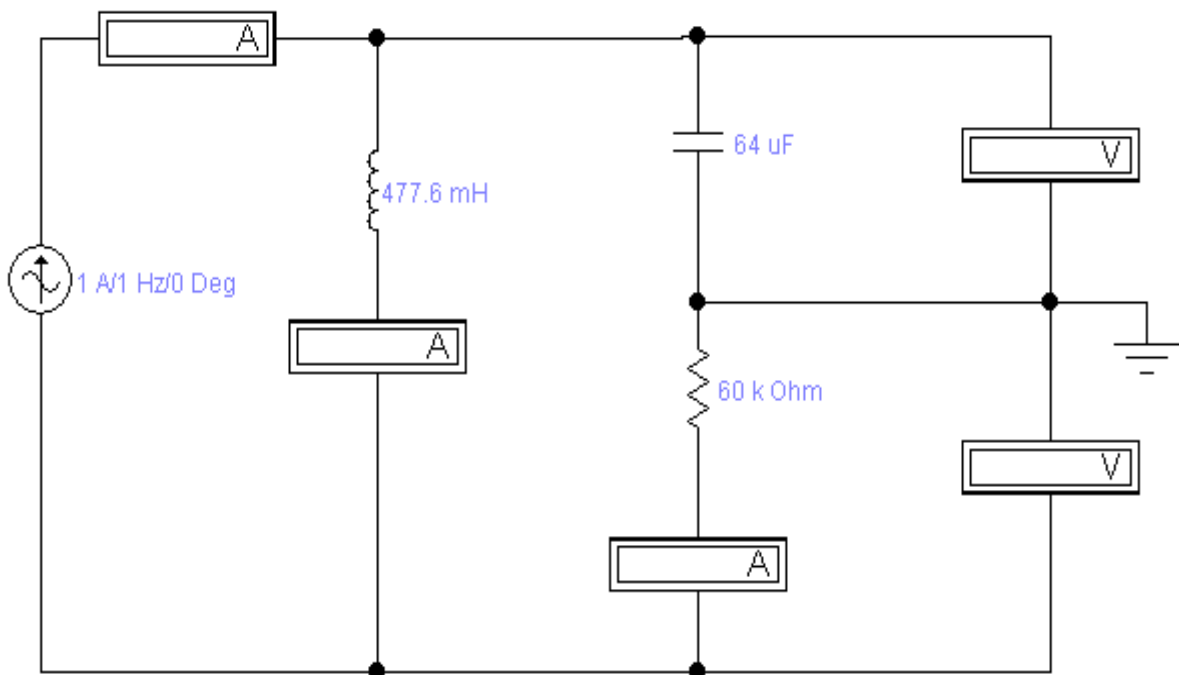


Рисунок 4.2 – Схема 2 електрична принципова

Загальні положення

Розроблення радіоелектронних пристроїв супроводжується фізичним та математичним моделюванням. Фізичне моделювання обумовлюється матеріальними затратами, а інколи зовсім неможливе внаслідок складності обладнання, тому доцільно використовувати математичне моделювання з використанням засобів та методів обчислювальної техніки.

За своєю структурою вікно програми Electronic Workbench подібно до робочого місця інженера електронної техніки. Основну частину вікна займає робоча зона, на якій збирається та випробовується електронна схема – своєрідний «робочий стіл», на якому знаходиться «ящик із радіодеталями». У верхній частині вікна розташовується меню, в якому містяться зображення контрольно-вимірювальних приладів і вимикач, що приводить у дію електронну схему.

Користувач програми може використовувати такі контрольно-вимірювальні прилади: мультиметр, генератор, осцилограф, аналізатор АЧХ, вольтметр і амперметр.

Контрольно-вимірювальні прилади призначені для спостереження за результатами моделювання та здійснення необхідних вимірювань.

Мультиметр використовується для вимірювання напруги постійної та змінної, для вимірювання струму постійного та змінного, опору, тобто мультиметр – це комбінований електровимірювальний прилад, який об'єднує в собі декілька функцій. У мінімальному наборі мультиметр включає функції вольтметра, амперметра та омметра.

Функціональний генератор є ідеальним джерелом напруги, який виробляє сигнали синусоїдальної, прямокутної або трикутної форми.

Осцилограф – це прилад, який призначено для дослідження (спостереження, запису, вимірювання) амплітудних та часових параметрів електричного сигналу, який надходить на його вхід.

Осцилограф у програмі Electronics Workbench являє собою аналог двопробеневого запам'ятовувального осцилографа.

Вольтметр використовується для вимірювання змінної та постійної напруги між двома точками електричного кола. Вольтметр приєднується паралельно до ділянки кола, на якій необхідно виміряти напругу. Ідеальний вольтметр повинен мати нескінченно великий внутрішній опір. Тому чим вище внутрішній опір у реальному вольтметрі, тим менше впливає прилад на об'єкт, що вимірюється, і, відповідно, тим вище точність та різноманітніші галузі застосувань.

Амперметр використовується для вимірювання змінного та постійного струму в гілці електричного кола. Амперметр приєднується послідовно в ділянку кола, де необхідно виміряти струм. Тому, чим нижчий внутрішній опір амперметра (в ідеалі – 0), тим менше буде вплив приладу на об'єкт, що досліджується, і тим вище буде точність вимірювання. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, відповідає негативній клемі.

Шляхом подвійного натискання миші на зображенні амперметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів амперметра.

Програма надає користувачеві широкий вибір елементів радіоелектронної техніки, зокрема: польові й біполярні транзистори, діоди, постійні та змінні резистори, постійні та змінні конденсатори, джерела постійного і змінного струму та напруги, лампи накаливання, генератори прямокутних імпульсів, з'єднувальні роз'єми, ідеальні керовані джерела струму і напруги, мостові випрямлячі, запобіжники, заземлення, котушки індуктивності, світлодіоди, аналогові перемножники, операційні підсилювачі, потенціометри, електромагнітні реле, диністори, триністори, вимикачі, трансформатори, стабілітрони, мікросхеми.

Складання електричної схеми починається з перенесення в робочу зону всіх необхідних деталей і приладів.

Electronics Workbench дає змогу будувати аналогові, цифрові й цифро-аналогові схеми різного ступеня складності. Досліджувана схема збирається на робочому полі з одночасним використанням миші та клавіатури. Застосування в роботі тільки клавіатури неможливо. У процесі побудови та редагування схем виконуються такі операції:

- 1) вибір компонента з бібліотеки компонентів;
- 2) виділення об'єкта;
- 3) переміщення об'єкта;
- 4) копіювання об'єктів;
- 5) видалення об'єктів;
- 6) поєднання компонентів схеми дротами;
- 7) установлення значень компонентів;
- 8) підключення приладів.

Будь-яку ділянку схеми можна переглянути за допомогою лінійок прокрутки, розташованих праворуч і під робочим полем, якщо схема не розміщується на екрані монітора.

Для з'єднання компонентів за допомогою дротів потрібно підвести покажчик миші до виводу компонента, після чого на виводі компонента з'явиться велика чорна точка (рис. 4.3), і, натиснувши ліву кнопку миші, перемістити її покажчик до виводу компонента, з яким потрібно виконати з'єднання, і в подальшому відпустити кнопку миші. Виводи компонентів з'єднуються за допомогою дротів.

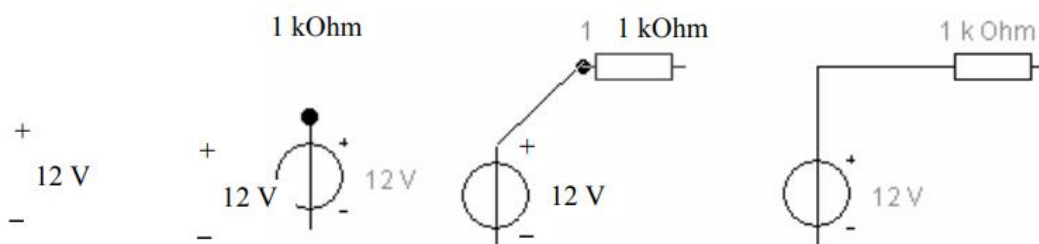


Рисунок 4.3 – З'єднання компонентів схеми за допомогою дротів

Усі дроти в Electronics Workbench за замовчуванням чорного кольору, але колір дроту можна змінити. Для цього потрібно двічі клацнувши на зображенні дроту, відкрити діалогове вікно, в якому обрати необхідний колір.

Якщо дроти на схемі мають багато вигинів, є декілька способів зробити їх пряміше:

- обрати одне з зображень деталі мишею, і, користуючись стрілками клавіатури, перемістити так, щоб дроти стали рівними;
- перемістити зображення, якщо дріт перетинає зображення деталі;
- вести дріт від іншої точки, якщо впоратися з незручним дротом важко.

Кожен елемент схеми представлений у програмі Electronic Workbench у вигляді певної моделі. Кожна модель характеризується одним або декількома числовими параметрами, які можуть встановлюватися користувачем.

До простих моделей належать, наприклад, моделі резисторів, конденсаторів і котушок індуктивності, кожна з яких характеризується всього одним числовим параметром – опором, ємністю та індуктивністю відповідно.

До складніших моделей належать моделі діодів, транзисторів, операційних підсилювачів, що характеризуються великою кількістю числових параметрів.

Для того щоб встановити розмір чи параметр певного елемента схеми, його необхідно виділити та викликати контекстне меню. На екрані з'явиться діалогове вікно, в якому необхідно вказати, відповідно, величину параметра елемента або його тип (командами Value і Model)

Для завдання типу елемента програма, зазвичай, надає перелік наявних в її бібліотеці типів елементів. Якщо потрібний тип є у переліку, досить його вибрати та натиснути кнопку Ok (прийнято).

Якщо необхідний тип елемента в бібліотеці програми відсутній, можна скориставшись кнопкою Edit (редагування), спробувати самостійно задати параметри моделі елемента, якщо вони відомі, або придбати у розробника програми додаткову бібліотеку типів, зв'язавшись із ним за координатами, вказаними в розділі User Support довідки.

Загальний порядок роботи з приладами такий:

- перетягти піктограму приладу на робоче поле;
- підключити прилад дротами до схеми, яка досліджується;
- привести прилад у робочий (розгорнутий) стан подвійним натисканням миші на його піктограму.

Концепція електронної лабораторії з віртуальними вимірювальними приладами полегшує проведення розрахунку процесів, які перебігають у радіоелектронному пристрої.

Залежно від типу підключеного приладу програма автоматично налаштовується на виконання таких основних різновидів аналізу:

- DC Operating Point – розрахунок режиму по постійному струму у разі ввімкнення мультиметра, амперметра та вольтметра для зміни постійних струмів та напруг;


– AC Frequency – розрахунок частотних характеристик у разі ввімкнення вимірювача амплітудно-частотних характеристик та фазо-частотних характеристик, а також мультиметра, амперметра та вольтметра для вимірювання гармонічних струмів зміни та напруг;

– Transient – розрахунок перехідних процесів у разі використання осцилографа.

Створивши принципову електричну схему, можна розпочати її моделювання. Програма Workbench дає змогу проводити два різновиди моделювання: моделювання «класичне» і моделювання «реальне», коли використовуються віртуальні вимірювальні прилади, такі як осцилограф, вольтметр, амперметр тощо.

За класичним методом проводяться різновиди моделювання, зазначені у відповідному пункті меню **Analysis**, наприклад метод Fourier, після чого відкривається діалогове вікно, в якому задаються параметри моделювання.

Програма виконує необхідні розрахунки та видає результати розрахунків у вигляді графіків або числової інформації.

«Реальне» моделювання запускається за командою меню **Analysis/Activate**, зупиняється за командою **Analysis/Stop**, а призупиняється командою **Analysis/Pause**. Крім того, запускати та зупиняти моделювання можна за допомогою вимикача у верхньому правому куті вікна програми .

Після включення «реального» моделювання на віртуальних приладах можна спостерігати значення струмів, напруг у момент часу, який відображається в найнижній частині вікна.

Результати розрахунків можна подивитися за допомогою команди меню **Analysis/Display Graphs**. Після проведення кожного різновиду моделювання у вікні результатів **Analysis/Display Graphs** появляються нові закладки з результатами проведеного різновиду моделювання.

Для зручнішого сприйняття даних із графіків у вікні результатів моделювання є можливість користуватися кнопками включення сітки, «легенди» графіка (корисно, коли на графіку зображуються декілька кривих), а також використовувати кнопку **ToggleCursors**, яка виводить два курсора, що переміщуються за допомогою миші та за допомогою яких можна робити зчитування значення ординат кривої в будь-якій точці. Значення координат курсорів по осі X і значення функції в точці знаходження курсору відображаються у вікні праворуч.

Порядок виконання лабораторної роботи

Приклад 1

1. Запустити на виконання програму Electronics Workbench.
2. Відкрити вкладку компонентів **Source**.
3. Перемістити зі вкладки компонент **Battery**.

4. Відкрити вкладку компонентів **Basic** та перемістити на робоче поле програми опір номіналом 1 kOhm.

5. Відкрити вкладку компонентів **Indicators** та перемістити на робоче поле програми амперметр (**Ammeter**).

6. Відкрити вкладку компонентів **Instruments** та перемістити на робоче поле програми мультиметр (**Multimeter**).

7. З'єднати компоненти за допомогою дротів. Схема прийме вигляд, наведений на рисунку 4.4.

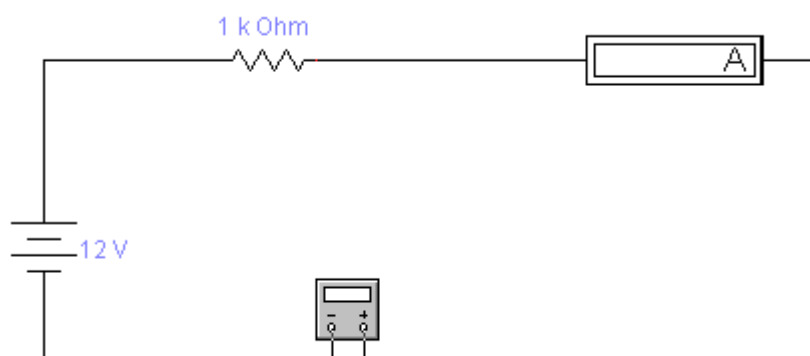


Рисунок 4.4 – Схема 3 електрична принципова

8. Увімкнути процес моделювання. Показник мультиметра зміниться з 0 mA на заміряне значення струму.

9. Змінити номінальне значення джерела живлення. Для цього необхідно двічі натиснути на джерелі живлення та у діалоговому вікні, що відкриється (рис. 4.5), змінити значення напруги на 25 В.

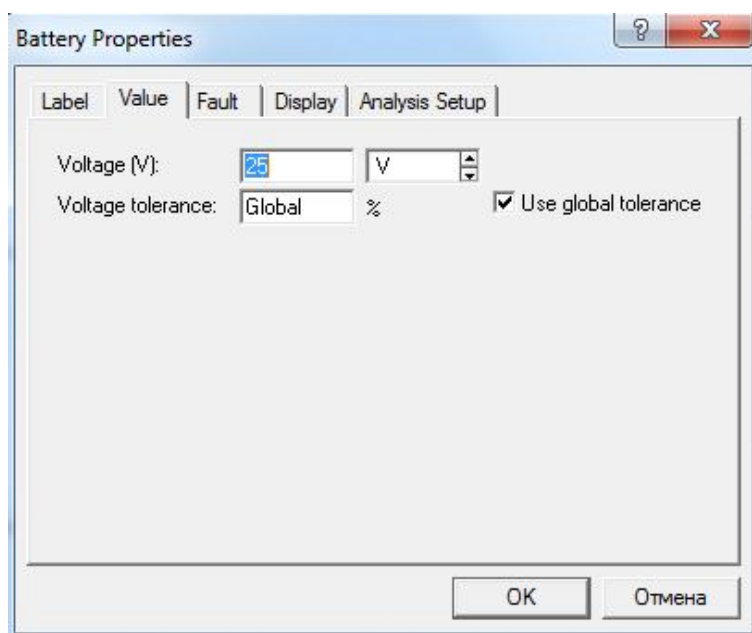


Рисунок 4.5 – Діалогове вікно зміни номінального значення джерела живлення

10. Зняти показання з мультиметра.
11. Змінити аналогічно номінальне значення опору.
12. Зробити висновок стосовно залежності показань приладу від зміни напруги джерела живлення та опору.

Приклад 2

1. Зібрати схему електричного кола постійного струму, наведену на рисунку 45.

Для цього необхідно розташувати на робочому полі три резистори номіналом 1 kOhm, три амперметри, батарею, мультиметр.

2. Змінити параметри резисторів за прикладом, наведеним на рисунку 4.6.

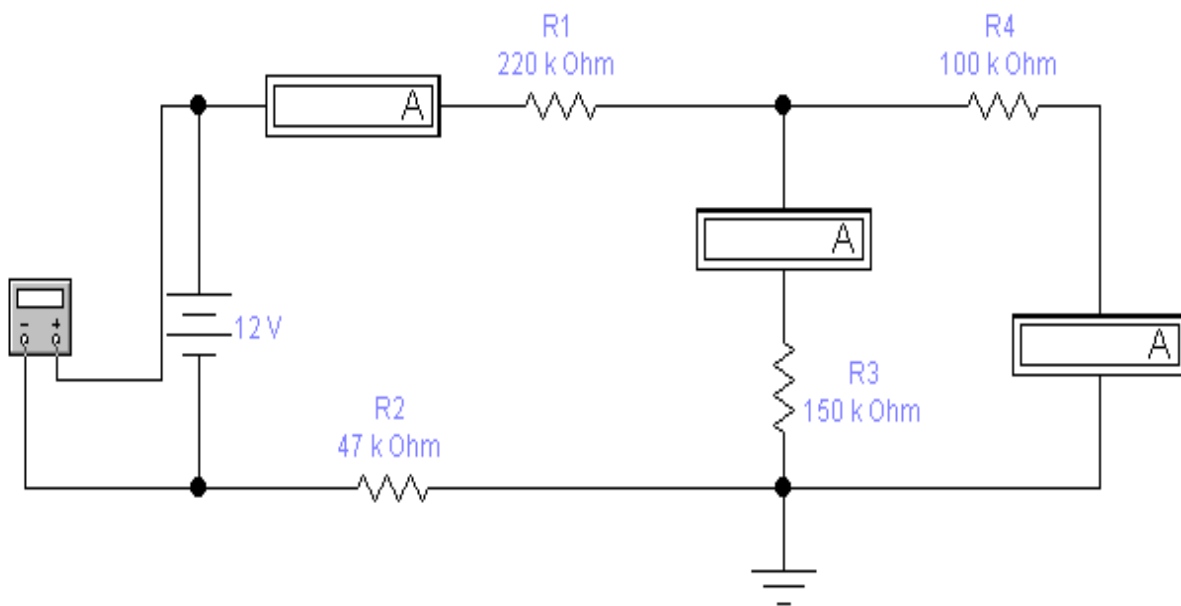


Рисунок 4.6 – Схема 4 електричного кола постійного струму

3. Увімкнути процес моделювання та зафіксувати показання амперметрів, які показують струми в гілках схеми і напругу джерела живлення, яка виміряна за допомогою мультиметра.

Приклад 3

1. Зібрати схему, наведену на рисунку 4.7.

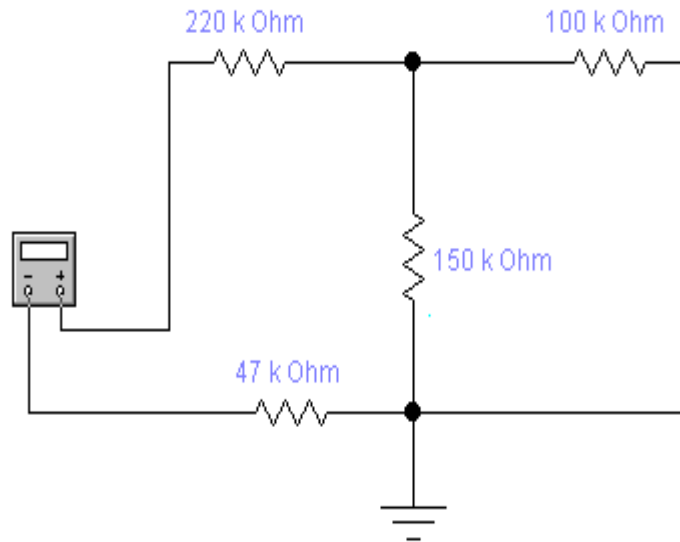


Рисунок 4.7 – Схема 5 електричного кола постійного струму

2. Увімкнути процес моделювання та виміряти опір у схемі електричного кола (рис. 4.8).

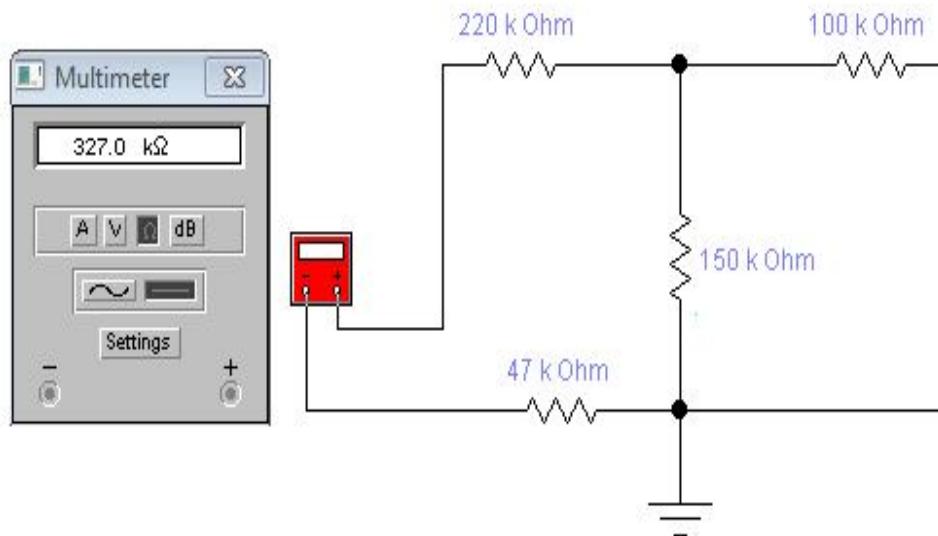


Рисунок 4.8 – Показання мультиметра в схемі 5

Приклад 4

1. Зібрати схему електричного кола змінного струму, наведену на рисунку 4.9.

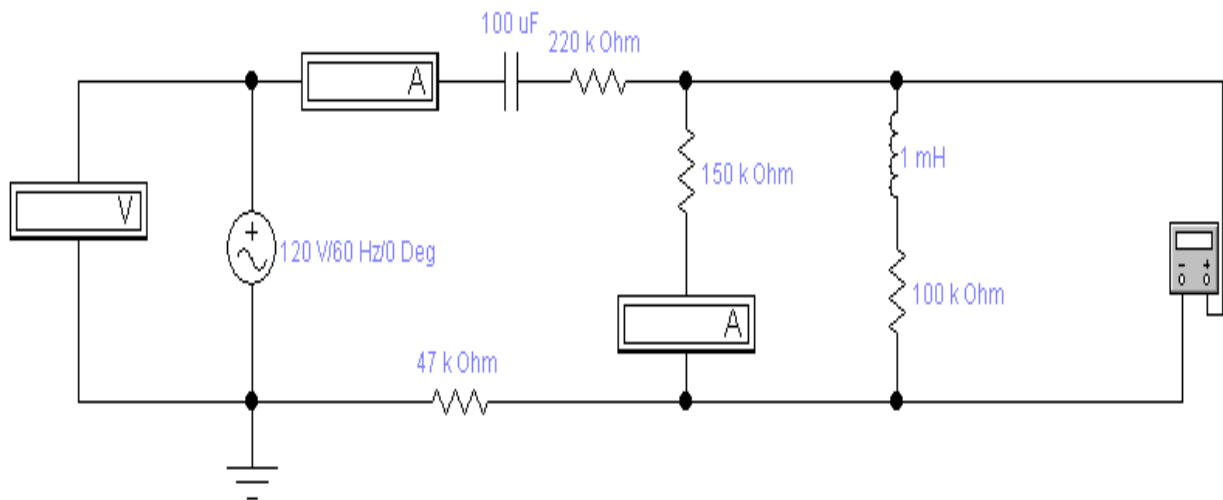


Рисунок 4.9 – Схема 6 електричного кола змінного струму

2. Виміряти за допомоги мультиметра діюче значення напруги на ділянці кола.

Амперметри в колі змінного струму вимірюють діюче значення синусоїдального струму $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ у відповідних гілках схеми, де I_m – максимальне значення синусоїдального струму.

Вольтметр вимірює діюче значення синусоїдальної напруги $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$, де U_m – максимальне значення синусоїдальної напруги.

Контрольні питання

1. У який спосіб можна розташувати необхідний компонент на робочому полі?
2. Як задати характеристики компонента?
3. У який спосіб можна підключити вивід компонента до дроту?
4. Як розірвати з'єднання між компонентами схеми?
5. Назвати елемент для утворення в схемі вузла з'єднання.
6. Які додаткові функції може виконувати елемент для утворення в схемі вузла з'єднання?
7. Описати призначення амперметра.
8. Описати призначення вольтметра.
9. Описати призначення мультиметра.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В ПРОСТИХ КОЛАХ

Мета роботи – дослідження процесів, які перебігають у колі.

Завдання до виконання лабораторної роботи

Дослідити процеси, які перебігають у колі, за допомогою амперметра, вольтметра та осцилографа (рис. 4.10) [6, 7].

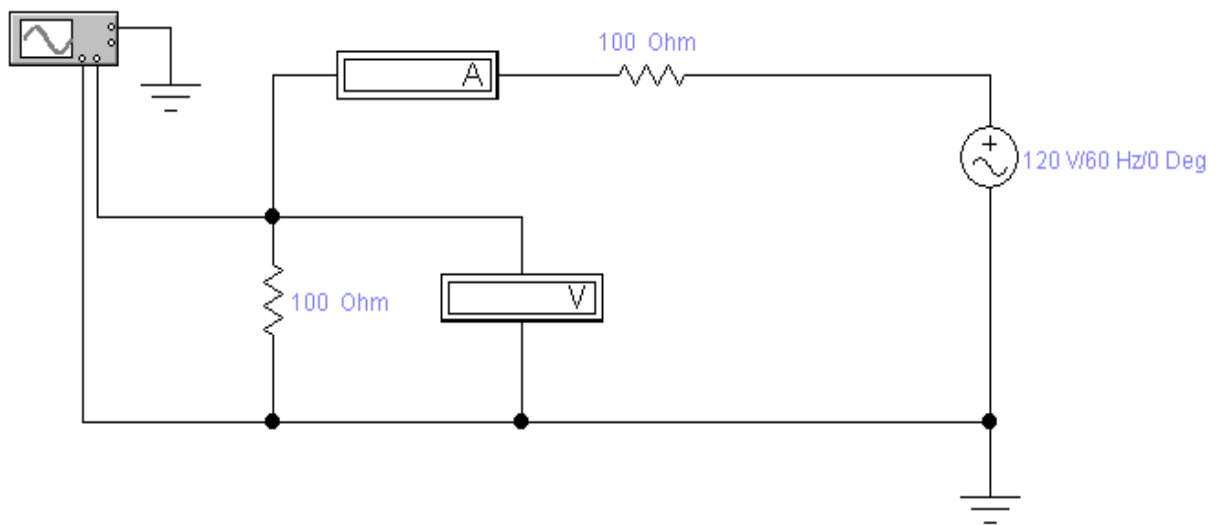


Рисунок 4.10 – Схема 7 електричного кола змінного струму

Загальні положення

Коливальний процес – це процес, що володіє тим чи іншим ступенем повторюваності. Усі коливальні процеси поділяються на два класи: періодичні та неперіодичні. У теорії користуються ще проміжним класом – майже періодичні коливання.

Періодичним називається такий коливальний процес, при якому величина, яка характеризує цей процес і яка взята в будь-який момент часу, через певний відрізок часу T , має те саме значення.

Функція $f(t)$, що є математичним виразом коливального процесу, називається періодичною з періодом T , якщо вона задовольняє умові

$$f(t + T) = f(t).$$

Серед класу періодичних коливальних процесів головну роль відіграють гармоніка, або синусоїдальні коливання, при яких зміна фізичної величини з

часом відбувається за законом синуса або косинуса, загальний запис яких має вигляд

$$y = f(t) = a \cdot \cos((2\pi / T) \cdot t - \varphi),$$

де a – амплітуда коливань;

φ – фаза коливань;

$1/T = f$ – частота;

$2\pi f = \omega$ – циклічна, або кругова частота коливань.

Дослідження коливальних процесів можна виконати за допомогою амперметра, вольтметра та осцилографа.

Двоканальний осцилограф є практично повним аналогом реального осцилографа.

Осі осцилографа можна переключити з режиму відображення амплітуди від часу (Y/T) у режим відображення амплітуди одного з каналів від амплітуди іншого (A/B або B/A).

У режимі Y/T ось X відображає час, а ось Y – кількість вольт на ділення. У режимах A/B і B/A обидві осі показують кількість вольт на ділення. Наприклад, якщо ви порівнюєте вхід каналу А з каналом В (A/B), шкала осі X визначається кількістю вольт на ділення (V/Div), встановленим для каналу В, і навпаки.

Порядок виконання лабораторної роботи

Приклад 1

1. Зібрати коло змінної напруги та дослідити процеси, які перебігають у колі, за допомогою осцилографа (рис. 4.11).

Для цього необхідно розташувати на робочому полі джерело змінної напруги, резистор, ємність, котушку індуктивності, осцилограф.

Осцилограф має чотири контакти. З'єднати контакт осцилографа, який є точкою його заземлення, з елементом **Заземлення**. Аналогічно відмітити вивід каналу А осцилографа та з'єднати його відповідно до наведеної схеми.

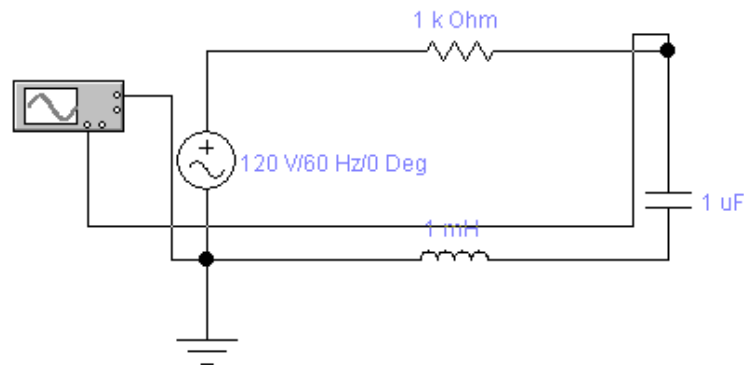


Рисунок 4.11 – Запропонована схема з осцилографом

2. Викликати лицеву панель осцилографа. Для того щоб процеси, які перебігають у досліджуваній схемі, відображалися наочно, необхідно змінити масштаби координатних осей (рис. 4.12).

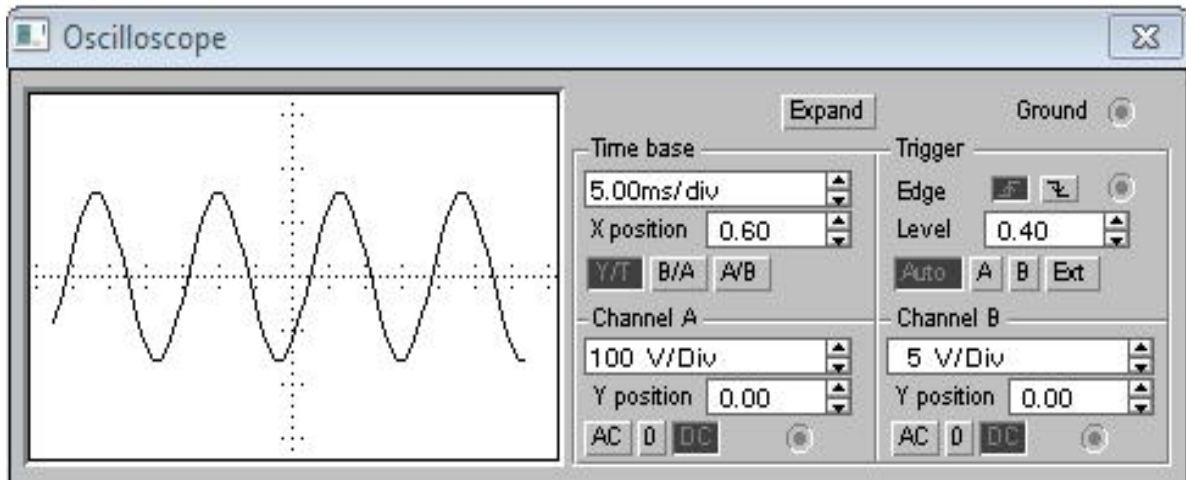


Рисунок 4.12 – Змінення поточного потенціалу точки, що з'єднана з виводом каналу А.

3. Змінити самостійно масштаб осі часу.

Приклад 2

1. Зібрати коло змінної напруги з трансформатором та дослідити процеси, які перебігають у колі, за допомогою вольтметра (рис. 4.13). Для цього необхідно розташувати на робочому полі джерело змінної напруги, трансформатор, резистор, вольтметр.

У вихідне коло трансформатора необхідно ввімкнути навантаження, яке означає умовного споживача (у цьому разі це резистор).

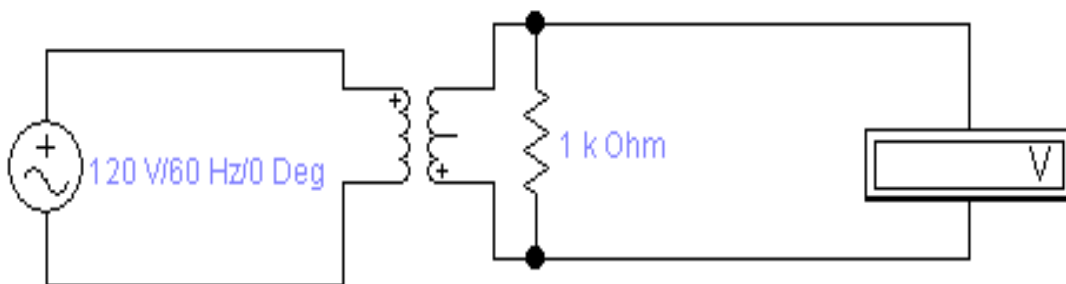


Рисунок 4.13 – Запропонована схема з трансформатором

2. Налаштувати вольтметр на роботу в колі змінного струму (рис. 4.14).

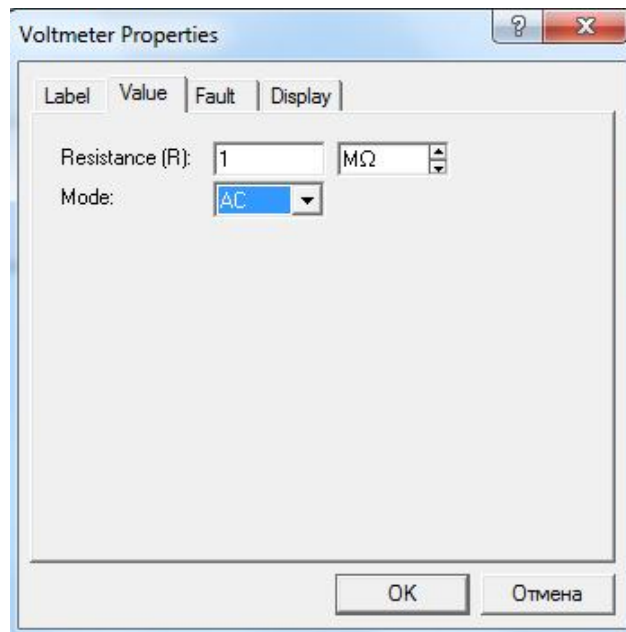


Рисунок 4.14 – Діалогове вікно налаштування параметрів вольтметра

3. Обрати тип трансформатора, який використовується (рис. 4.15).

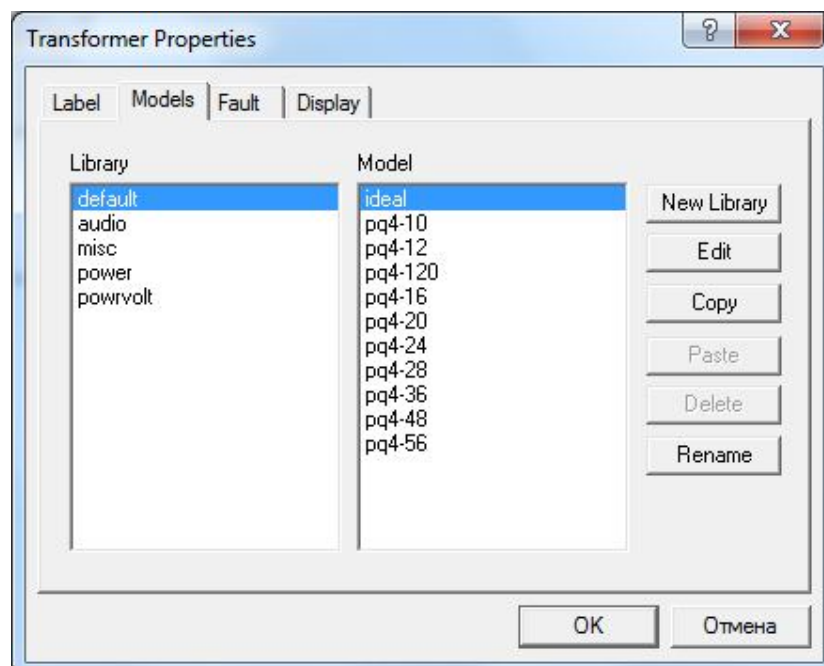


Рисунок 4.15 – Вибір режиму роботи трансформатора

4. Запустити процес моделювання. На екрані вольтметра спостерігається діюче значення напруги у вихідному колі трансформатора.

Контрольні питання

1. Описати алгоритм виконання аналізу схеми.
2. За якою командою можна привласнити компоненту позиційне позначення?
3. У який спосіб можна масштабувати розміри зображення схеми?
4. У який спосіб можна отримати відомості про модель конкретного компонента?
5. Дати визначення поняттю «коливальний процес».
6. На які класи поділяються всі коливальні процеси?
7. Який коливальний процес називають періодичним?
8. За допомогою яких приладів можна виконувати дослідження коливальних процесів?
9. Як виконуються вимірювання за допомогою мультиметра?
10. Як виконуються вимірювання за допомогою осцилографа?
11. Описати лицеву панель осцилографа.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 ВИЗНАЧЕННЯ АЧХ ТА ФЧХ

Мета роботи – дослідження частотних властивостей кіл, оволодіння методами вимірювання частотних характеристик кола.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Зібрати запропоновану схему 8, наведену на рисунку 4.16.

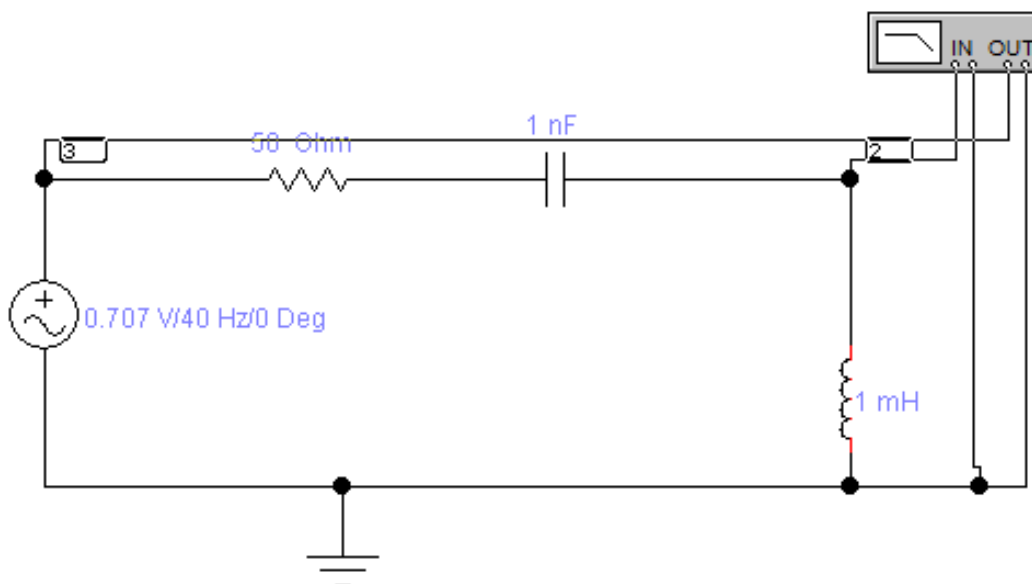


Рисунок 4.16 – Запропонована схема 8

2. Побудувати в масштабі графіки АЧХ та ФЧХ.

Загальні положення

Амплітудно-частотна характеристика – це залежність амплітуди вихідного сигналу деякої системи від частоти її вхідного гармонійного сигналу. Іноді цю характеристику називають «частотним відгуком системи».

АЧХ у математичній теорії лінійних стаціонарних систем описує залежність модуля комплексної передавальної функції лінійної системи від частоти. Значення АЧХ на деякій частоті вказує, у скільки разів амплітуда сигналу цієї частоти на виході системи відрізняється від амплітуди вихідного сигналу на іншій частоті. Зазвичай використовують нормовані до максимуму значення АЧХ.

На графіку АЧХ у декартових координатах по осі абсцис відкладається частота, а по осі ординат – відношення амплітуд вихідного і вхідного сигналів системи.

Зазвичай для осі частоти використовується логарифмічний масштаб, оскільки діапазон частот, що відображається, може змінюватися в досить широких межах (від одиниць до мільйонів герц або рад/с). У разі, коли логарифмічний масштаб використовується і на осі ординат, АЧХ прийнято називати логарифмічною амплітудно-частотною характеристикою.

Фазо-частотна характеристика – це залежність різниці фаз між вихідним і вхідним сигналами від частоти сигналу, або функція, що описує цю залежність, і також – графік цієї функції.

Для лінійного електричного кола – це залежність зсуву по фазі між гармонійними коливаннями на виході та вході цього кола від частоти гармонійних коливань на вході.

Зазвичай ФЧХ використовують для оцінки фазових спотворень форми складного сигналу, що викликаються неоднаковим затриманням в часі його окремих гармонійних складників під час їх проходження по колі.

У програмі Electronics Workbench **Bode plotter** призначено для аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці Magnitude, включена за замовчуванням) і фазо-частотних (при натиснутій кнопці Phase) характеристик при логарифмічній (кнопка LOG, включена за замовчуванням) або лінійній (кнопка LIN) шкалі по осях Y (Vertical) і X (Horizontal).

Налаштування вимірювача полягає у виборі меж вимірювання коефіцієнта передачі й варіації частоти за допомогою кнопок у вікнах F – максимальне та I – мінімальне значення (рис. 3.21). Значення частоти та відповідне їй значення коефіцієнта передачі або фази індукуються у вікнах у правому нижньому куту вимірювача. Значення вказаних величин в окремих точках АЧХ або ФЧХ можна отримати за допомогою вертикальної візирної лінії, що міститься в початковому стані на початку координат і яка переміщується за графіком мишею або за допомогою кнопок ←, →.

Результати вимірювання можна записати також у текстовий файл. Для цього необхідно натиснути кнопку Save і в діалоговому вікні вказати ім'я

файлу (за замовчуванням пропонується ім'я схемного файлу). В отриманому у такий спосіб текстовому файлі з розширенням *.bod* АЧХ і ФЧХ представляються в табличному вигляді.

Підключення приладу до досліджуваної схемою здійснюється за допомогою затискачів IN (вхід) і OUT (вихід). Ліві клеми затискачів підключаються відповідно до входу та виходу досліджуваного пристрою, а праві – до загальної шини. До входу пристрою необхідно підключити функціональний генератор або інше джерело змінної напруги, при цьому будь-яких налаштувань у цих пристроях не потрібно виконувати.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему, наведену на рисунку 4.17, на якій проставити ноди [7,8].

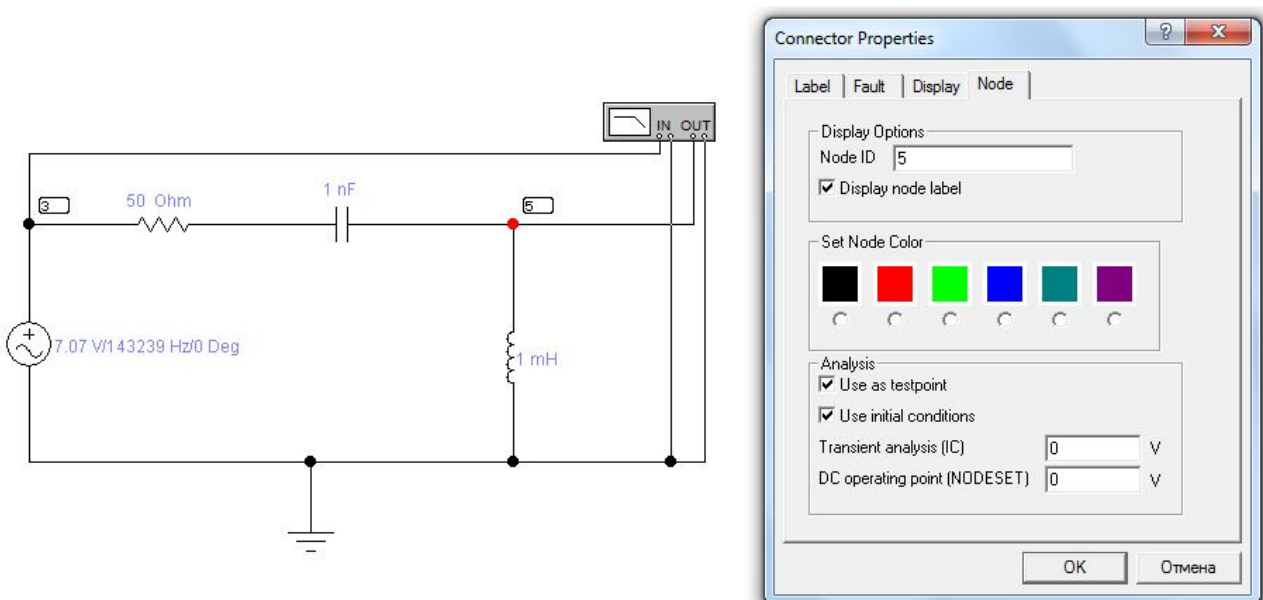


Рисунок 4.17 – Запропонована схема 9

Для цього необхідно розташувати на робочому полі джерело живлення, резистор, ємність, індуктивність, Боде-плотер. У цьому колі два реактивних елементи: ємність та індуктивність. До параметрів генератора синусоїдальної напруги належать: діюче значення напруги, циклічна частота коливань, початкова фаза.

2. Зняти ФЧХ за допомогою Боде-плотера, пара вхідних затискачів якого підключаються до умовного входу, а пара вихідних – до умовного виходу, до вихідної напруги. Для цього необхідно задати початкову та кінцеву частоту, тобто інтервал моделювання, та почати процес моделювання (рис. 4.18).

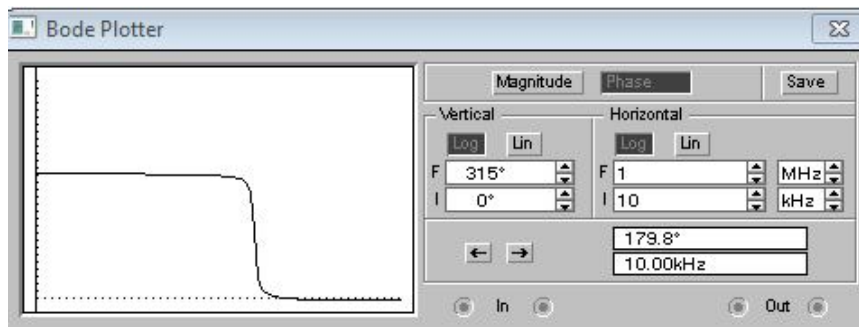


Рисунок 4.18 – ФЧХ

3. Зняти за допомогою Бодє-плотера АЧХ.

4. Виконати вимірювання за змінним струмом за допомогою команди **Analysis/AC Frequency** (рис. 4.19).

4.1. Знати напругу в точці 5, при цьому задати той самий діапазон частот та лінійний масштаб за горизонталлю та вертикаллю.

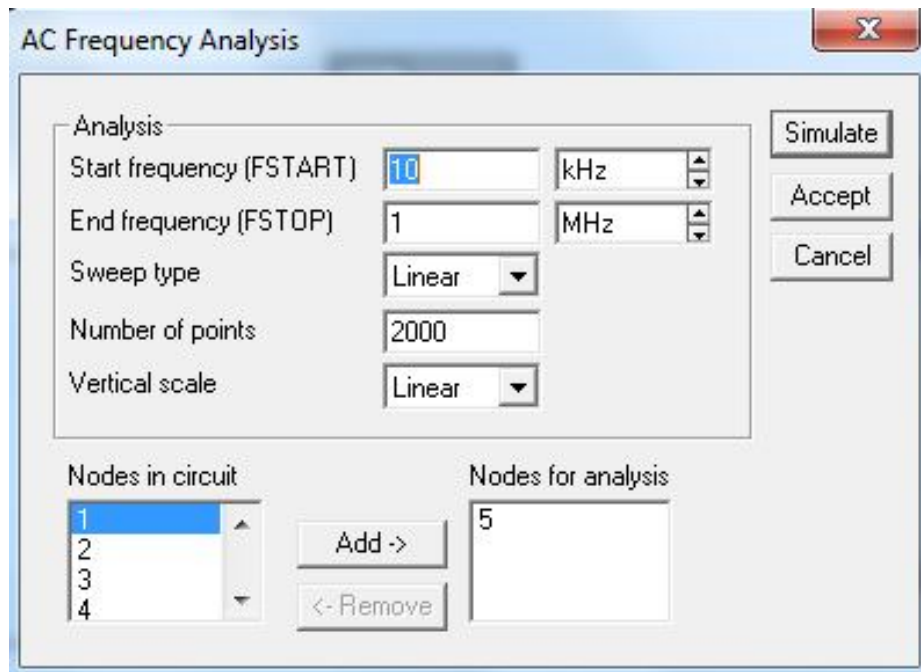


Рисунок 4.19 – Вікно аналізу та введення параметрів

4.2. Натиснути кнопку *Simulate* (рис. 4.19).

Отримані графіки АЧХ та ФЧХ наведені на рисунку 4.20.

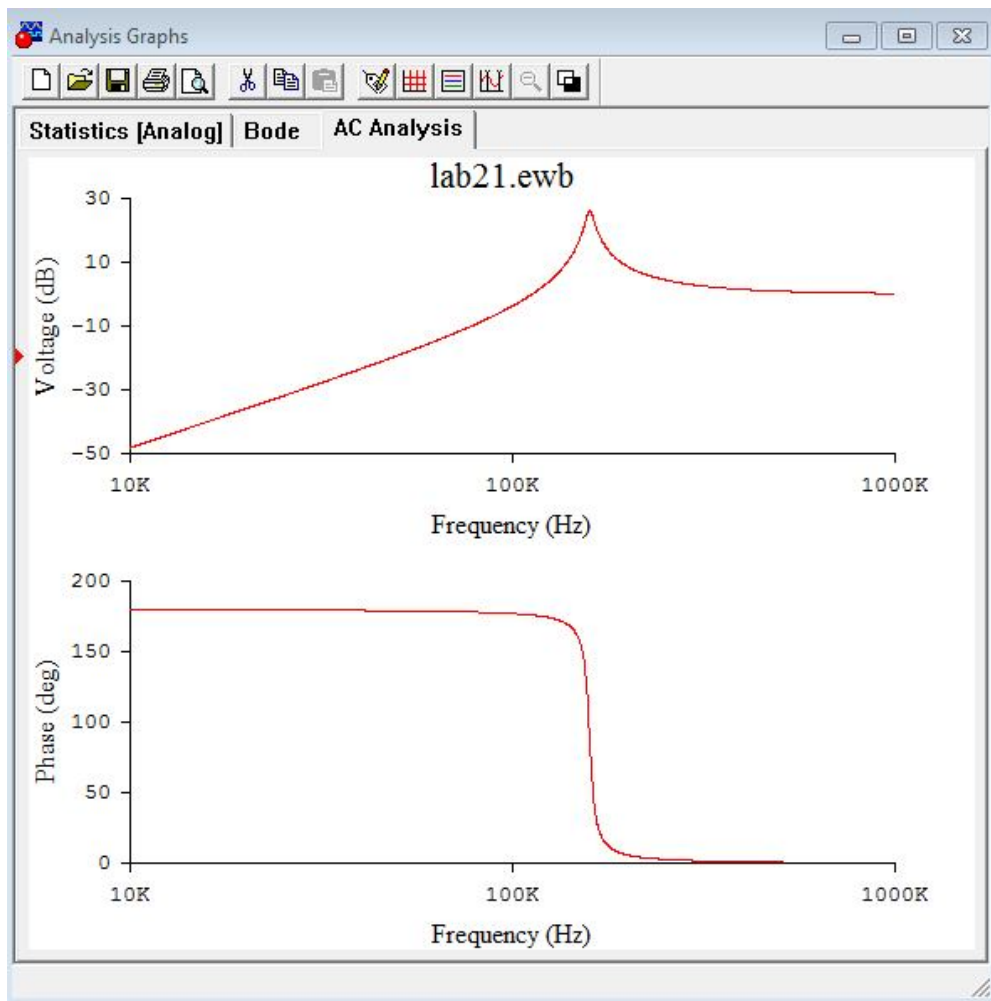


Рисунок 4.20 – Графіки АЧХ та ФЧХ

4.3. Виміряти за допомогою візирів резонансну частоту, яка становить приблизно 159,22 КГц (рис. 4.21).

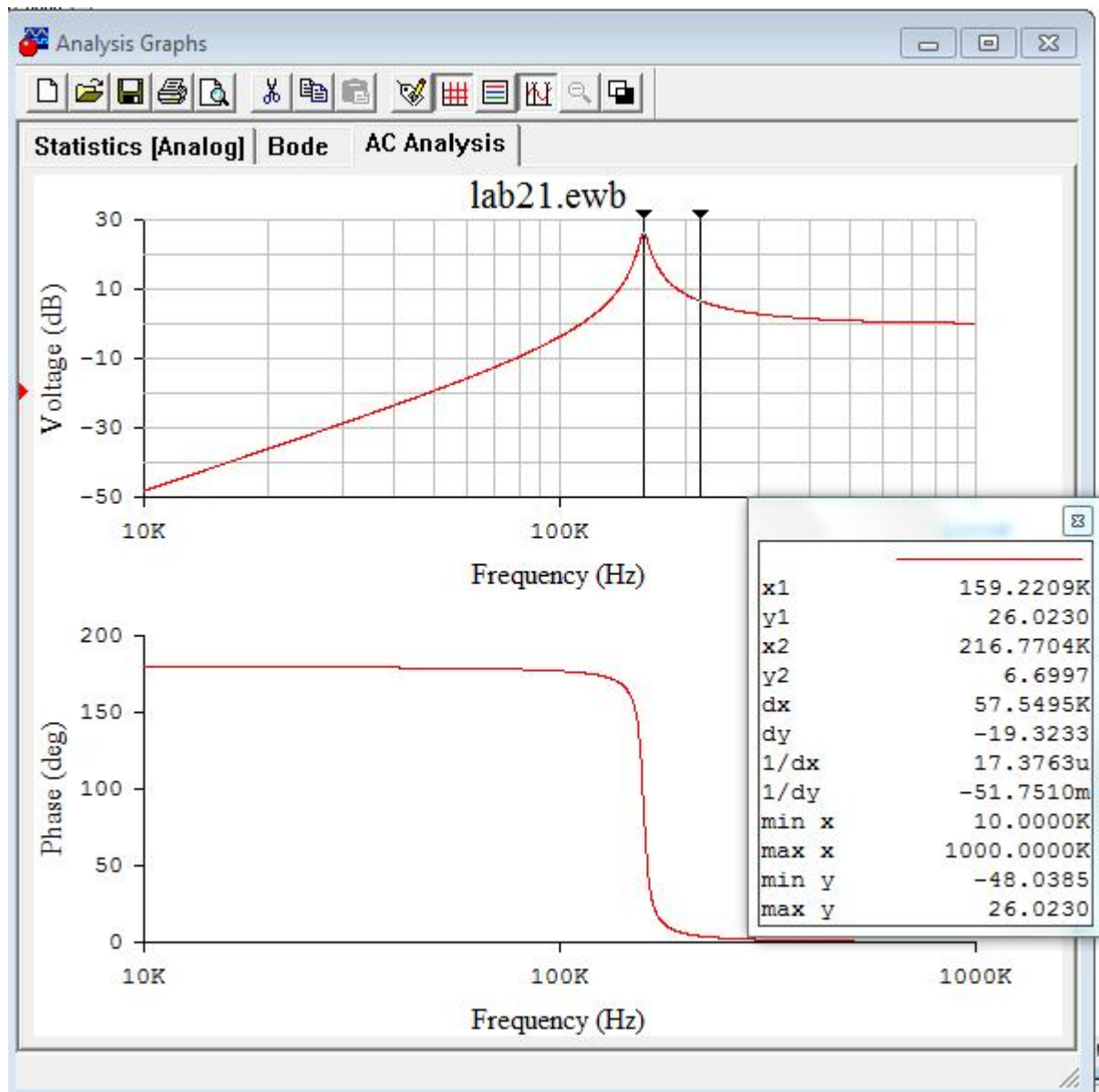


Рисунок 4.21 – Заміри резонансної частоти

Зі зменшенням частоти до нуля рівень АЧХ також зменшується до нуля. Зі збільшенням частоти рівень АЧХ прагне до одиниці.

4.4. Побудувати графіки в логарифмічному масштабі. Для цього необхідно в діалоговому вікні команди **Analysis/AC Frequency** ввести такі параметри (рис. 4.22).

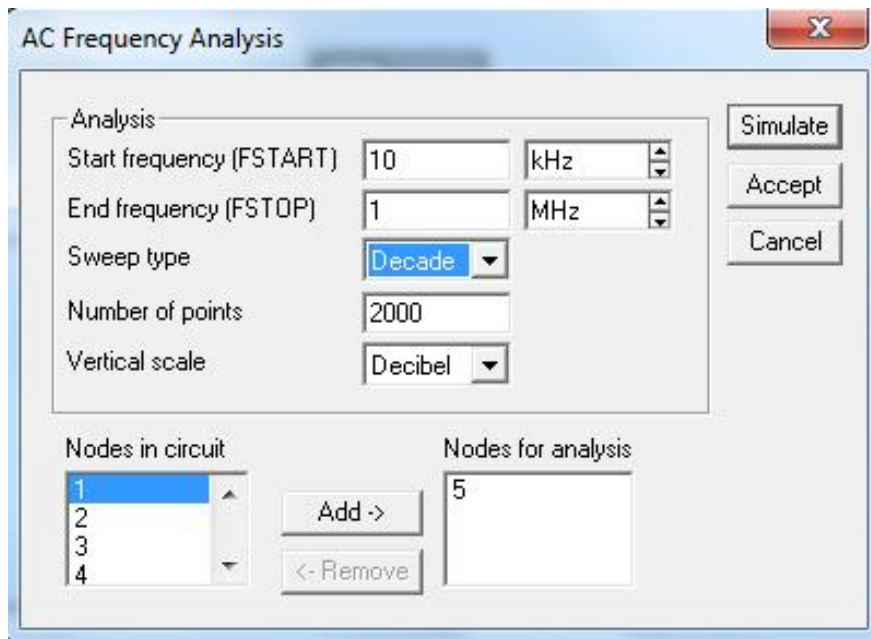


Рисунок 4.22 – Параметри для побудови графіка в логарифмічному масштабі

4.5. Розглянути докладніше поведінку частотних характеристик у районі резонансної частоти, звузивши діапазон частот.

Для цього необхідно звернутися знову до лінійного масштабу за горизонталлю та вертикаллю, указавши звужений діапазон частот від 100 до 200 кГц (рис. 4.23).

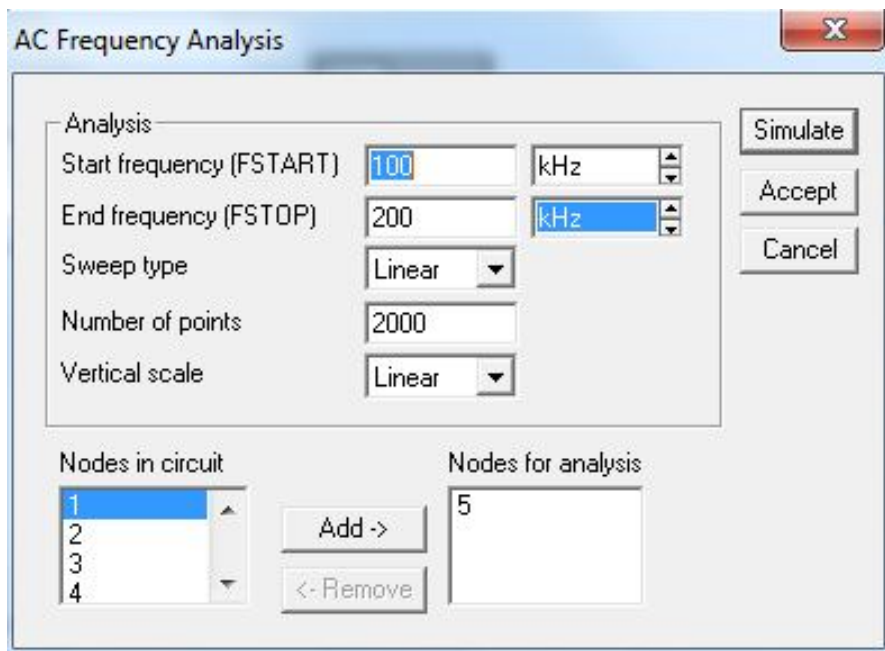


Рисунок 4.23 – Параметри для побудови графіка в звуженому діапазоні частот

Отримані графіки наведені на рисунку 4.24.

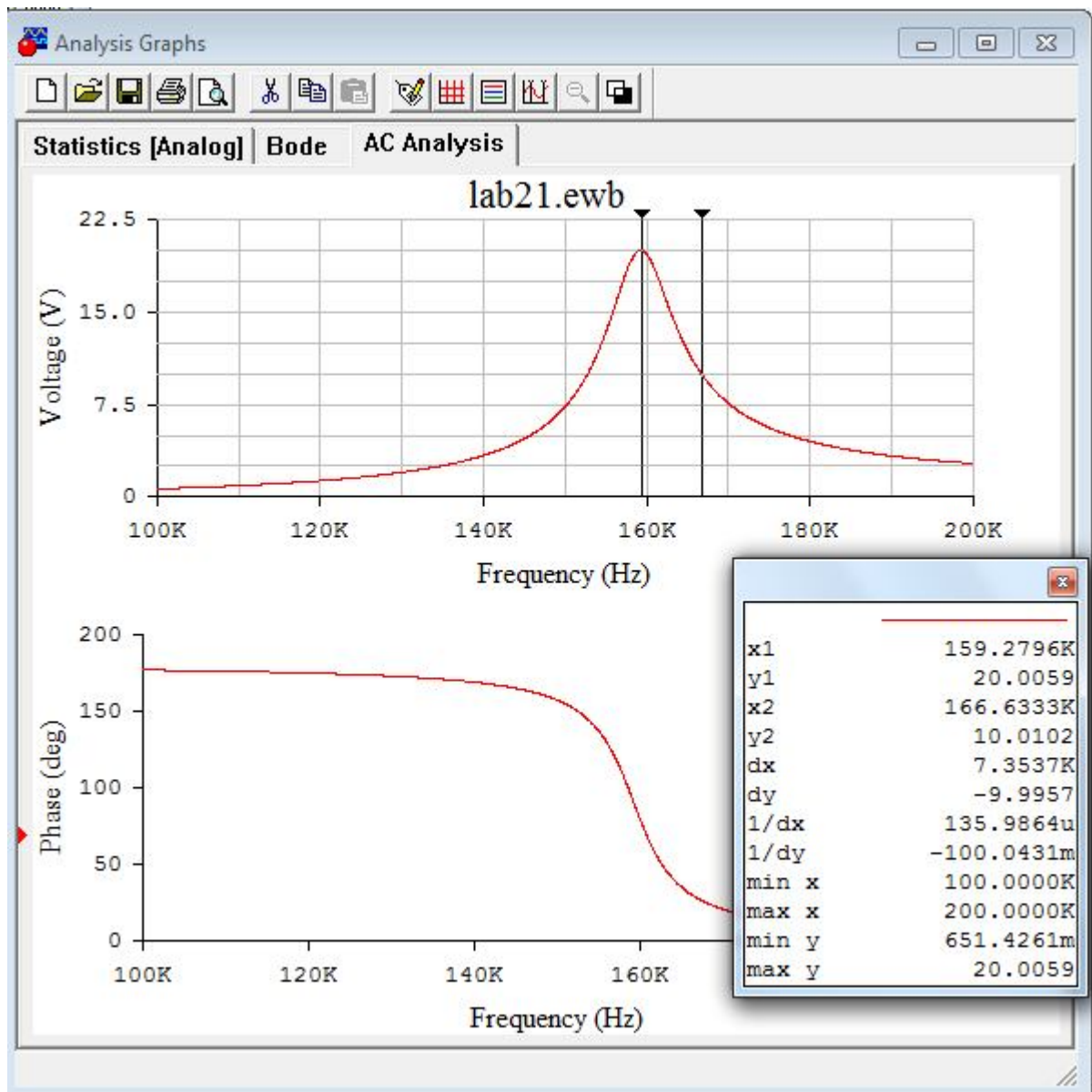


Рисунок 4.24 – Отримані графіки АЧХ та ФЧХ

На частоті максимуму 159.28 КГц АЧХ приймає значення близько 20 децибел.

Приклад 2

1. Зібрати схему, наведену на рисунку 4.25.

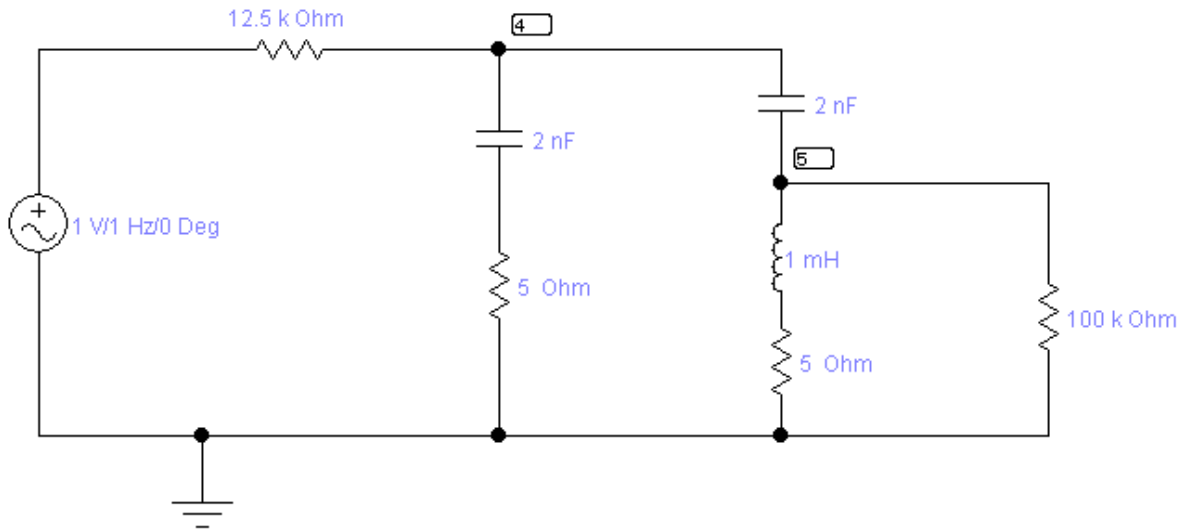


Рисунок 4.25 – Запропонована схема 10

2. Зняти частотні характеристики за допомогою команди **Analysis/AC Frequency** (аналіз по змінному струму) (рис. 4.26).

2.1. Задати широкий частотний діапазон, велику кількість точок та обрати нод 4.

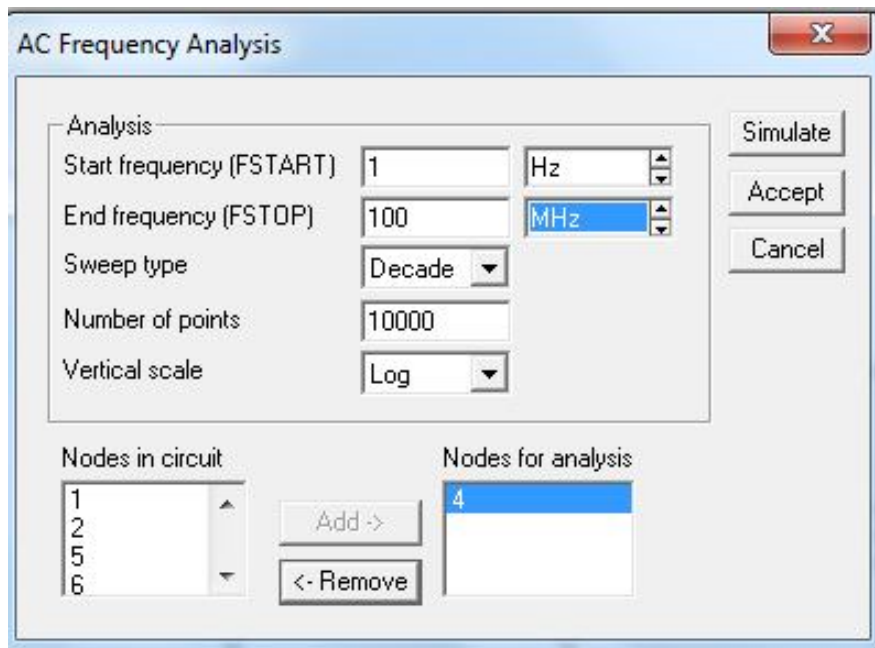


Рисунок 4.26 – Діалогове вікно для задання частотного діапазону

Отримані АЧХ та ФЧХ наведені на рисунку 4.27.

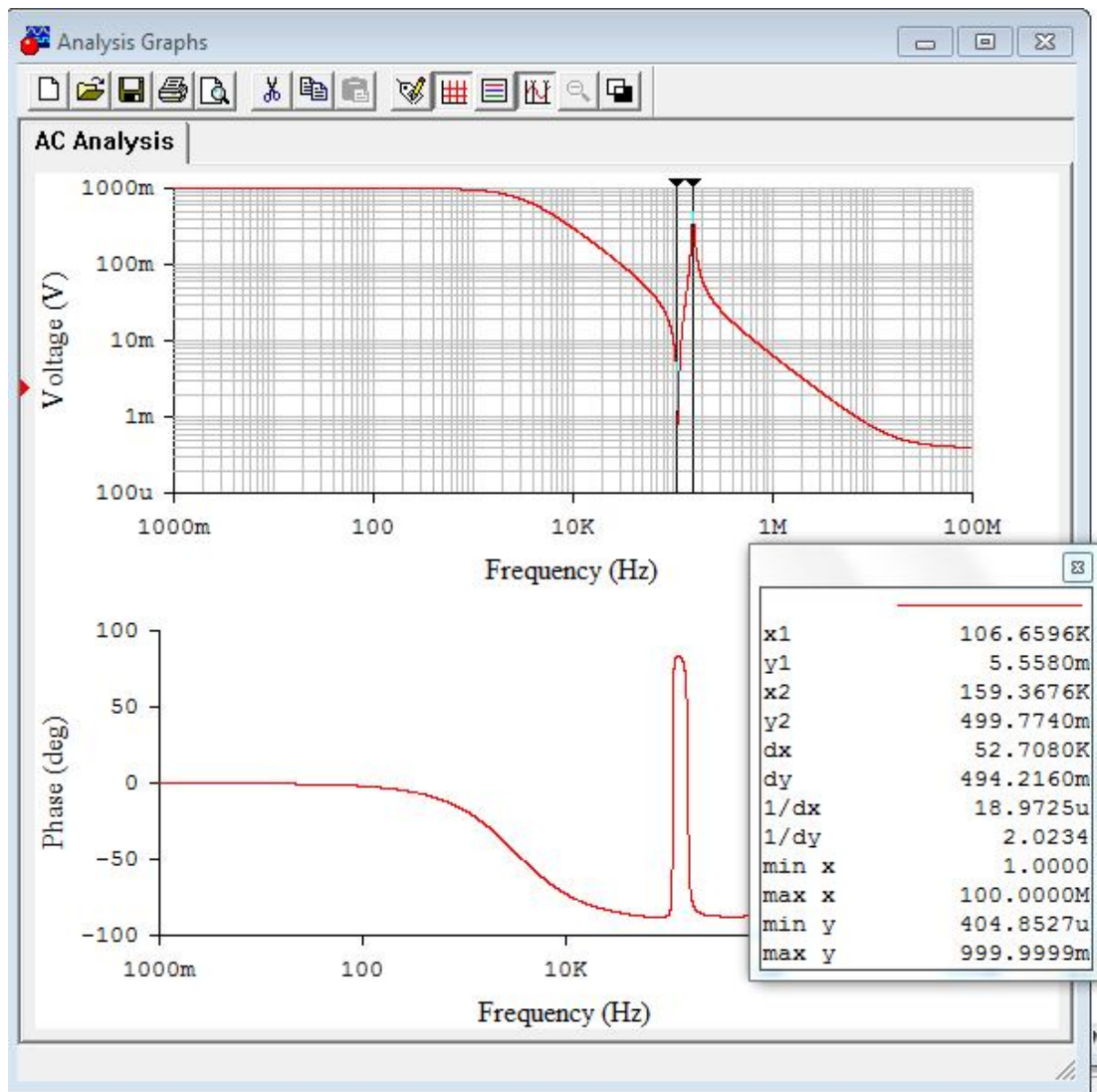


Рисунок 4.27 – Отримані АЧХ та ФЧХ

На графіку АЧХ наявний локальний мінімум на частоті 106,7 КГц, а на частоті 159,4 КГц – локальний максимум (рис. 4.27).

2.2. Розглянути частотний діапазон різкої зміни АЧХ (рис. 4.28).

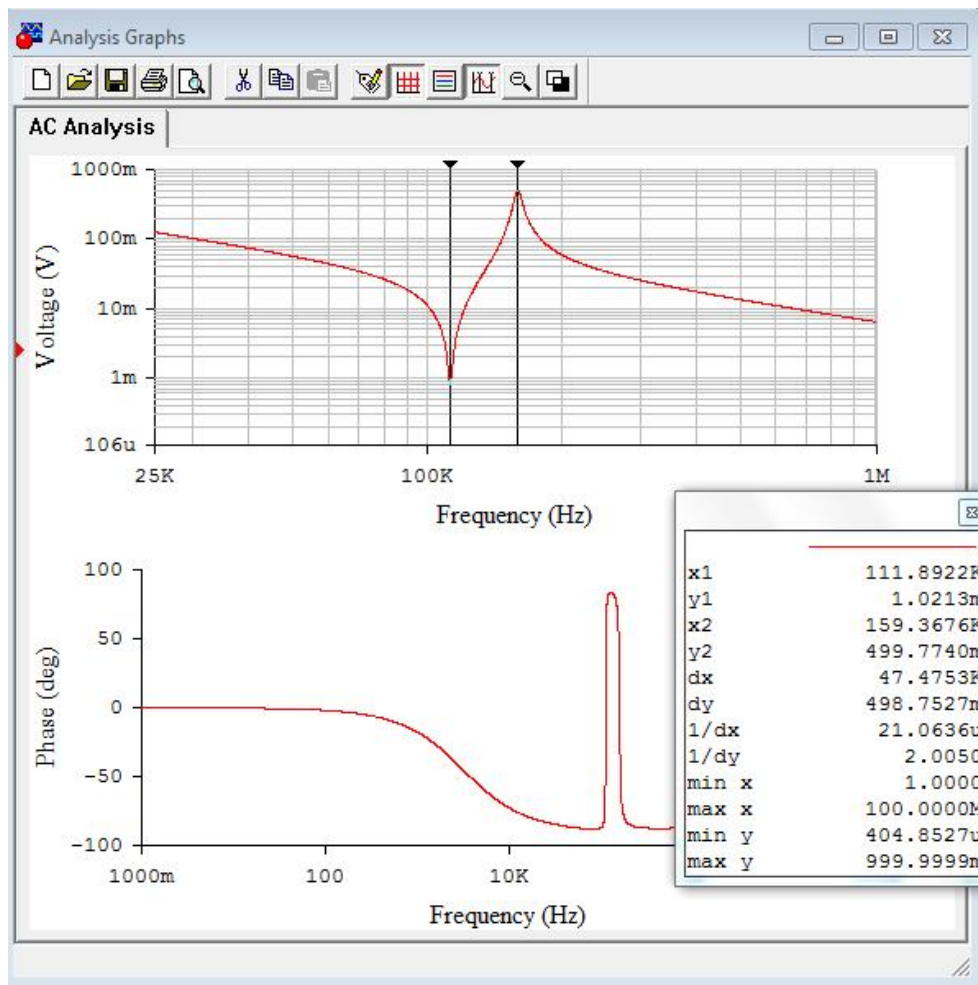


Рисунок 4.28 – Частотний діапазон різкої зміни АЧХ

2.3. Проаналізувати залежність зміни частоти та АЧХ.

2.4. Проаналізувати отримані результати.

Контрольні питання

1. Описати порядок формування та тестування схем.
2. Описати роботу з вимірювальними приладами.
3. Дати визначення АЧХ.
4. Яку залежність у математичній теорії лінійних стаціонарних систем описує АЧХ?
5. Які значення відкладаються на графіку АЧХ у декартових координатах по осі абсцис та осі ординат?
6. Дати визначення ФЧХ.
7. Який прилад у програмі Electronics Workbench призначено для аналізу АЧХ та ФЧХ? Описати принцип його роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДІОД

Мета роботи – практичне використання напівпровідникового діода в електронній техніці.

Завдання на виконання лабораторної роботи

1. Дослідити напруги і струми діода у разі прямого та зворотного підключення *p-n* переходу.

2. Побудувати та дослідити вольт-амперну характеристику (далі ВАХ) напівпровідникового діода.

3. Зібрати схему, наведену на рисунку 4.29, та визначити напругу на діоді U_{np} у разі прямого підключення діода.

4. Перевернути діод і знову запуснути схему та визначити струм $I_{зв}$ діода у разі зворотного підключення.

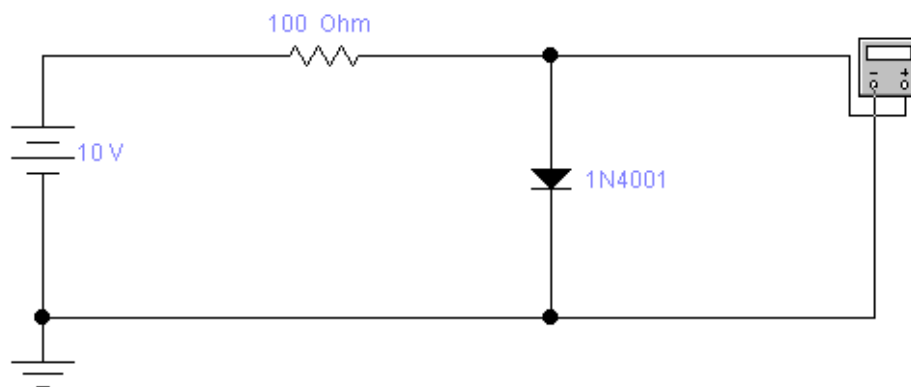


Рисунок 4.29 – Схема 1 із діодом

Загальні положення

Діодом називають електронний прилад із різко вираженою односторонньою провідністю електричного струму: він добре пропускає через себе струм в одному напрямку і дуже погано – в іншому.

Схема пристрою та умовне графічне позначення напівпровідникового діода наведені на рисунку 4.30.

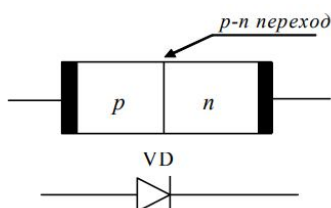
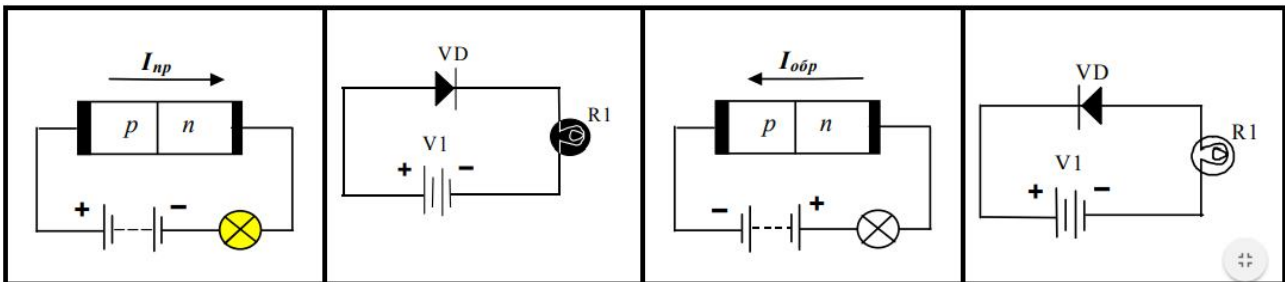


Рисунок 4.30 – Умовне графічне позначення напівпровідникового діода

Діод являє собою невелику пластинку германію або кремнію, одна область якою має електропровідність p -типу, тобто діркову, інша – електропровідність n -типу, тобто електронну. Границю між ними називають p - n переходом. Область p -типу напівпровідника такого приладу є анодом (позитивним електродом), а область n -типу – катодом (негативним електродом) діода.

Принцип роботи напівпровідникового діода ілюструють схеми, наведені на рисунку 4.31.



а) Пряме підключення діоду

б) Зворотне підключення діоду

Рисунок 4.31 – Принцип роботи напівпровідникового діода: а – у разі прямого підключення зовнішнього джерела напруги; б – у разі зворотного

На електронних схемах опори позначають буквою R , конденсатори – буквою C , котушки індуктивності – буквою L , а діоди – буквами VD (або просто D). Якщо до діода VD через лампу накалювання підключити батарею так, щоб вивід позитивного полюса батареї був з'єднаний з анодом, а вивід негативного полюса з катодом діода (рис. 4.31.а), тоді в електричному колі, що утворилося, з'явиться струм, про що буде сигналізувати загорання електричної лампочки (на рис. 4.31.а залито жовтим кольором).

Максимальне значення струму в цьому колі залежить від опору p - n переходу діода та поданої на нього постійної напруги. Такий стан діода називають відкритим, струм, що протікає крізь нього, – прямим струмом I_{np} , а подану на нього напругу, завдяки якій діод виявився у відкритому стані, – прямою напругою U_{np} .

Якщо полюси батареї поміняти місцями, як показано на рисунку 4.31.б, то електрична лампа не загориться, оскільки у цьому разі діод знаходиться в закритому стані й надає струму в колі великий опір.

Невеликий струм через p - n перехід діода в зворотному напрямі все-таки піде, але порівняно з прямим струмом буде настільки незначним, що нитка накалювання лампи навіть не відреагує (лампа не горить). Такий струм називають зворотним струмом $I_{зб}$, а напруга, що створює його, – зворотною напругою $U_{зб}$.

Порядок виконання лабораторної роботи

Приклад 1

1. Перевірити властивість односторонньої провідності діоду. Для цього скласти схему, яка вміщує діод, лампу накаливання та батарею (рис. 4.32).

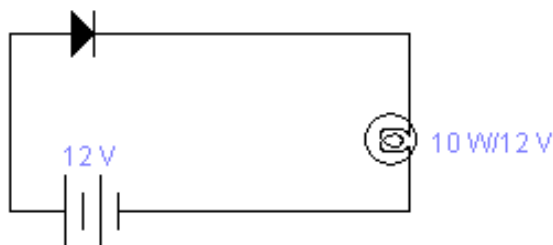


Рисунок 4.32 – Схема 2 з діодом та лампочкою


2. Включити режим моделювання за допомогою кнопки . Лампочка ввімкнулася, про що свідчить колір лампочки (рис. 4.33).



Рисунок 4.33 – Схема 2 з діодом та ввімкненою лампочкою

3. Змінити полярність включення батареї в колі, при цьому діод закриється, і лампа накаливання горіти не буде.

У такому прикладі лампа накаливання виконує подвійну роль: слугує індикатором і обмежувачем струму в колі.

У разі прямого підключення батареї до діода струм у колі може виявитися настільки значним, що *p-n* перехід перегріється і діод вийде з ладу (тепловий пробій).

Головна відмінність германієвих діодів від кремнієвих полягає в значенні прямих напруг, при яких вони відкриваються і практично не роблять помітного опору струмам, які протікають через них.

Германієві діоди відкриваються при прямій напрузі 0,1 ... 0,15 В, кремнієві – при 0,6 ... 0,7 В.

Приклад 2

1. Зібрати схему, наведену на рисунку 4.34. Для цього необхідно розташувати на робочому полі програми діод, резистор, батарею, амперметр, вольтметр [9].

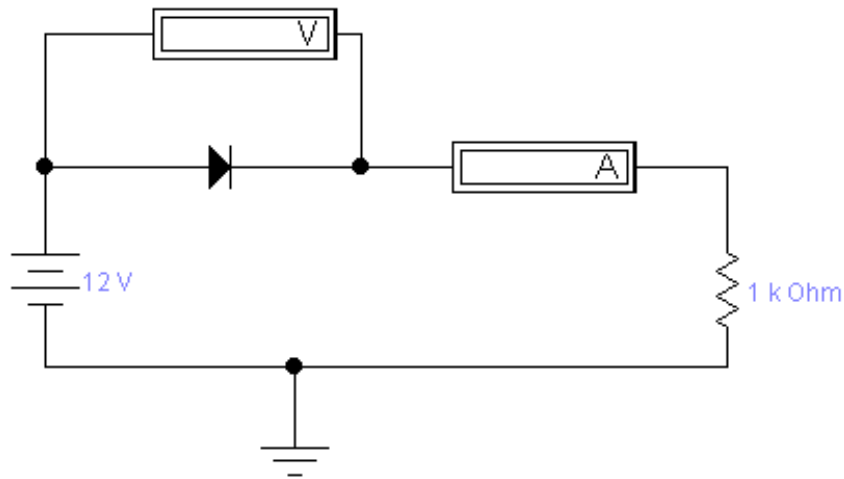


Рисунок 4.34 – Схема 3 з діодом

2. Змінити 10–15 разів величину напруги джерела живлення з самостійним визначенням інтервалу зміни напруги джерела живлення та номіналу навантажувального резистора.

3. Зафіксувати показання вольтметра й амперметра та занести ці показання в таблицю.

4. Побудувати вручну графік залежності струму від напруги.

5. Знищити в наведеній схемі навантажувальний резистор, а джерело напруги замінити на джерело струму.

6. Змінити 10–15 разів величину напруги джерела живлення з самостійним визначенням інтервалу зміни напруги джерела живлення.

7. Зафіксувати показання вольтметра й амперметра та занести ці показання в таблицю.

8. Побудувати графік залежності струму від напруги.

9. Змінити напрям включення діода і провести аналогічні виміри для зняття зворотної ВАХ діода.

10. Побудувати в Excel графіки ВАХ, тобто залежність $I_{np} = f(U_{np})$ і $I_{обр} = f(U_{обр})$.

Приклад 3

1. Зібрати схему для зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода (рис. 4.35).

1.1. Розташувати на робочому полі діод, мультиметр та DC Current Source (генератор струму).

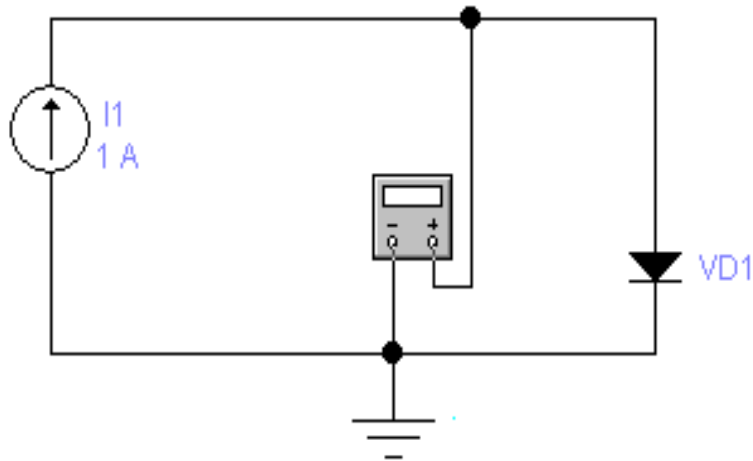


Рисунок 4.35 – Схема для зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода

- 1.2. Установити мультиметр на вимірювання постійної напруги (**DC**).
2. Зняти ВАХ діода у разі змінення струму генератору струму I_1 для струмів 1 мА, 2 мА, 5 мА, 10 мА, 20 мА.
3. Оформити результати у вигляді таблиці.
4. Побудувати графік залежності струму діода від напруги в Excel.
5. Змінити напрям діоду.
6. Зняти ВАХ діоду у разі змінення струму генератору струму I_1 для струмів 1 мА, 2 мА, 5 мА, 10 мА, 20 мА.
7. Оформити результати у вигляді таблиці.
8. Побудувати графік залежності струму діода від напруги в Excel.
9. Зробити висновки.

Приклад 4

1. Зібрати схему для перевірки діода на змінному струмі, наведену на рисунку 4.36.

1.1. Розташувати на робочому полі діод, резистор, функціональний генератор та осцилограф.

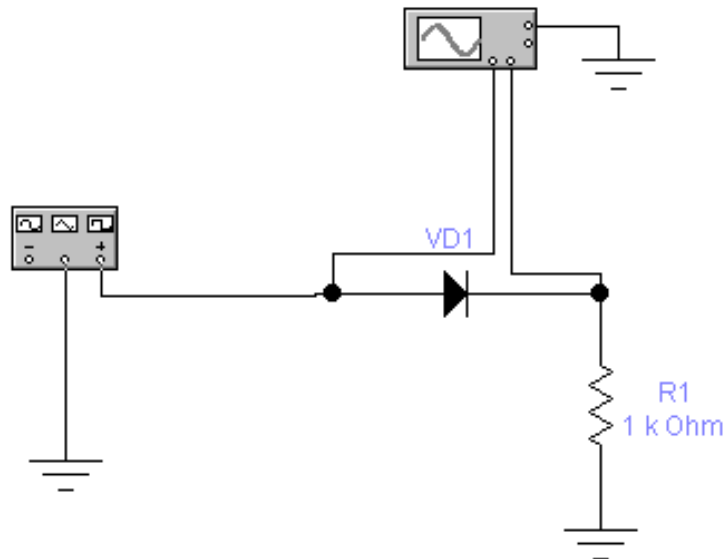


Рисунок 4.36 – Схема для перевірки діода на змінному струмі

1.2. Встановити такі параметри функціонального генератора (рис. 4.37):

- форму вихідної напруги – синусоїда,
- частоту (Frequency)– 1 Гц,
- амплітуду вихідної напруги (Amplitude) 10 В;
- постійне зміщення (Offset) – 0.

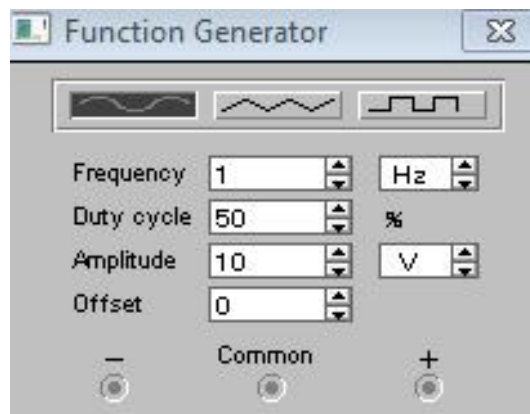


Рисунок 4.37 – Параметри функціонального генератора

2. Активізувати схему.

3. Зарисувати отримані осцилограми (масштаб по осі X – 5 ms/div, по осі Y – 5 V/div) (рис. 4.38).

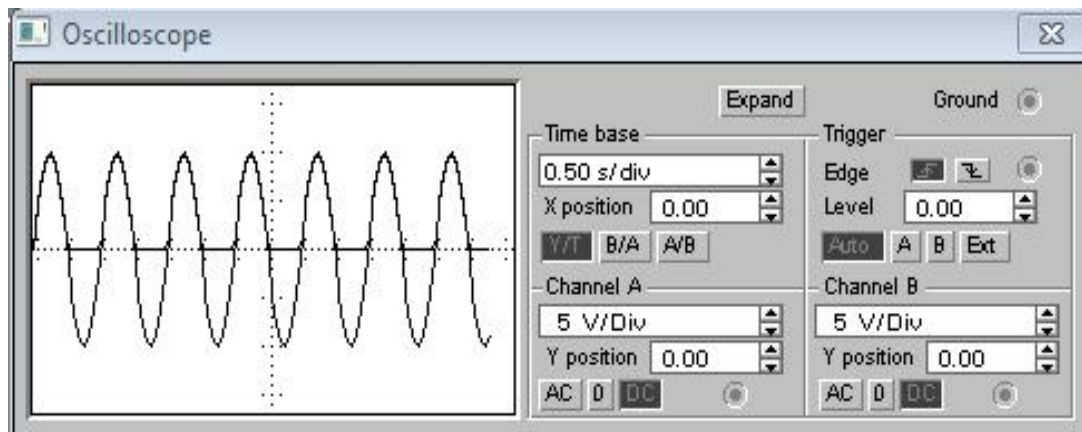


Рисунок 4.38 – Отримані осцилограми

4. Змінити параметри функціонального генератора самостійно.
5. Зарисувати отримані осцилограми, змінивши масштаб по осі X та по осі Y.

Приклад 5

Вольт-амперну характеристику можна отримати шляхом вимірювання напруг на діоді у разі протікання різних струмів унаслідок зміни напруги джерела живлення.

1. Зібрати схему для дослідження ВАХ діода за допомогою осцилографа, наведену на рисунку 4.39 [10].

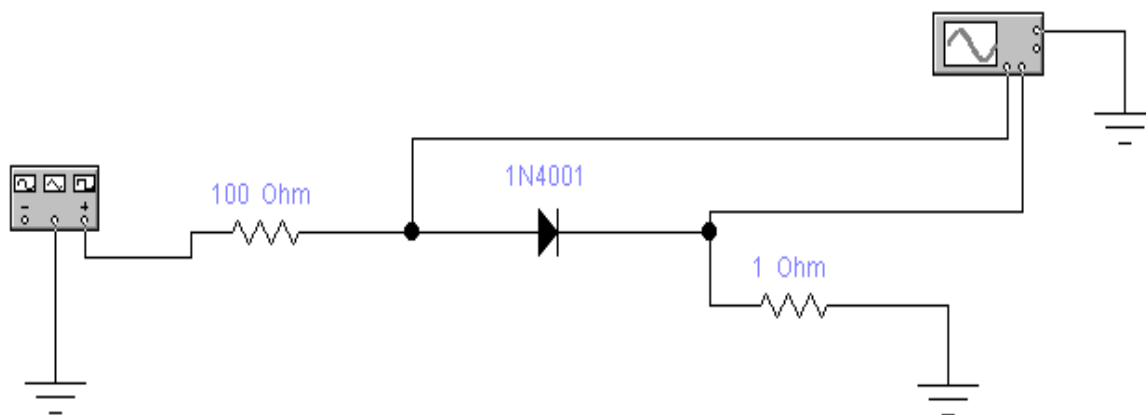


Рисунок 4.39 – Схема для дослідження ВАХ діода за допомогою осцилографа

За умови такого підключення координата точки по горизонтальній осі осцилографа буде пропорційна напрузі, а по вертикальній – струму через діод. Оскільки напруга в вольтах на резисторі в 1 Ом чисельно дорівнює струму через діод в амперах ($I = U/R = U/1 = U$), по вертикальній осі можна безпосередньо зчитувати значення струму.

Якщо на осцилографі обраний режим В/А, то величина, що пропорційна струму через діод (канал В), буде відкладатися по вертикальній осі, а напруга (канал А) – по горизонтальній. Це дасть змогу отримати вольт-амперну характеристику безпосередньо на екрані осцилографа.

У разі отримання ВАХ діода за допомогою осцилографа на канал А замість точної напруги на діоді подається сума напруги діода та напруги на резисторі в 1 Ом. Помилка через це буде мала, оскільки падіння напруги на резисторі буде значно менше, ніж напруга на діоді. Через нелінійність діода його не можна характеризувати величиною опору, як лінійний резистор.

Відношення напруги на діоді до струму через нього U/I , яке називається статичним опором, залежить від величини струму.

У низці випадків на постійний складник струму діода накладається невеликий змінний складник (зазвичай при цьому говорять, що елемент працює в режимі малих сигналів).

У цьому разі інтерес становить диференціальний (або динамічний) опір dU/dI . Величина динамічного опору залежить від постійного складника струму діода, що визначає робочу точку на характеристиці.

На ВАХ, що з'явилася на екрані осцилографа, по горизонтальній осі зчитується напруга на діоді в мілівольтах (канал А), а по вертикальній – струм у міліамперах.

Контрольні питання

1. У чому полягає особливість електропровідності напівпровідників?
2. У чому полягає відмінність напівпровідників з електронною та дірковою електропровідністю?
3. Які струми протікають у напівпровідниках?
4. Яка структура $p-n$ переходу? Пояснити електричні процеси, що відбуваються за умови відсутності зовнішньої напруги.
5. Які процеси відбуваються у разі прямого і зворотного включення $p-n$ переходу?
6. Що таке пробій $p-n$ переходу? Які різновиди пробою Вам відомі?
7. Яке призначення напівпровідникових діодів?
8. Охарактеризувати різновиди діодів.
9. Який діод називають варикапом? Охарактеризувати варикап, перелічити його різновиди та призначення.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ

Мета роботи – вивчення принципу дії, властивостей і характеристик напівпровідникових стабілізаторів напруги.

Завдання до виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися зі схемою та принципом роботи напівпровідникового параметричного стабілізатора напруги на кремнієвому стабілітроні.
2. Дослідити характеристики параметричного стабілізатора напруги на кремнієвому стабілітроні [11].

Загальні положення

У багатьох радіоелектронних пристроях, де використовуються джерела вторинного електроживлення, обов'язково висуваються вимоги підтримки напруги або струму на певному незмінному рівні, незалежно від можливих змін вхідної напруги та вихідного струму. Для забезпечення цієї задачі використовують стабілізатори напруги або струму. У цій лабораторній роботі розглядається параметричний стабілізатор напруги на напівпровідниковому стабілітроні. Параметричні стабілізатори мають просту конструкцію та високу надійність, але мають низький коефіцієнт корисної дії (далі ККД).

Схема параметричного стабілізатора напруг (рис. 4.40) складається з баластного резистора $R_{бал}$ (для обмеження струму через стабілітрон), і стабілітрона, підключеного паралельно навантаженню, що виконує головну функцію стабілізації [11].

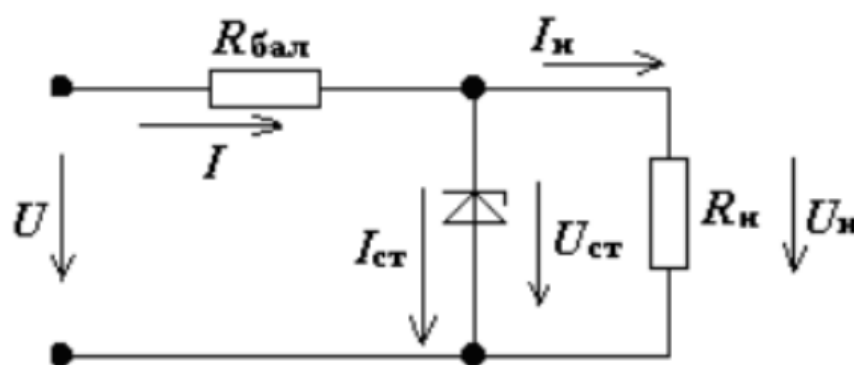


Рисунок 4.40 – Схема параметричного стабілізатора напруги

Головні співвідношення струмів і напруг у стабілізаторі визначаються першим і другим законами Кірхгофа:

$$\begin{cases} I = I_{cm} + I_n \\ U = I \cdot R_{бал} + U_{cm} \\ U_n = U_{cm} \end{cases} \quad (1)$$

Принцип дії параметричного стабілізатора постійної напруги зручно пояснювати за допомогою рисунку 4.41, на якому зображені вольт-амперна характеристика стабілітрона і «перекинута» ВАХ баластного резистора.

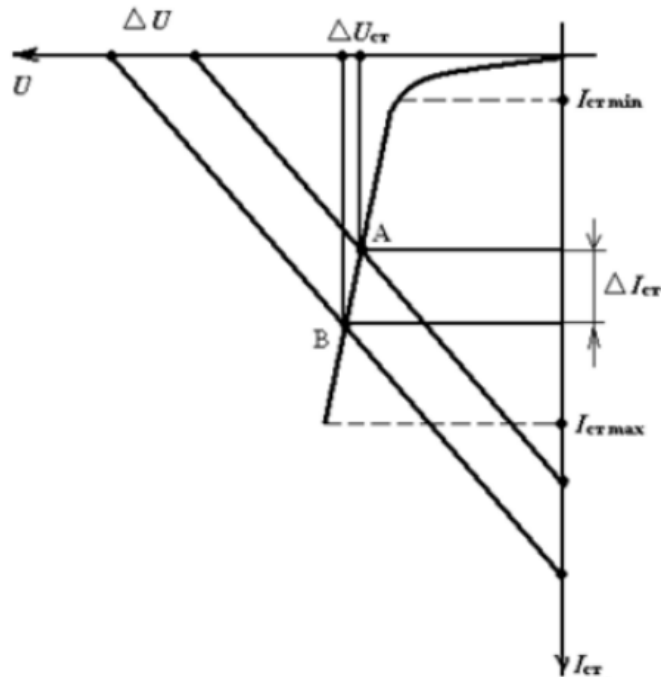


Рисунок 4.41 – Пояснення принципу дії стабілізатора напруги

Робота стабілізатора напруги відбувається у такий спосіб. Унаслідок зміни напруги на вході стабілізатора U , відбувається відповідна зміна струму I , а, отже зміняться струми стабілітрона та навантаження. Однак унаслідок зміни струму стабілітрона напруга на ньому зміниться на дуже маленьку величину відповідно до ВАХ стабілітрона (рис. 4.41), тобто майже не зміниться.

Згідно з другим законом Кірхгофа, унаслідок зміни вхідної напруги, падіння напруги на баластному опорі зміниться пропорційно струму, і виявляється рівним приросту вхідної напруги. Інакше кажучи, весь приріст вхідної напруги падає на баластному опорі, а напруга на стабілітроні та на навантаженні майже не зміниться, що можна записати математично у такий спосіб:

$$U \pm \Delta U = (I_{cm} + I_n \pm \Delta I_{cm}) \cdot R_{бал} + U_n .$$

З огляду на те, що $U = const$ і $R_n = const$, то отримуємо $I_n = const$, при цьому умова збереження робочої точки стабілітрона на ділянці AB вольт-амперної характеристики (рис. 4.41) визначається за формулою:

$$\pm \Delta U = \pm \Delta I_{cm} R_{\text{бал}}$$

Для нормальної роботи стабілізатора за умови навантаження, яке змінюється, зміна струму не повинна призводити до виходу струму стабілітрона за межі максимального та мінімального допустимих його значень.

За умови $U = \text{const}$ і $R_n = \text{const}$ розрахунок стабілізатора зводиться до того, щоб вибрати стабілітрон і вибрати величину $R_{\text{бал}}$, тоді з системи рівнянь (1) отримуємо формулу для розрахунку $R_{\text{бал}}$:

$$R_{\text{бал}} = \frac{U_{\text{min}} - U_n}{I_{cm\text{min}} + I_n}.$$

Опір резистора повинен бути таким, щоб струм стабілітрона був би не менше ніж $I_{cm\text{min}}$, тобто не виходив за межі робочої ділянки AB (рис. 4.41) ВАХ стабілітрона.

Баластний опір визначає основні втрати стабілізатора, тому параметричні стабілізатори використовують тільки в малопотужних схемах.

Стабілітрон вибирається за такими параметрами з довідника:

1. $I_{cm\text{max}}$ – максимально допустимий струм стабілітрона.
2. U_{cm} – напруга стабілізації.
3. $I_{cm\text{min}}$ – мінімальний струм стабілітрона.

До головних параметрів стабілізатора належать:

– коефіцієнт стабілізації, який дорівнює відношенню збільшень приростів вхідної та вихідної напруг. Коефіцієнт стабілізації характеризує якість роботи стабілізатора та визначається за формулою:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{\text{ex}} / U_{\text{ex}}}{\Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{вих}}};$$

– вихідний опір стабілізатора визначається за формулою:

$$R_{\text{вих}} = R_{\text{диф}}.$$

Для знаходження K_{cm} і $R_{\text{вих}}$ розглядається схема заміщення стабілізатора для збільшень приростів (рис. 4.42). Нелінійний елемент працює на ділянці стабілізації, де його опір змінному струмі $R_{\text{диф}}$ є параметром стабілізатора.

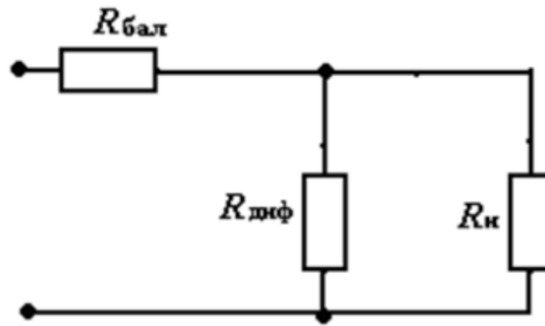


Рисунок 4.42 – Схема заміщення параметричного стабілізатора напруги

Диференціальний опір $R_{диф}$ визначається за формулою:

$$R_{диф} = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}.$$

Для схеми заміщення отримуємо коефіцієнт стабілізації з урахуванням, що $R_n \gg R_{диф}$ і $R_{бал} \gg R_{диф}$

$$K_{ст} = \frac{UR_{бал}}{U_{ст}R_{диф}}.$$

Коефіцієнт стабілізації параметричного стабілізатора напруги $K_{ст} = 5 \div 30$.

Для отримання підвищення стабілізованої напруги застосовують послідовне включення стабілітронів.

Паралельне включення стабілітронів не допускається. З метою збільшення коефіцієнта стабілізації можливо каскадне включення декількох параметричних стабілізаторів напруги.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Побудувати схему в програмі Electronics Workbench (рис. 4.43). Програма дає змогу встановити різні значення опорів $R_{бал}$ (R_b) і R_n ($R_{наг}$) у параметричному стабілізаторі. У цій схемі як лінійний елемент використовують R_b , а як нелінійний – кремнієвий стабілітрон, який включений у зворотному напрямі.

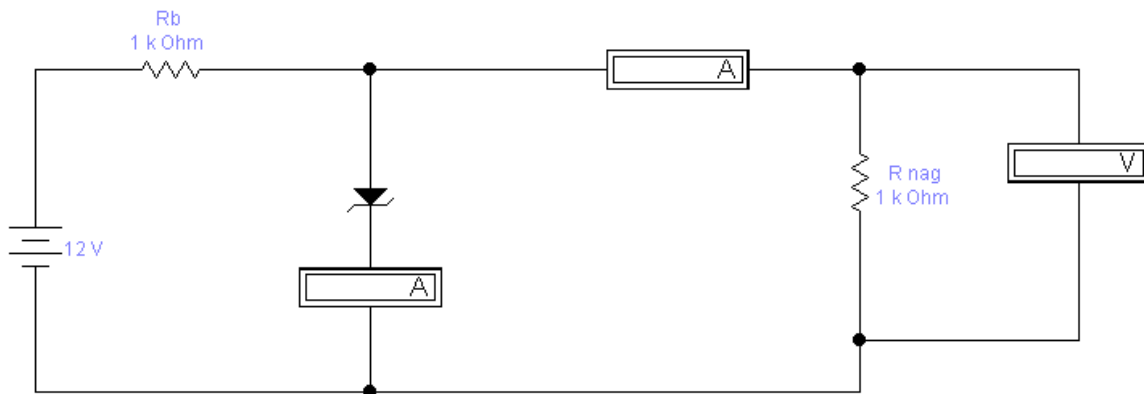


Рисунок 4.43 – Схема напівпровідникового параметричного стабілізатора напруги

2. Зняти залежності вихідної напруги, струму через стабілітрон і струму навантаження від вхідної напруги внаслідок її зміни від максимуму до мінімуму

$$U_{вих} = f(U_{вх}); \quad I_{ст} = f(U_{вх})$$

при незмінному опорі навантаження.

3. Побудувати графіки цих залежностей.

4. Зробити висновки за побудованими графіками і фізично пояснити отримані залежності.

За мінімальне значення вхідної напруги приймається така напруга, при якій струм через стабілітрон дорівнює $I_{ст\ min}$.

5. Зняти залежності вихідної напруги від струму навантаження при незмінній вхідній напрузі.

5.1. Установити вхідну напругу $U_{вх} = const$. Величина $U_{вх}$ повинна бути достатньою для пробію стабілітрона.

5.2. Зняти, змінюючи опір від ∞ до 0, залежності вихідної напруги і струму через стабілітрон від струму навантаження

$$U_{вих} = f(I_{н}); \quad I_{ст} = f(I_{н})$$

5.3. Побудувати графіки знятих залежностей.

6. Зробити за побудованими графіками висновки та фізично пояснити отримані залежності.

7. Визначити:

- статичний і динамічний опір стабілізатора;
- коефіцієнт стабілізації;
- ККД стабілізації.

8. Змінити в запропонованій схемі (рис. 4.43) значення R_b на 10 КОм.

9. Зняти залежності вихідної напруги, струму через стабілітрон і струму навантаження від вхідної напруги внаслідок її зміни від максимуму до мінімуму

$$U_{вих} = f(U_{вх}); \quad I_{ст} = f(U_{вх}).$$

10. Виконати зворотнє підключення стабілітрона при значенні $R_b = 10 \text{ КОм}$.

11. Проаналізувати схему.

Контрольні питання

1. Охарактеризувати переваги та недоліки напівпровідникових параметричних стабілізаторів і сферу їх застосування.

2. Як змінюється вихідний опір стабілізаторів унаслідок зміни температури навколишнього середовища?

3. Які особливості ВАХ кремнієвого стабілітрона?

4. Дати визначення по ВАХ стабілітрона його динамічного і статичного опору.

5. Пояснити залежність напруги на виході від напруги на вході параметричного стабілізатора на кремнієвому стабілітроні.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6 ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ

Мета роботи – вивчення принципу дії та властивостей характеристик компенсаційного стабілізатора напруги.

Завдання до виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися зі схемою та принципом роботи компенсаційного стабілізатора напруги на одному транзисторі.

2. Дослідити характеристики компенсаційного стабілізатора напруги на одному транзисторі.

Загальні положення

Електронні стабілізатори з паралельним включенням лампи, що регулює, зазвичай використовують у тих випадках, коли потрібно отримати високу стабілізовану напругу при малих струмах навантаження, наприклад для живлення анодів електронно-променевих трубок.

Електронні стабілізатори на транзисторах за принципом дії не відрізняються від лампових. Регульований транзистор також може включатися

попередньо з навантаженням і паралельно йому. Головною відмінністю є полярність напруги сигналу неузгодженості, який у цьому разі повинен бути позитивним.

У підсилювачах постійного струму використовують транзистори з великим коефіцієнтом посилення по струму, а як регульований транзистор необхідно вибрати транзистор, у якого допустимий струм колектора перевищує струм навантаження стабілізатора. Якщо струм навантаження перевищує допустимий для певного транзистора, застосовують шунтування його резистором або паралельне включення транзисторів. В останньому випадку для рівномірного розподілу струмів між транзисторами в гільці бази або емітера включають резистори невеликого опору.

Електронний стабілізатор являє собою різновид комбінованих схем, що використовують підсилювач постійного струму зі зворотним зв'язком.

Електронні стабілізатори, в яких як регульовальний елемент використовують електронну лампу або транзистор, є стабілізаторами компенсаційного типу.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зібрати в програмі Electronics Workbench наведену схему компенсаційного стабілізатора напруги на одному транзисторі (рис. 4.44).

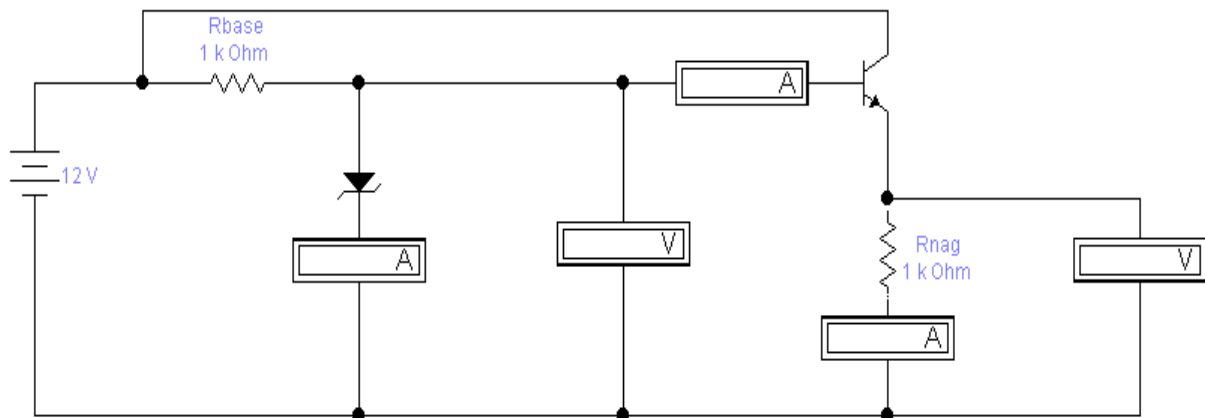


Рисунок 4.44 – Схема компенсаційного стабілізатора напруги

2. Дослідити характеристики компенсаційного стабілізатора напруги.

2.1. Зняти залежність напруги $U_{вих}$, $U_{бази}$, $I_{ст}$ на виході стабілізатора від напруги $U_{вх}$ при постійному опорі навантаження.

Опір навантаження встановити так, щоб струм через стабілітрон не перевищив максимально допустимого значення.

2.2. Побудувати графіки знятої залежності. За графіком зробити висновки та фізично пояснити отримані залежності.

3. Зняти залежність вихідної напруги від струму навантаження

$$U_{вих} = f(I_{наван})$$

при незмінній вхідній напрузі. Вибір величини вхідної напруги зробити самостійно.

4. Виміряти та побудувати графіки $I_{базис} = f(I_{наван})$, $U_{базис} = f(I_{наван})$.

5. Зробити за графіками висновки та фізично пояснити отримані залежності.

6. Визначити:

- коефіцієнт стабілізації стабілізатора;
- динамічний опір стабілізатора;
- коефіцієнт корисної дії стабілізатора.

Контрольні питання

1. У яких випадках використовують електронні стабілізатори з паралельним включенням лампи, що регулює?

2. Охарактеризувати переваги та недоліки компенсаційного стабілізатора напруги.

3. У чому полягає головна відмінність електронних стабілізаторів на транзисторах від лампових?

4. До якого типу стабілізаторів належать електронні стабілізатори, в яких як регулювальний елемент використовують електронну лампу або транзистор?

5. З яким коефіцієнтом посилення по струму в підсилювачах постійного струму використовують транзистори?

6. З яким допустимим струмом колектора в підсилювачах постійного струму використовують регульовані транзистори?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7 ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИПРЯМНИХ СХЕМ

Мета роботи – дослідження схем однопівперіодних, двопівперіодних та мостових випрямлячів.

Завдання до виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему (рис. 4.45), на вхід А осциллографа надходить вихідний сигнал, а на вхід В – вхідний.

2. Виміряти і записати максимальні вхідні й вихідні напруги.

3. Виміряти період T вихідної напруги по осцилограмі.

4. Визначити максимальну зворотну напругу U_{max} на діоді.

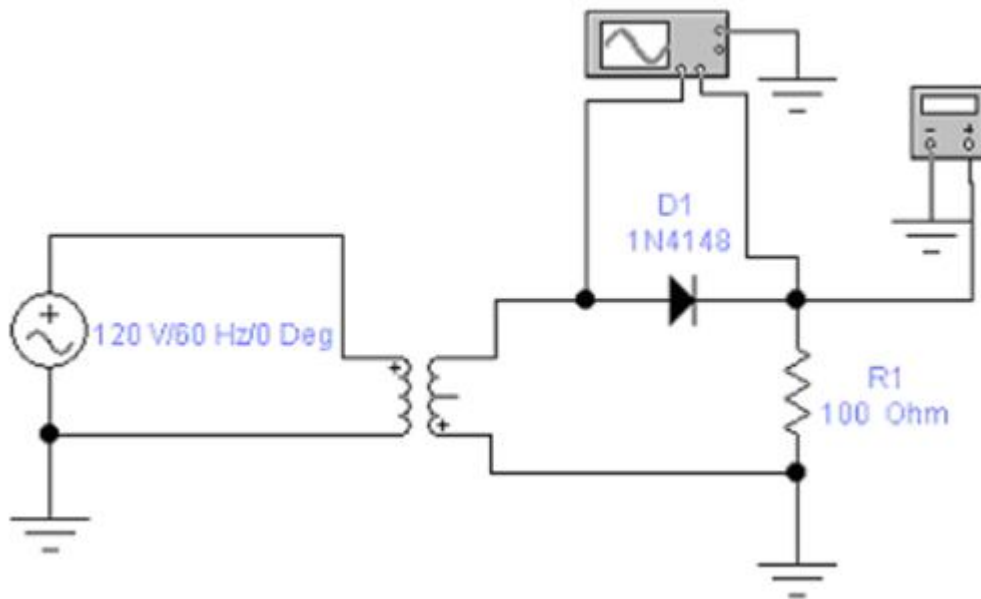


Рисунок 4.45 – Схема однофазного однопівперіодного діодного випрямляча

Загальні положення

Для випрямлення однофазної змінної напруги застосовують однопівперіодні або двопівперіодні випрямлячі.

У схемі однопівперіодного випрямляча (рис. 4.46) діод включений послідовно з навантаженням R_H і вторинною обмоткою трансформатора. У процесі аналізу роботи випрямлячів робиться припущення, що діод ідеальний, тобто:

- опір діода в прямому напрямі дорівнює нулю;
- зворотній опір діода нескінченно великий.

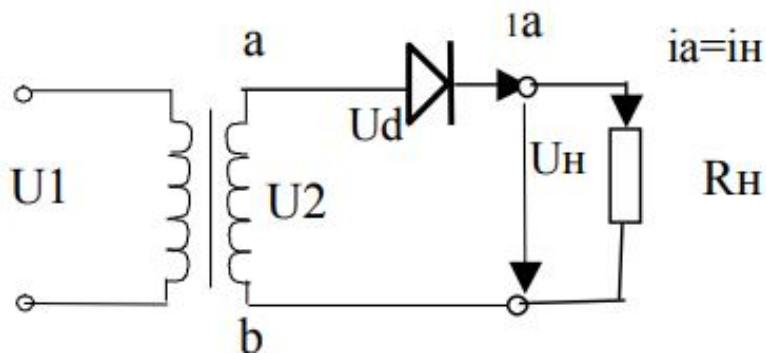


Рисунок 4.46 – Схема однопівперіодного випрямляча

На рисунку 4.47 наведені часові діаграми однопівперіодного випрямляча.

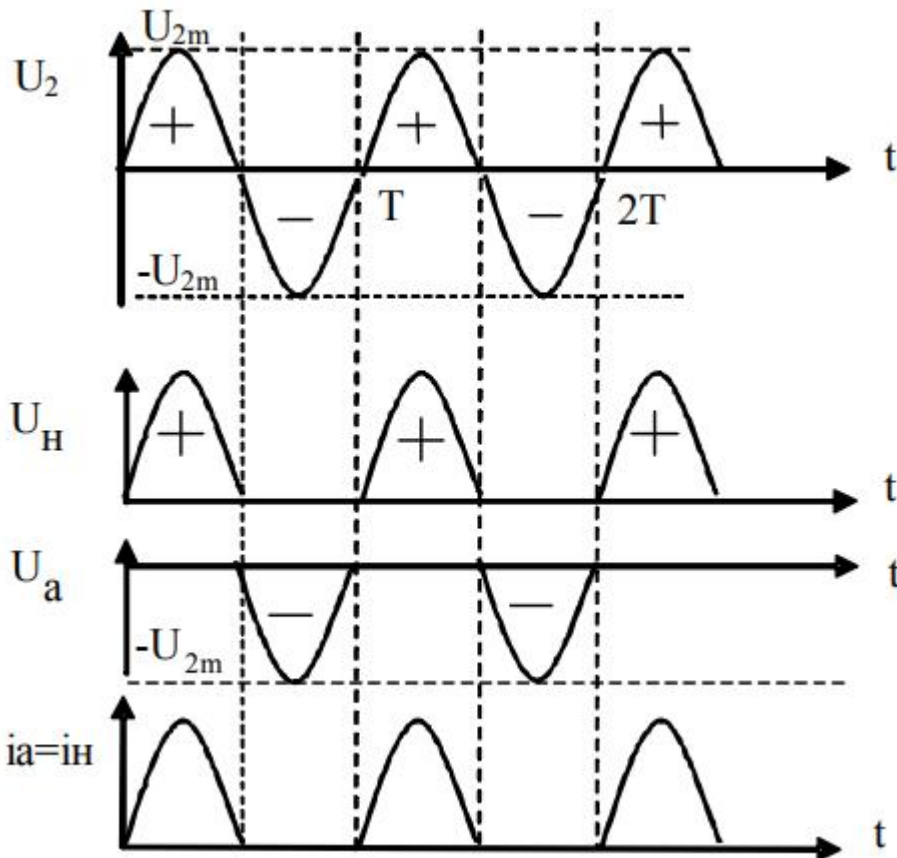


Рисунок 4.47 – Часові діаграми однопівперіодного випрямляча

Протягом додатного півперіоду ($0 \leq t \leq T/2$) (рис. 4.47) (уважається, що в цьому разі вивід вторинної обмотки трансформатора **a** має більш високий потенціал, ніж вивід **b** (рис. 4.46), напруга для діода є прямою, діод відкритий, і в колі вторинної обмотки трансформатора протікає струм i_n . Оскільки опір відкритого діода прийнято вважати рівним нулю, то вся напруга вторинної обмотки докладена до навантаження (рис. 4.46), тобто падіння напруги U_n повторює напругу U_2 із вторинної обмотки трансформатора ($U_n = U_2$).

У другому напівперіоді ($T/2 \leq t \leq T$) полярність напруги U_2 протилежна, потенціал у точці **a** нижче потенціалу в точці **b**. Діод закритий, і вся напруга вторинної обмотки U_2 буде докладена до закритого діода, тобто $U_a = U_2$.

Максимальне значення цієї зворотної напруги на діоді дорівнює амплітудному значенню напруги вторинної обмотки трансформатора

$$U_{зв.вих} = U_{2m} = \sqrt{U_2},$$

де U_2 – діюче значення напруги.

З рисунку 4.47 слідує, що струм і напруга в навантаженні мають пульсуючий характер, який відрізняється від постійного. Таку напругу можна представити рядом Фур'є:

$$U_n = \frac{U_{2m}}{p} \left(1 + \frac{p}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots \right)$$

Перший доданок суми визначає постійний складник випрямленої напруги:

$$U_0 = U_{н.сер} = \frac{U_{2m}}{p}$$

Отже, $U_{н.сер}$ становить близько 30 % від максимального значення.

Якість випрямленої напруги характеризують параметром p , коефіцієнтом пульсацій, який визначається відношенням амплітуди першої гармоніки в розкладанні в ряд Фур'є U_{m1} до середнього значення випрямленої напруги U_0 :

$$p = \frac{U_{m1}}{U_0} = \frac{\frac{U_{2m} \cdot p}{p \cdot 2}}{\frac{U_{2m}}{p}} = \frac{p}{2} \approx 1,57.$$

Недоліком однопівперіодних випрямлячів є низьке значення випрямленої напруги та великий коефіцієнт пульсацій. Тому застосовуються вони в простих і малопотужних схемах.

Кращими характеристиками володіють схеми двопівперіодних випрямлячів, зокрема мостовий випрямляч (рис. 4.48).

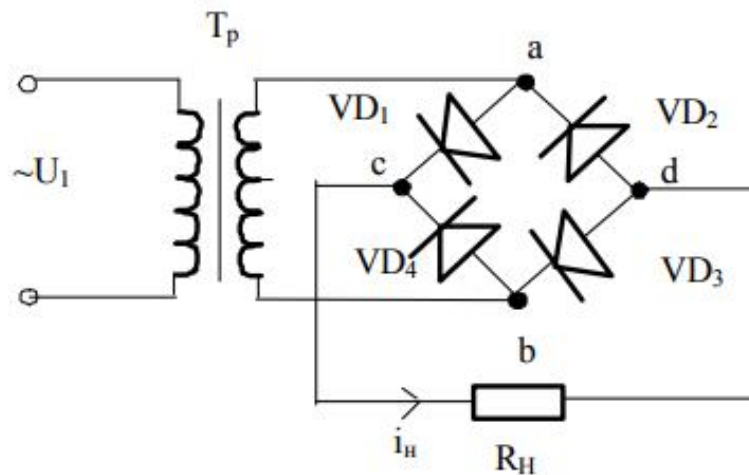


Рисунок 4.48 – Мостовий випрямляч

Мостовий випрямляч (рис. 4.48) включає в себе силовий трансформатор T_p і діодний міст $VD_1 \dots VD_4$, в діагональ **ab** якого надходить змінна напруга, а з діагоналі **cd** знімається випрямлена (пульсуюча) напруга.

Широке поширення на практиці отримали схеми випрямлячів із множенням напруги (рис. 4.49). Пристрої цього типу застосовують у високовольтних випрямлячах на малі струми навантаження (монітори комп'ютерів, телевізійні приймачі, осцилографи тощо) [8-11].

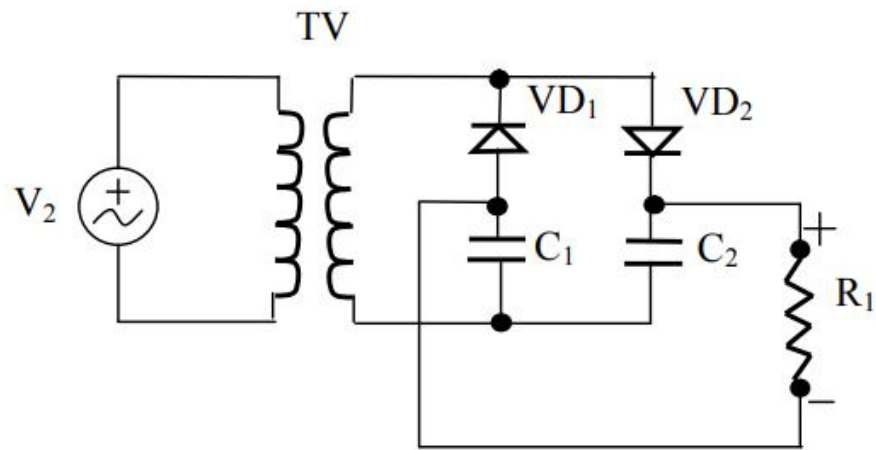


Рисунок 4.49 – Схема випрямляча з подвоєнням напруги

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему однопівперіодного випрямляча однофазного струму та дослідити роль конденсатора в ємнісному фільтрі для згладжування пульсуючої напруги (рис. 4.50).

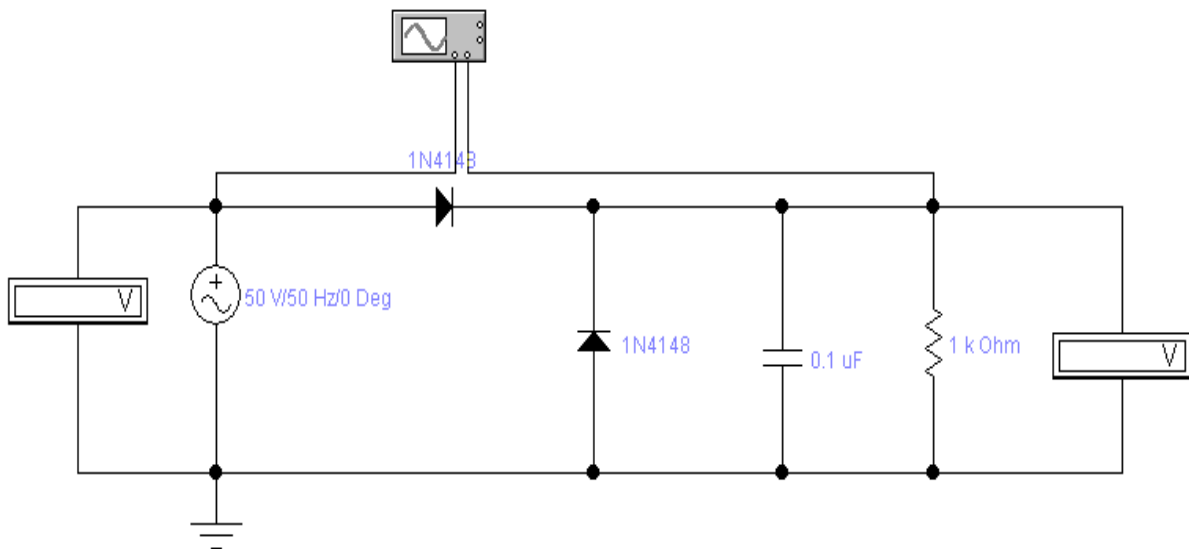


Рисунок 4.50 – Схема випрямляча з ємнісним згладжувальним фільтром

2. Запустити процес моделювання, зняти та зарисувати осцилограми вихідного сигналу (рис. 4.51).

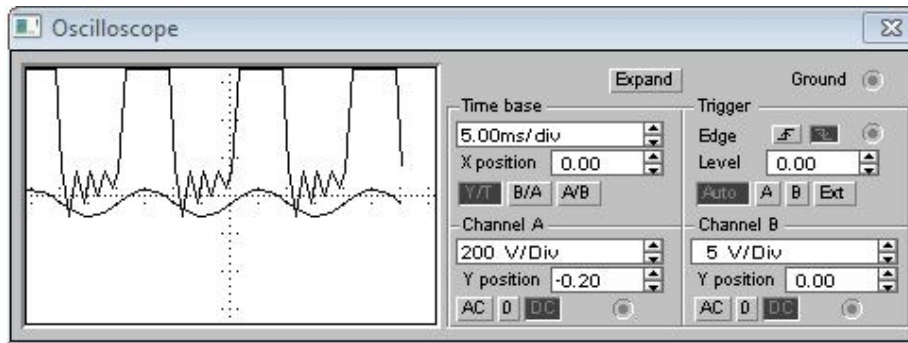


Рисунок 4.51 – Осцилограми вихідного сигналу

3. Збільшити при фіксованому значенні величини та частоти вхідного джерела змінного сигналу (частота 50 Гц) величину ємності, знімаючи осцилограми вихідного сигналу.

4. Збільшити ємність із джерелом змінної вхідної напруги з частотою 50 кГц, знімаючи осцилограми вихідного сигналу.

5. Пояснити процес однопівперіодного випрямлення.

6. Пояснити особливості зміни коефіцієнта згладжування пульсуючого напруги на навантаженні R у перетворювачі змінного струму в постійний струм (рис. 4.50) залежно від ємності конденсатора і частоти вхідної напруги.

7. Зібрати мостову схему двопівперіодного випрямляча та проаналізувати її роботу (рис. 4.52).

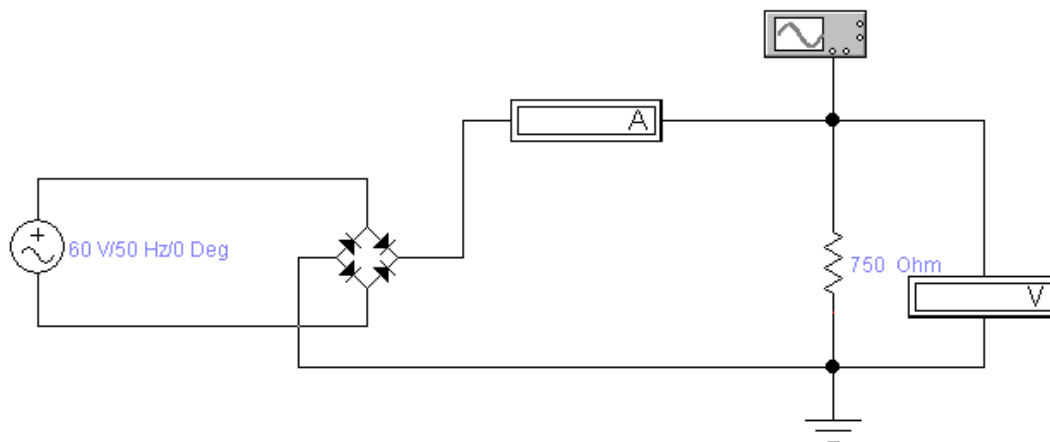


Рисунок 4.52 – Схема двопівперіодного випрямляча

8. Зняти графік вихідної напруги двопівперіодного випрямляча.

9. Зібрати схему мостового випрямляча та проаналізувати її роботу (рис. 4.53) [10].

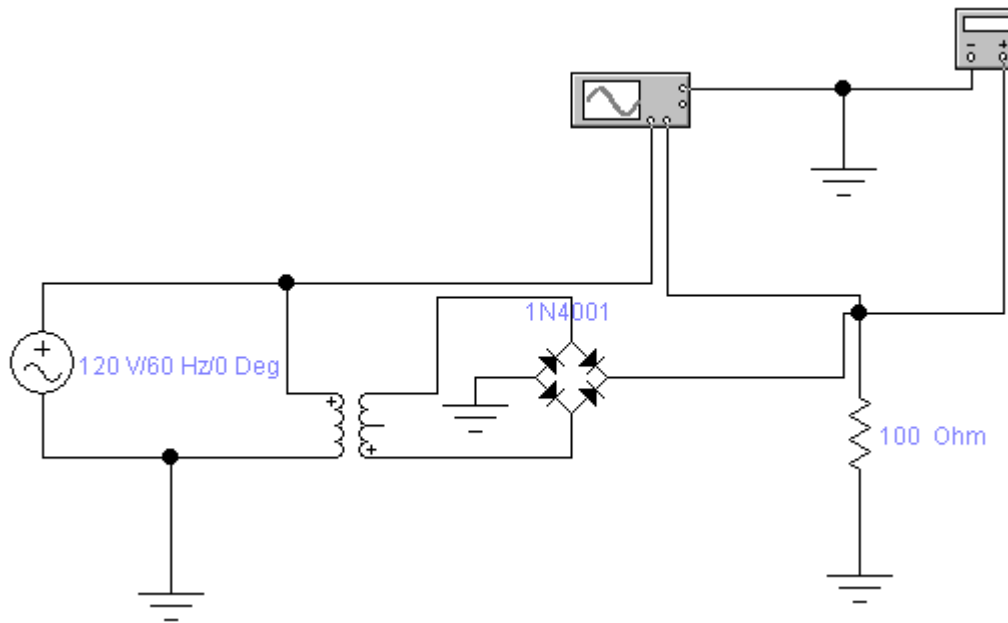


Рисунок 4.53 – Схема мостового випрямляча

Контрольні питання

1. Який пристрій називають випрямлячем? Пояснити принцип роботи випрямляча.
2. Охарактеризувати фільтри у випрямлячах.
3. Нарисувати схему випрямляча з ємнісним фільтром і пояснити його роботу.
4. Як включено діод у схемі однопівперіодного випрямляча?
5. У чому полягає принцип випрямлення в однофазному однопівперіодному випрямлячі? Привести часові діаграми роботи.
6. У чому полягає відмінність двопівперіодного випрямляча від однопівперіодного?
7. Пояснити, як відбувається процес випрямлення в схемі мостового випрямляча. Привести схему і часові діаграми.
8. Привести схему випрямляча з індуктивним фільтром і пояснити його роботу.
9. Для яких цілей застосовують випрямлячі середньої та великої потужності?
10. Яку роль відіграє трансформатор у схемах діодних випрямлячів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8 ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ

Мета роботи – використання операційних підсилювачів

Завдання до виконання лабораторної роботи

Ознайомитися з принципом роботи та з головними параметрами операційного підсилювача.

Загальні положення

Операційний підсилювач (далі ОП) (operational amplifier) є найпоширенішою універсальною інтегральною мікросхемою, на підставі якої можна побудувати найрізноманітніші пристрої електронної техніки.

Операційний підсилювач – це модульний, багатокаскадний підсилювач постійного струму з диференціальним входом, призначений для виконання різних операцій над аналоговими сигналами у процесі роботи в схемі з негативним зворотним зв'язком.

Різницю напруг на входах ОП називають диференціальним вхідним сигналом ОП, половину доданку цих напруг – синфазним вхідним сигналом. Основною функцією ОП є підсилення різниці вхідних синфазних напруг з деяким коефіцієнтом підсилення.

Головними параметрами підсилювача є такі: коефіцієнт підсилення, вхідна напруга зміщення (U_{zm}), різниця вхідних струмів, середній вхідний струм, температурний дрейф вхідного струму, температурний коефіцієнт підсилення, вхідний опір ($R_{вх}$), вхідний опір для синфазного сигналу ($R_{сф}$), коефіцієнт послаблення синфазного сигналу, коефіцієнт впливу нестабільності джерела живлення, вихідний опір ($R_{вих}$), частота одиничного підсилення (f_1), максимальна швидкість наростання вихідної напруги, шумові властивості ОП.

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зібрати класичне зveno для моделювання перехідних процесів у разі розмикання та замикання кола (рис. 4.54). Для цього необхідно розташувати на робочому полі програми джерело постійної напруги, операційні підсилювачі, резистори, конденсатор, осцилограф [12].

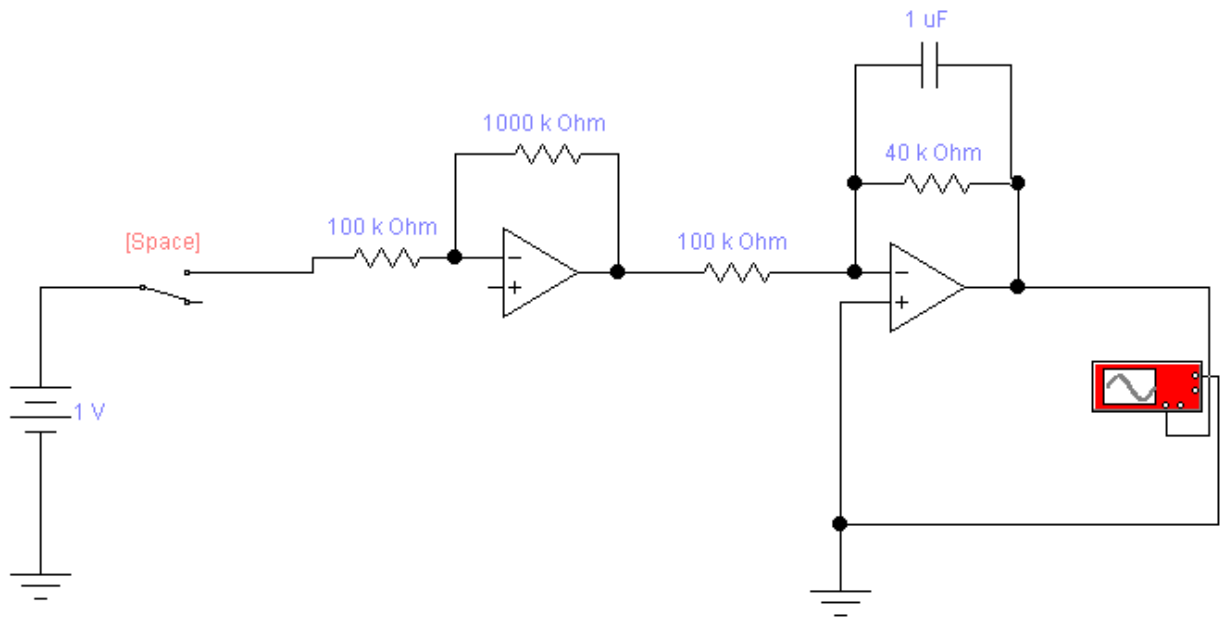


Рисунок 4.54 – Класичне звено для моделювання перехідних процесів

2. Виконати аналіз перехідних процесів за допомогою осцилографа.

2.1. Запустити процес симуляції.

2.2. Зняти показання осцилографа (рис. 4.55) та виміряти активні параметри, наприклад час перехідного процесу.

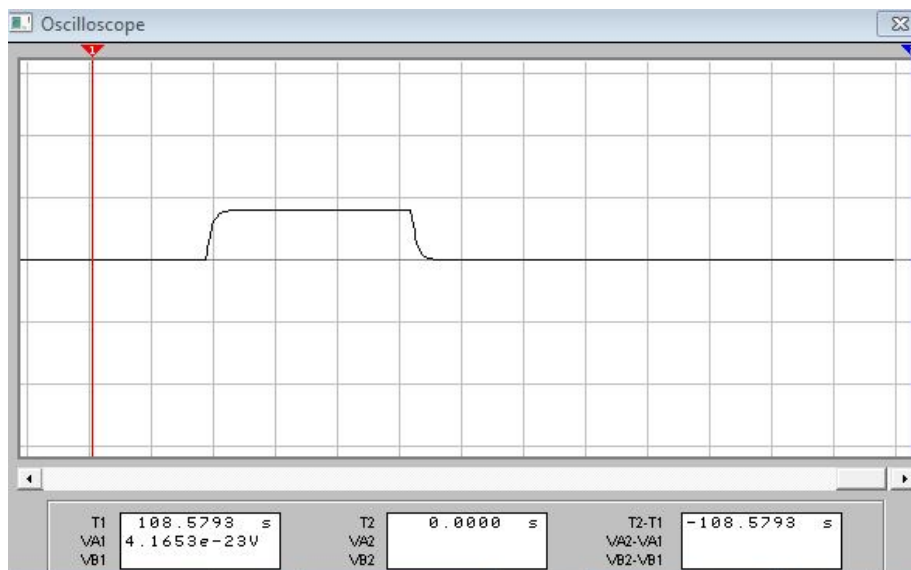


Рисунок 4.55 – Показання осцилографа

3. Зберегти побудовану схему.

4. Зібрати та проаналізувати схему (рис. 4.56). У схемі фільтра входна напруга у всіх випадках дорівнює 100 мкВ [3].

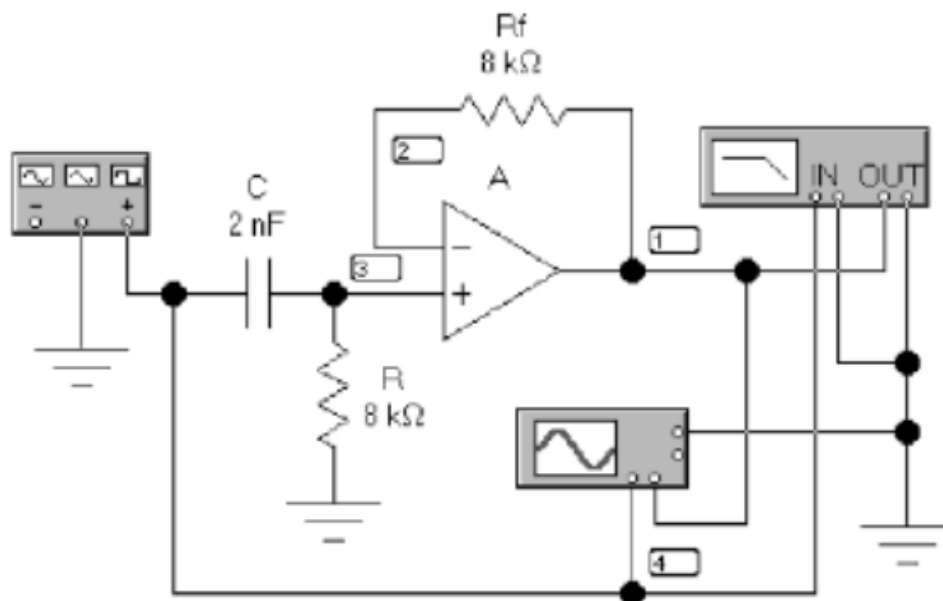


Рисунок 4.56 – Фільтр високих частот на операційному підсилювачі

5. Запустити моделювання. На екрані осцилографа з'явиться зображення сигналу. Змінити його параметри: частоту та амплітуду.

Контрольні питання

1. Охарактеризувати головне призначення операційного підсилювача.
2. Охарактеризувати головні параметри операційного підсилювача.
3. Який параметр називають диференціальним входним сигналом ОП?
4. Який параметр називають синфазним входним сигналом?
5. Охарактеризувати головну функцію ОП.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 9 ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Мета роботи – ознайомлення зі схемою та принципом дії біполярного транзистора

Завдання до виконання лабораторної роботи

1. Дослідити залежності струму колектора від струму бази та напруги база - емітер.
2. Проаналізувати залежності коефіцієнта посилення по постійному струму від струму колектора.
3. Дослідити роботу біполярного транзистора в режимі відсічення.
4. Отримати входні й вихідні характеристики транзистора.
5. Визначити коефіцієнт передачі по змінному струму.
6. Дослідити динамічний входний опір транзистора.

Загальні положення

Біполярний транзистор – напівпровідниковий прилад із двома взаємодієвими випрямляючими p - n -переходами і трьома виводами, підсилюючі властивості якого обумовлені явищами інжекції та екстракції неосновних носіїв заряду. У біполярному транзисторі використовуються одночасно два типи носіїв заряду – електрони та дірки (звідси і назва – біполярний).

Переходи транзистора утворені за допомогою трьох областей із поперемінними типами провідності.

У разі включення біполярного транзистора з загальним емітером (далі ЗЕ) гілка бази є вхідною, а гілка колектора – вихідною. Схема включення транзистора з ЗЕ в активному режимі зображена на рисунку 4.57.

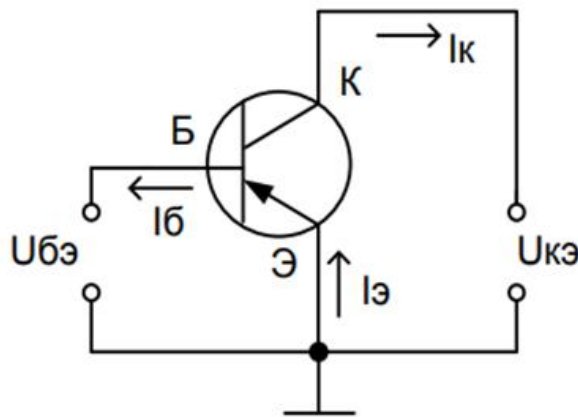


Рисунок 4.57 – Схема включення транзистора з ЗЕ в активному режимі

Фізичні процеси в транзисторі з ЗЕ аналогічні у разі включення транзистора з загальною базою (далі ЗБ). Під дією напруги U_{BE} у гілці емітера проходить струм I_E . У базі цей струм розгалужується. Основна його частина надходить у колектор, створюючи керований складник струму колектора, інша частина – у гілку бази, визначаючи струм бази рекомбінації. Назустріч струму рекомбінації в базі проходить зворотний струм колектора I_{K30} .

Вихідними статичними характеристиками транзистора з ЗЕ є сімейство характеристик $I_K = f(U_{KE})$ при $I_B = const$ [10, 11].

Статичний коефіцієнт передачі струму визначається як відношення струму колектора I_K до струму бази I_B :

$$\beta_{DC} = I_K / I_B.$$

Коефіцієнт передачі струму β_{AC} визначається співвідношенням приросту ΔI_K колекторного струму до базового струму ΔI_B , який визиває його приріст

$$\beta_{AC} = \Delta I_K / \Delta I_B.$$

Диференціальний вхідний опір R_{ex} транзистора в схемі з загальним емітером визначається за умови фіксованого значення напруги колектор - емітер і може бути знайдено як відношення приросту напруги база - емітер до викликаного їм приросту ΔI_B струму бази:

$$R_{ex} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B = (U_{BE2} - U_{BE1}) / (I_{B2} - I_{B1}).$$

Диференціальний вхідний опір R_{ex} транзистора в схемі з ЗЕ через параметри транзистора визначається таким виразом:

$$R_{ex} = R_B + \beta_{AC} R_E,$$

де R_B – розподілений опір базової області напівпровідника;

R_E – диференційний опір переходу база - емітер, який зі свого боку визначається з виразу:

$$R_E = 25 / I_E,$$

де I_E – постійний струм емітера в міліамперах.

Через мале значення R_B цим значенням можна знехтувати, і тоді

$$R_{ex} = \beta_{AC} R_E.$$

Опір R_E для біполярного транзистора можна порівняти з диференціальним вхідним опором транзистора в схемі із загальною базою, який визначається за умови фіксованого значення напруги база - колектор і який можна знайти як відношення приросту ΔU_{BE} до викликаного їм приросту ΔI_E струму емітера

$$R_{ex. зб} = \Delta U_{BE} / \Delta I_E.$$

Через параметри транзистора цей опір визначається виразом:

$$R_{ex. зб} = R_B / \beta_{AC} + R_E,$$

в якому першим доданком через малу величину R_B можна знехтувати і вважати, що диференціальний опір переходу база - емітер виражається рівним:

$$R_{ex. зб} = R_E.$$

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему для дослідження характеристик біполярного транзистора (модель транзистора 2N3904), яка наведена на рисунку 4.58 [13, 14].

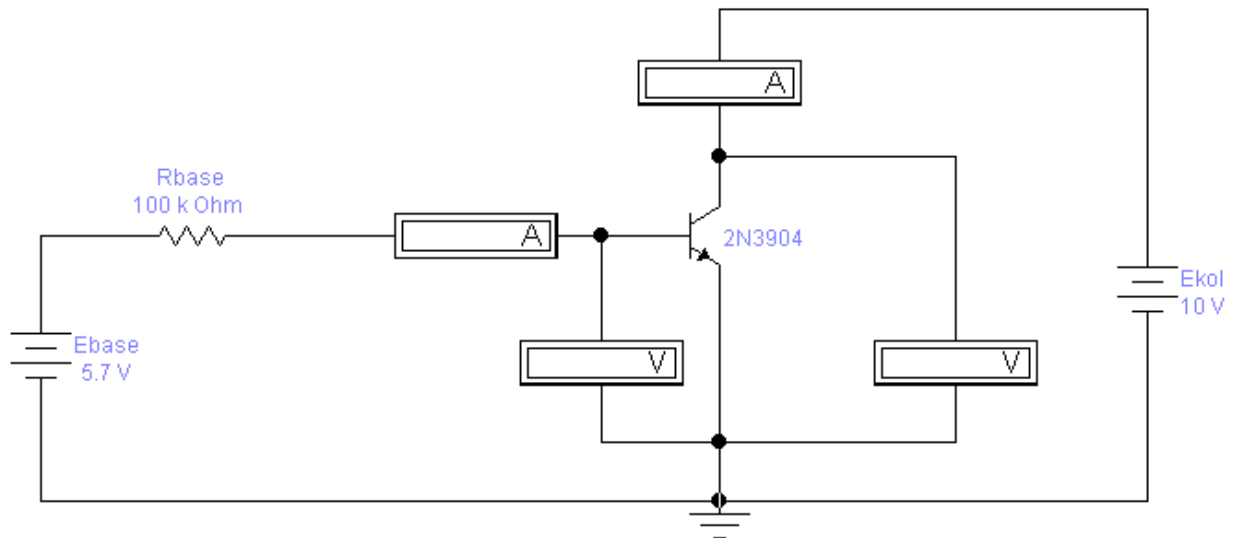


Рисунок 4.58 – Схема для дослідження статичних характеристик транзистора

Визначення статичного коефіцієнта передачі струму транзистора

2. Включити схему. Записати результати вимірювання струму колектора, струму бази та напруги колектор-емітер в таблицю 4.3.

3. Підрахувати за отриманими даними статичний коефіцієнт передачі транзистора β_{DC} та записати його в таблицю 4.3.

4. Змінити номінальне значення джерела ЕРС E_B до величини 2.68 В. Включити схему. Записати результати вимірювання струму колектора, струму бази і напруги колектор - емітер в таблицю 4.3.

5. Підрахувати за отриманими результатами коефіцієнт β_{DC} і записати його значення в таблицю 4.3.

6. Змінити номінальне значення джерела ЕРС E_K до величини 5 В. Запустити схему. Записати результати вимірювання струму колектора, струму бази та напруги колектор - емітер в таблицю 4.3.

7. Підрахувати за отриманими даними статичний коефіцієнт передачі транзистора β_{DC} . Результат записати в таблицю 4.3.

8. Встановити початковий вихідний номінал $E_K=10$ В.

Вимірювання зворотного струму колектора

9. Встановити у схемі (рис. 4.58) номінальне значення джерела ЕРС E_B рівним 0 В.

10. Включити схему. Записати результати вимірювання струму колектора для даних значень струму бази та напруги колектор - емітер в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Таблиця дослідження характеристик біполярного транзистора

Напруга джерела	Струм бази I_B	Струм колектора I_K	Зворотній струм колектора I_{K30}	Напруга колектор - емітер U_{KE}	Статичний коефіцієнт передачі β_{DC}
$E_B = 5,7 \text{ В}$					
$E_B = 2,68 \text{ В}$					
$E_B = 5,7 \text{ В}$ $E_K = 5 \text{ В}$					
$E_B = 2,68 \text{ В}$ $E_K = 5 \text{ В}$					
$E_B = 0 \text{ В}$, $E_K = 10 \text{ В}$					
$E_B = 0 \text{ В}$, $E_K = 5 \text{ В}$					

Отримання вихідної характеристики транзистора в схемі з ЗЕ

11. Провести у схемі (рис. 4.58) вимірювання струму колектора I_K для кожного значення E_K і E_B і заповнити таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Таблиця вихідної характеристики транзистора в схемі з ЗЕ

		Показники					
$E_B, \text{В}$	$I_K, \text{мкА}$	$E_K, \text{В}$					
		0,1	0,5	1	5	10	20
1,66							
2,68							
3,68							
4,68							
5,7							

12. За даними таблиці побудувати графік залежності I_K від E_K .

Контрольні питання

1. Які типи транзисторів Вам відомі?
2. Охарактеризувати біполярний транзистор, навести його схему, пояснити принцип дії.
3. Охарактеризувати схему включення транзистора з ЗЕ в активному режимі
4. Описати фізичні процеси в транзисторі з ЗБ.

5. За якою формулою обчислюється статичний коефіцієнт передачі струму?

6. Яким виразом визначається диференціальний вхідний опір R_{ex} транзистора в схемі з ЗЕ через параметри транзистора?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 10 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТИХ ЛОГІЧНИХ СХЕМ

Мета роботи – моделювання логічних функцій за допомогою логічних елементів, вивчення структури та алгоритмів роботи тригерів та дослідження схеми комбінаційного цифрового пристрою – суматора.

Завдання до виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему логічного елемента **I** [15].
2. Спроекувати схемне рішення логічного елемента **НІ** (рис. 4.59) [16]

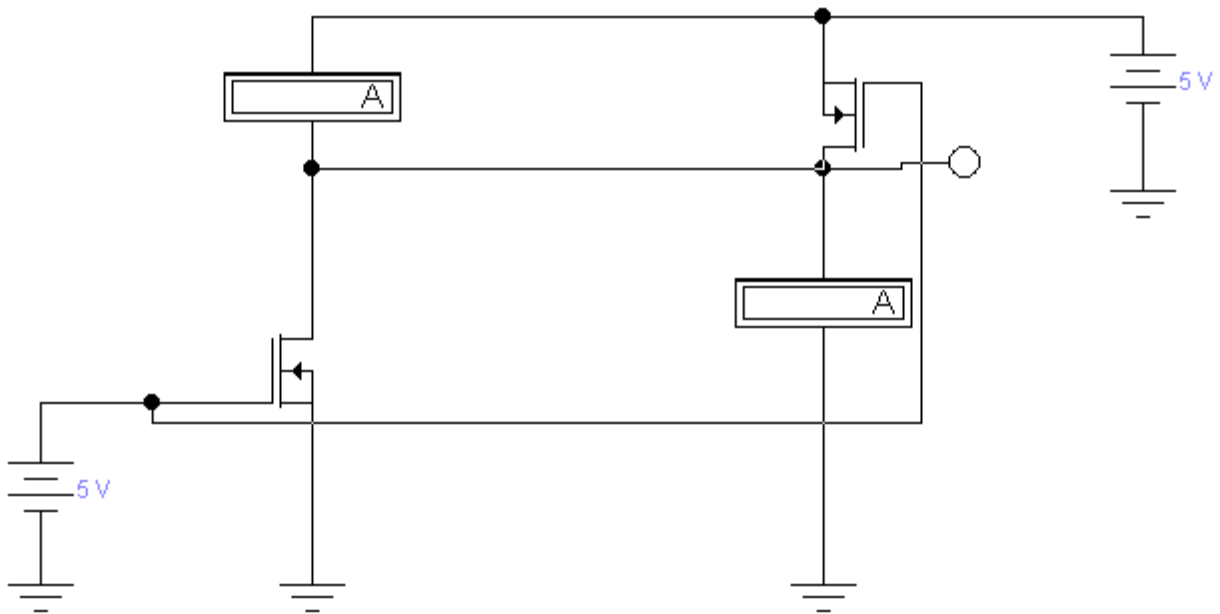


Рисунок 4.59 – Схемне рішення логічного елемента **НІ**

3. Вивчити роботу *RS*-тригера.
4. Змоделювати дворозрядний суматор.

Загальні положення

Для проектування вузлів і пристроїв комп'ютера широко використовуються методи аналізу та синтезу логічних схем, які отримали назву методів логічного проектування, які базуються на використанні алгебри логіки

або булевої алгебри. Головним поняттям алгебри логіки є висловлювання – будь-яке твердження, щодо якого можна буде говорити, що воно істинно або хибно. При цьому вважається, що кожне висловлювання не може бути одночасно і істинно, і хибно.

Кожне висловлювання можна позначити певним символом. Запис $X_j = 1$ означає, що висловлення істинно, а $X_j = 0$ – що висловлення хибно.

В алгебрі логіки висловлювання можуть бути простими і складними. Висловлювання, значення істинності якого не залежить від значень істинності інших висловлювань, називається простим. Під час аналізу та синтезу логічних схем просте висловлювання розглядається як незалежна змінна, що приймає два значення 0 і 1. Висловлення $Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$, значення істинності якого залежить від значення істинності інших висловлювань, що складають його, називається складним і також може приймати два значення 0 і 1.

У процесі технічної реалізації перемикальних функцій змінні X_1, X_2, \dots, X_n ототожнюються з вхідними сигналами, які надходять на фізичну схему, що реалізує перемикальну функцію, а значення $Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$ являє собою вихідний сигнал схеми. Сукупність значень n змінних називається набором. Однією з поширених форм завдання перемикальних функцій є таблиця істинності, де змінні X_1, X_2, \dots, X_n зазвичай розташовуються в порядку зростання двійкових чисел, утворених набором.

Тригер – найпростіша цифрова схема, що належить до пристроїв послідовного типу. На відміну від комбінаційних пристроїв, стан виходу Y яких у будь-який момент часу визначається тільки поточним станом входу X ($Y = F(X)$), стан виходу тригера як послідовної схеми залежить ще і від його внутрішнього стану Q : $Y = F(X, Q)$.

Тригер має два стійких стани: $Q = 1$ і $Q = 0$, тому його іноді називають бістабільною схемою. В якому з цих станів знаходиться тригер, залежить від сигналів на входах тригера та від його попереднього стану.

Тип тригера визначається алгоритмом його роботи. Залежно від алгоритму роботи тригер може мати установчі, інформаційні та керувальні входи.

Установчі входи визначають стан тригера незалежно від стану інших входів. Входи керування дозволяють запис даних, що надходять на інформаційні входи.

Умови переходів тригерів з одного стану в інший (алгоритм роботи) можна описати табличним, аналітичним або графічним способами.

Тригер – це електронний пристрій, який призначається для запису і зберігання інформації і який має два виходи: прямий і інверсний, і деяку кількість входів, залежно від виконуваного завдання. Під дією вхідних сигналів змінюється стан виходів. Напруга на виходах змінюється різко – стрибкоподібно. Для виготовлення тригерів зазвичай використовуються напівпровідникові прилади.

Інформація може записуватися в тригери вільно (безперервно), тобто при подачі сигналів на вхід, стан виходу змінюється в реальному часі. Такі тригери називаються асинхронними.

Синхронні тригери характеризуються тим, що інформація може записуватися тільки коли активний синхронізуючий сигнал, і у разі відсутності позитивного рівня напруги на ньому інформація на виходах змінитися не може.

Найрозповсюдженішими є тригери *RS*, *JK*, *D* і *T*-типів.

RS-тригер (від англ. Set/Reset – встановити/скинути) – асинхронний тригер, який зберігає свій попередній стан при неактивному стані обох входів і змінює свій стан при подачі на один з його входів активного рівня. При подачі на обидва входи активного рівня стан тригера, взагалі кажучи, невизначено, але в конкретних реалізаціях на логічних елементах обидва виходи приймають стан або логічного нуля, або логічної одиниці.

Асинхронний *RS*-тригер можна реалізувати на логічних елементах двома схемами: **2 «АБО-НІ»** та **2 «І-НІ»**.

Схема *RS*-тригера дозволяє запам'ятовувати стан логічної схеми, але так як в початковий момент часу може виникати перехідний процес (в цифрових схемах цей процес називається «небезпечні гонки»), то запам'ятовувати стан логічної схеми в тригерах потрібно тільки в певні моменти часу, коли всі перехідні процеси закінчені. Це означає, що більшість цифрових схем вимагають сигналу синхронізації (тактового сигналу). Всі перехідні процеси в комбінаційній логічній схемі повинні закінчитися за час періоду синхросигналу, що подається на входи тригерів. Тригери, що запам'ятовують вхідні сигнали тільки в момент часу, який визначається сигналом синхронізації, називаються синхронними тригерами.

В *RS*-тригерах для запису логічного нуля і логічної одиниці потрібні різні входи, що не завжди зручно. При запису і зберіганні даних один біт може приймати значення, як нуля, так і одиниці, і для його передачі досить одного дроту. Сигнали установки і скидання тригера не можуть з'являтися одночасно, тому можна об'єднати ці входи за допомогою інвертора. Такий тригер отримав назву *D*-тригер, і назва його походить від англійського слова Delay – затримка. Конкретне значення затримки визначається частотою проходження імпульсів синхронізації. *D*-тригер запам'ятовує стан входу і видає його на вихід. *D*-тригери мають, як мінімум, два входи: інформаційний *D* і синхронізації *C*. Вхід синхронізації *C* може бути статичним (потенційним) і динамічним.

Таблиця істинності *JK*-тригера практично збігається з таблицею істинності *RS*-тригера. Для того щоб виключити заборонений стан, його схема змінена таким чином, що при подачі двох одиниць *JK*-тригер перетворюється в рахунковий тригер. Це означає, що при подачі на тактовий вхід *C* імпульсів цей тригер змінює свій стан на протилежний.

T-тригер (від англ. Toggle – перемикач) – це рахунковий тригер. У даного тригера є тільки один вхід. Принцип роботи *T*-тригера полягає в наступному. Після надходження на вхід *T* імпульсу стан тригера змінюється на прямо

протилежний. Рахунковим він називається тому, що T -тригер як би підраховує кількість імпульсів, що надійшли на його вхід. При отриманні другого імпульсу T -тригер знову скидається в початковий стан.

Комбінаційний пристрій (далі КП) – це пристрій із n входами та m виходами. Якщо КП виконано на базі ідеальних, тобто безінерційних елементів, то стан його виходів водночас визначається станом його входів.

Суматор є найпростішим цифровим пристроєм, призначеним для складання двох чисел, заданих у двійковому коді. Додавання проводиться поразрядно – від молодшого розряду до старшого. У кожному розряді необхідно знайти суму S_i доданків X_i і Y_i і виконати перенесення з попереднього розряду P_{i-1} .

За кількістю входів розрізняють півсуматори, однорозрядні суматори і багаторозрядні суматори.

Півсуматорами називаються пристрої з двома входами і двома виходами, на яких виробляються сигнали суми і перенесення.

Залежно від особливостей введення-виведення кодів і організації переносів багаторозрядні суматори бувають послідовного і паралельного принципу дії. У послідовному суматорі складання кодів здійснюється за розрядами, починаючи з молодшого розряду за допомогою комбінаційного суматора на три входи. Утворене в даному розряді перенесення $P_j + 1$ затримується на час $t_{од}$ і надходить на вхід P_j суматора в момент надходження наступного розряду доданків.

Перевагою послідовного суматора є простота апаратної реалізації, а недоліком – досить великий час підсумовування.

У паралельному суматорі досягається більш висока швидкодія. Коди, що сумуються, надходять на входи суматора одночасно в усіх розрядах. Для цього в кожному розряді використовується комбінаційний суматор на три входи, на виходах якого утворюються значення суми S_j певного розряду і перенесення $P_j + 1$ в старший розряд. У процесі поширення сигналу переносу встановлюється остаточне значення суми в кожному розряді. Очевидно, що протягом цього часу на входах суматора присутні сигнали X_i , Y_i , відповідні кодами, що сумуються. Максимальне за часом підсумовування отримується в тому разі, коли перенесення, що виникло в першому розряді, поширюється по всім розрядам. У паралельному суматорі зазвичай застосовуються різні способи прискорення перенесення (паралельний перенос, груповий тощо)

Порядок виконання лабораторної роботи

1. Зібрати схему логічного елемента **I** [15].

Для цього розташувати на робочому полі логічний елемент **I** зі вкладки **Logic Gates** та обрати кількість входів, рівним чотирьом (рис. 4.60).

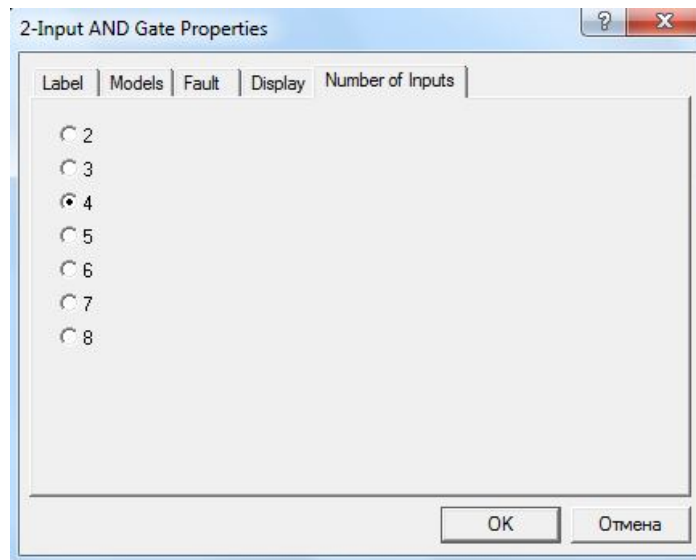


Рисунок 4.60 – Вибір кількості входів логічного елемента **I**

2. Приєднати до входу логічного елемента **I** зі вкладки **Indicators** компонент – красний світлодіод.

3. Розташувати на робочому полі чотири джерела напруги **+Vcc Voltage Source** та чотири перемикачі.

Схема прийме вигляд, як наведено на рисунку 4.61.

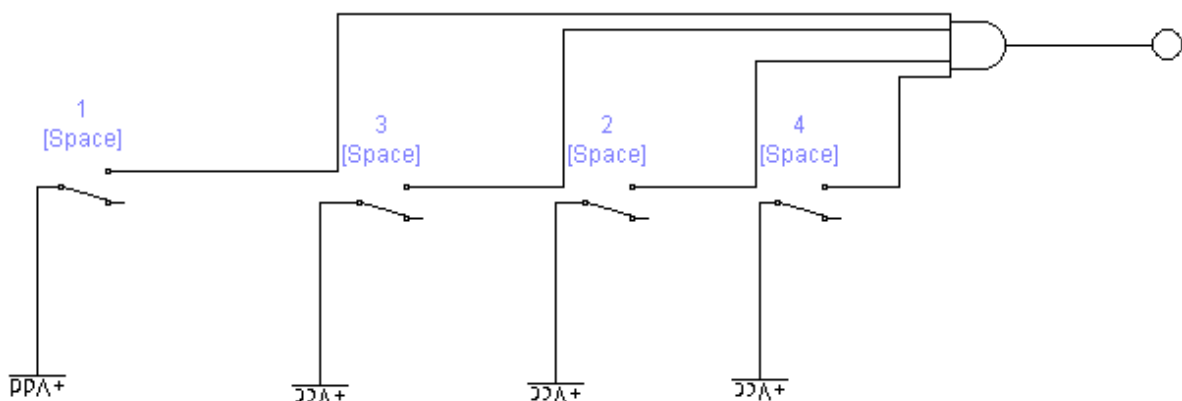


Рисунок 4.61 – Схема логічного елемента **I**

4. Подати різні кодові комбінації на вхід логічної схеми.

На виході логічної схеми **I** з'явиться логічна 1 (горить світлодіод) тільки при подачі логічних 1 на всі чотири входи логічної схеми **I**.

5. Зібрати схему проведення експерименту із вивчення роботи *RS*-тригера (рис. 4.62) [16].

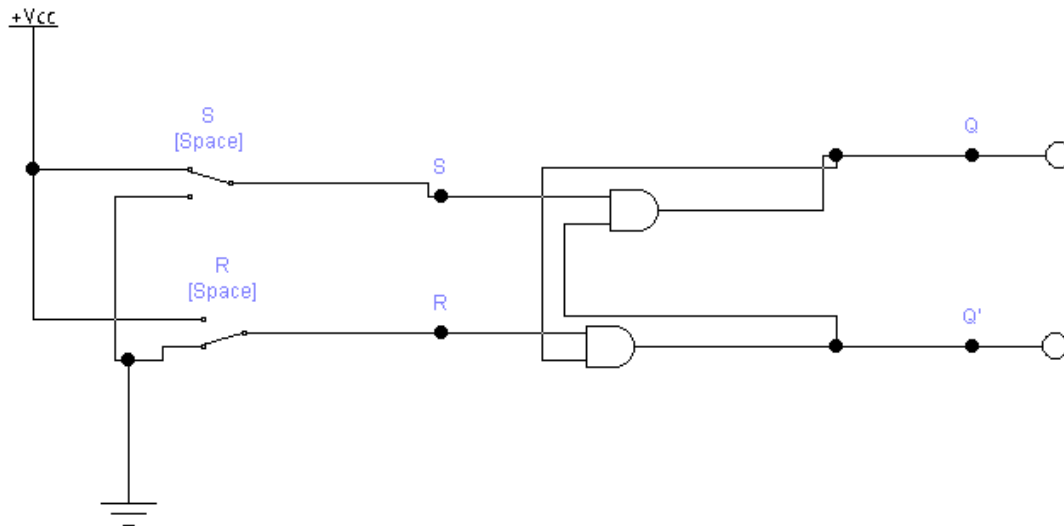


Рисунок 4.62 – Схема роботи *RS*-тригера

6. Увімкнути схему та послідовно подавати на схему такі сигнали:
 $S = 1, R = 0$; $S = 1, R = 1$; $S = 0, R = 1$; $S = 0, R = 0$.

Переконатися, що:

- при $S = 0, R = 1$ тригер встановлюється в стан $Q = 0$;
- при переході к $S = 0, R = 0$ тригер зберігає попередній стан виходу $Q = 0$;
- при $S = 1, R = 0$ тригер встановлюється в стан $Q = 1$;
- при переході к $S = 0, R = 0$ тригер зберігає попередній стан виходу $Q = 1$.

Проаналізувати за результатами експерименту для кожного переходу роботу тригера.

7. Зібрати принципову схему для дослідження роботи асинхронного *RS*-тригера (рис. 4.63) [15, 16].

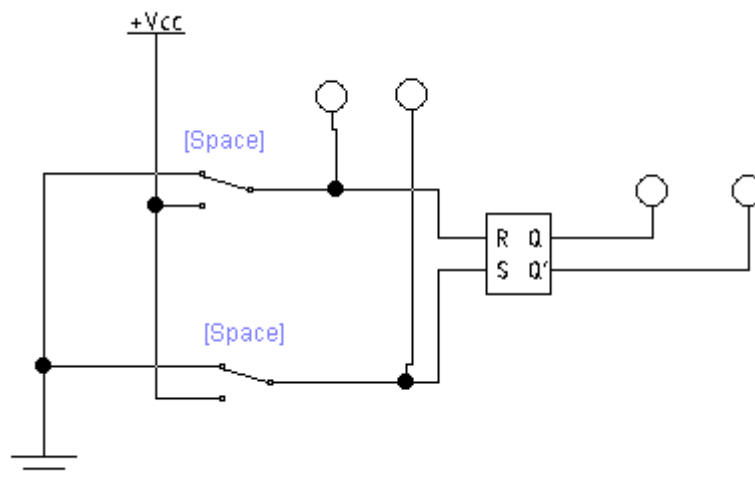


Рисунок 4.63 – Принципова схема для дослідження роботи асинхронного *RS*-тригера

8. Запустити процес моделювання (рис. 4.64). Проаналізувати отримані результати.

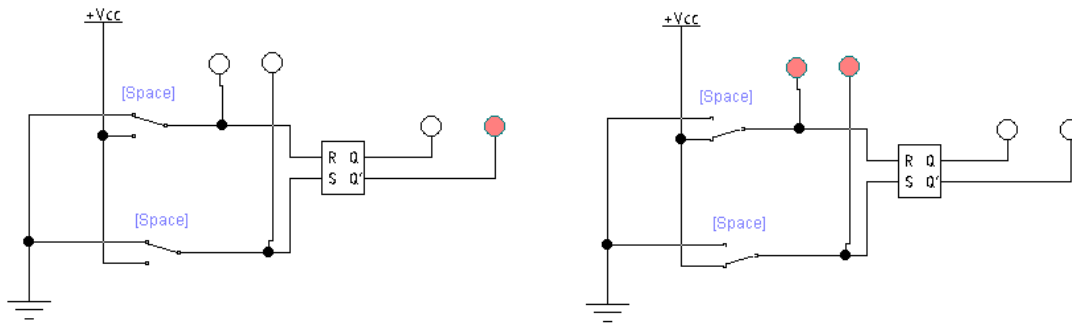


Рисунок 4.64 – Результати моделювання роботи асинхронного *RS*-тригера

9. Зібрати принципову схему для дослідження роботи синхронного *RS*-тригера (рис. 4.65) із логічних елементів **I**, **I-III**.

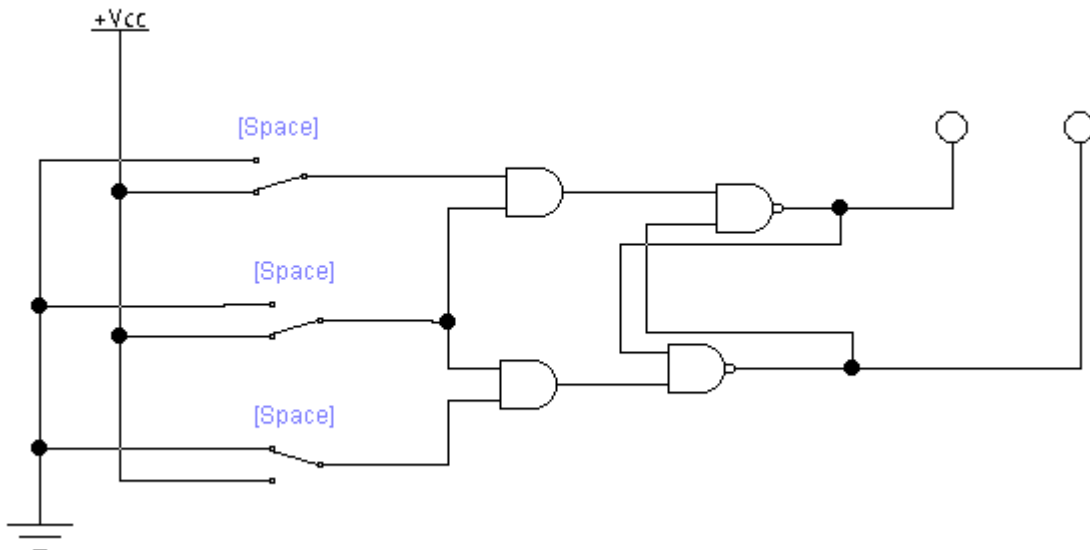


Рисунок 4.65 – Принципова схема для дослідження роботи синхронного *RS*-тригера

10. Запустити процес моделювання, результати якого наведено на рисунку 4.66.

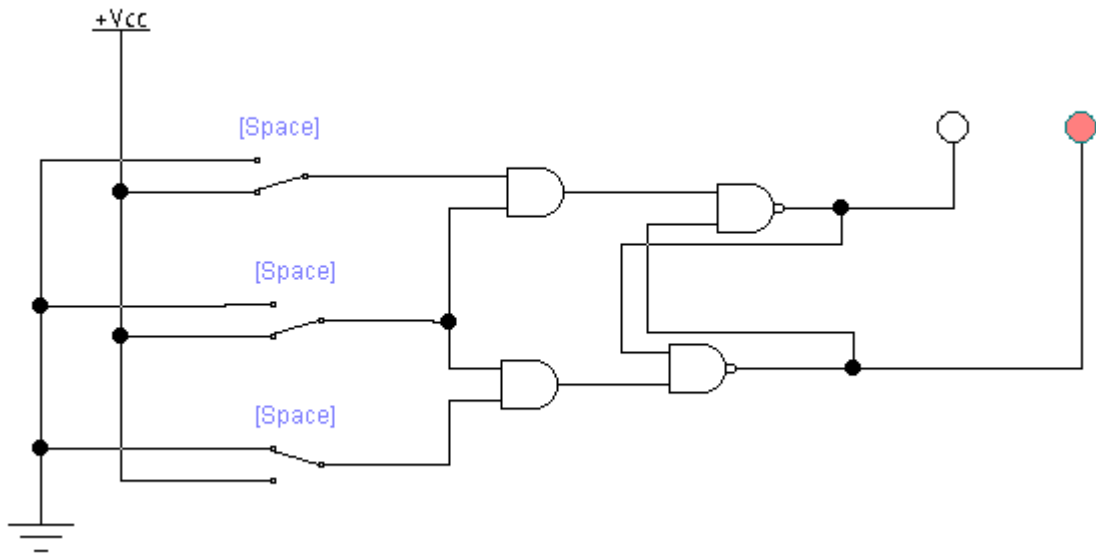


Рисунок 4.66 – Результати моделювання роботи синхронного *RS*-тригера

11. Змоделювати дворозрядний суматор (рис. 4.67). Для цього необхідно розташувати на робочому полі компонент **Full Adder** зі вкладки **Digital**, компонент **Decoded Seven-Segment Display** зі вкладки **Indicator**, чотири перемикача, джерело живлення та заземлення.

12. Подавати поперемінно всі можливі комбінації вхідних сигналів за допомогою відповідних ключів. Прослідкувати роботу суматора по стану логічних пробників на його виходах та відслідковувати зміни показань **Decoded Seven-Segment Display** (сегментного індикатора з двійково-десятичним дешифратором на вході), який підключено до його виходів (рис. 4.67).

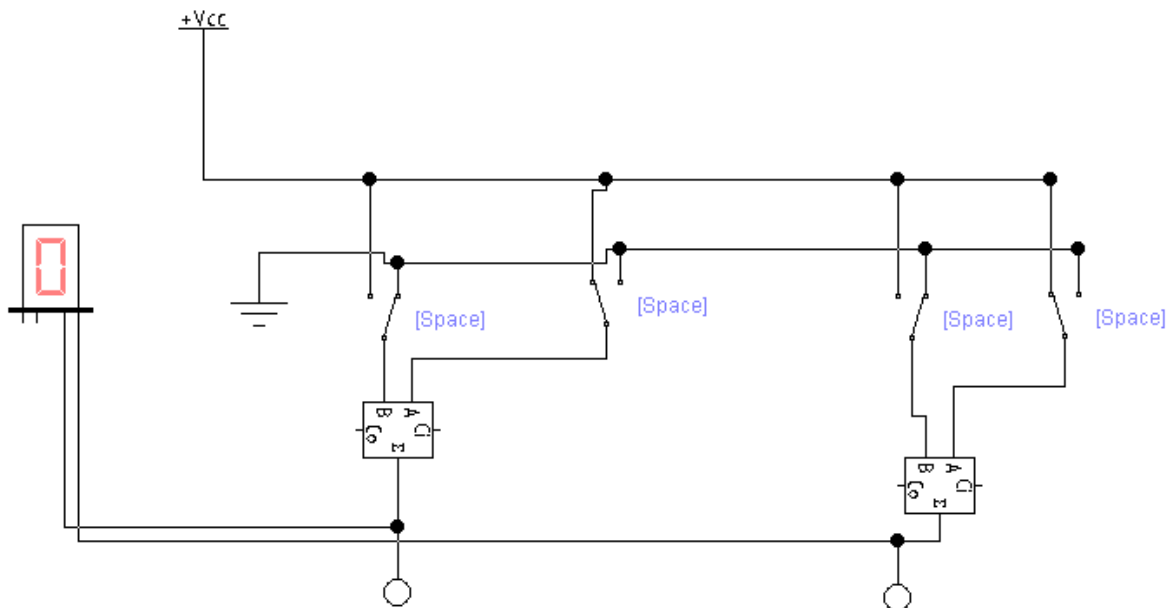


Рисунок 4.67 – Дворозрядний суматор

Результати роботи дворозрядного суматора наведені на рисунку 4.68.

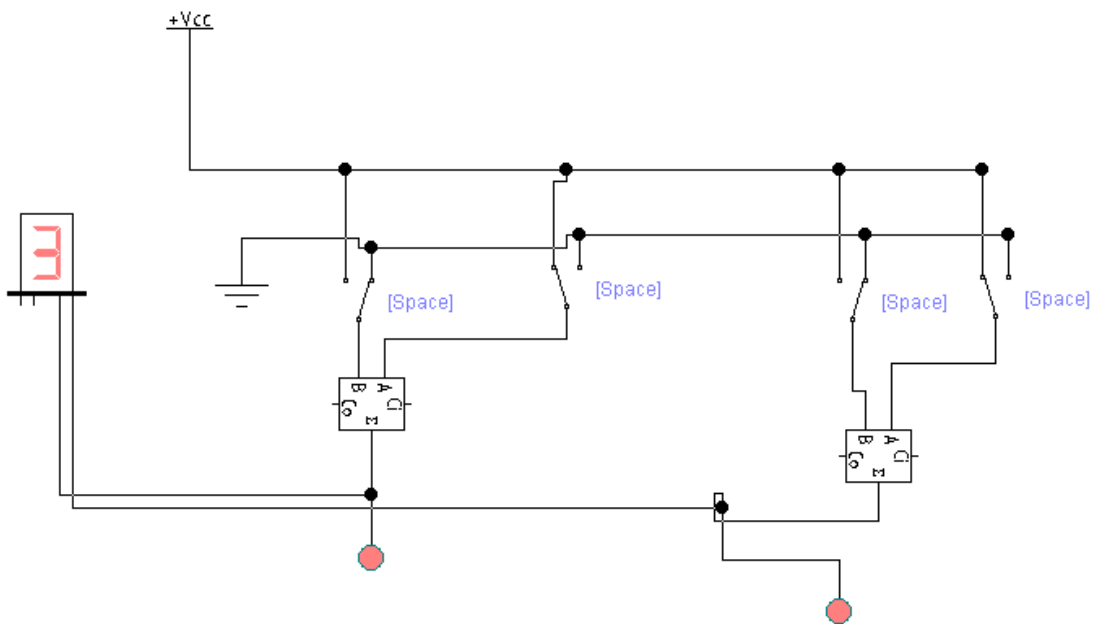


Рисунок 4.68 – Результати роботи дворозрядного суматора

Контрольні питання

1. Які логічні елементи є в бібліотеці EWB?
2. На чому базуються методи логічного проектування?
3. Що є головним поняттям алгебри логіки?
4. За допомогою яких елементів можна змодельовати подачу логічної 1 та логічного 0?
5. Описати призначення тригера.
6. Чи є тригер перетворювачем, чи зберігачем попередньої та джерелом поточної інформації (стану)?
7. Скільки стійких станів має тригер?
8. Яким чинником визначається тип тригера?
9. Які типи тригерів є найрозповсюдженішими?
10. Описати принцип роботи суматора.
11. Як побудувати схему повного однорозрядного суматора на базі схем полусуматорів?
12. Як виконується додавання та вчитання багаторозрядних чисел у суматорі?
13. Які типи багаторозрядних суматорів Вам відомі? Перелічити переваги та недоліки таких суматорів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фірма National Instruments Electronics Workbench Group розробник програми Electronics WorkBench [Електронний ресурс] // Офіц. сайт фірми. – Режим доступу : www.interactiv.com.
2. Короновский А. А. Применение EWB для моделирования электронных схем : учебно-методическое пособие / А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – Саратов, 2004. – 24 с.
3. Карлащук В. И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics WorkBench и ее применение. / В. И. Карлащук. [изд. 3-е, доп. и перераб.]. – М. : Солон-Пресс, 2009. – 736 с.
4. Потехин В. А. Цифровые устройства и микропроцессоры : электронный лабораторный практикум / В. А. Потехин. – Томск : кафедра ТУ, ТУСУР, 2012. – 97 с.
5. Чернышов Н. Г. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench / Н. Г. Чернышов, Т. И. Чернышова; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» : Изд-во ТГТУ, 2005. – 52 с.
6. Дэвид М. Хэррис. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / Хэррис Дэвид М., Хэррис Сара Л. [изд. 2-е]. – Изд-во Morgan Kaufman, 2013. – 478 с.
7. Семенов Б. Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов / Б. Ю. Семенов. – М. : Солон-Р, 2001. – 352 с.
8. Горячкин В. В. Физика ЭВМ. Полупроводниковые приборы : учебно-метод. пособие для студентов математ. специальностей : в 2 ч. / В. В. Горячкин, Л. А. Золоторевич, Т. В. Соболева. – Минск : БГУ, 2008. – Ч. 1 : Полупроводниковый диод. – 52 с.
9. Бурькова Е. В. Электроника : методические указания к лабораторному практикуму на Electronics Workbench / Е. В. Бурькова. – Оренбург, ГОУ ОГУ, 2008. – 70 с.
10. Барышев Ю. А. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Электропитание устройств автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте» / Ю. А. Барышев, А. К. Табунщиков, Н. Н. Титова. – М. : МИИТ, 2002. – 32 с.
11. . Токхейм Р. Основы цифровой электроники. / Р. Токхейм. – М. : Мир, 2009. – 289 с.
12. Гордон Мак-Комб. Радиоэлектроника для чайников. / Мак-Комб Гордон. – М. : Диалектика, 2010. – 372 с.
13. Галас В. П. Моделирование и анализ электрических схем в среде Electronics Workbench : Практикум для студентов специальности 210100 / В. П. Галас. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2003. – 52 с.
14. Достал И. Операционные усилители / И. Достал – М. : Диалектика, 2009. – 359 с.

15. Япарова Ю. А. Лабораторный практикум по дисциплине «Архитектура аппаратных средств». (для студентов специальности 230111 «Компьютерные сети»). / Ю. А. Япарова. – Калининград : АНО «Калининградский бизнес-колледж», 2015. – 76 с.

16. Потехин В. А. Цифровые устройства и микропроцессоры : электронный лабораторный практикум. / В. А. Потехин. – Томск : ТУСУР, кафедра ТУ, 2012. – 97 с.

17. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств . / Г. И. Волович. – М. : Мир , 2005. – 296 с.

18. Кауфман М. Практическое руководство по расчетам схем в электронике. / М. Кауфман, А. Г. Сидман. – М. : Энергомаш , 1999. – 347 с.

19. Ленк Дж. 500 практических схем на популярных ИС. / Дж. Ленк. – М. : Мир , 2011. – 312 с.

21. Уильямс А. Применение интегральных схем. / А. Уильямс. – М. : Солон , 2011. – 368 с.

Навчальне видання

ПЕТРОВА Олена Олександрівна

**МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ
ELECTRONIC WORKBENCH**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Відповідальний за випуск *М. В. Новожилова*

Редактор *В. І. Шалда*

Комп'ютерне верстання *О. О. Петрова*

Дизайн обкладинки *Г. А. Коровкіна*

Підп. до друку 26.02.2018. Формат 60 x 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 4,0

Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О.М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронний адрес: rectorat@kname.edu.ua.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.