

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Ю.В. Шабатура, В.В. Присяжнюк

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як
навчальний посібник для студентів вищих навчальних
закладів

УНІВЕРСУМ–Вінниця 2005

УДК 621.38
Ш 12

Рецензенти:

Л.А. Назаренко, доктор технічних наук, професор (ННЦ “ІМ”)

В.С. Осадчук, доктор технічних наук, професор (ВНТУ)

О.В. Соломенцев, доктор технічних наук, професор (НАУ)

Рекомендовано до видання Міністерством освіти і науки України.
Лист № 14/18.2-447 від 25.02.2005

Ю.В. Шабатура, В.В. Присяжнюк

Ш 12 Комп’ютерне моделювання електронних систем. Навчальний посібник. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. - 142 с.

ISBN

В посібнику розглянуті сучасні програмні системи для моделювання та дослідження електронних схем, наведені приклади моделювання базових електронних схем, розроблено лабораторний практикум на основі застосування Electronics Workbench.

Посібник є тематичним продовженням попереднього видання „Використання комп’ютерів у дослідженні електронних систем”, в якому враховані всі пропозиції і зауваження. Він розроблений у відповідності з планом кафедри і може бути рекомендованим для студентів, що вивчають електроніку та мікросхемотехніку і споріднені з нею дисципліни

УДК 621.38

ISBN

© Ю.В. Шабатура, В.В. Присяжнюк, 2005

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ELECTRONICS WORKBENCH	9
2 ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ELECTRONICS WORKBENCH	12
2.1 Зовнішній інтерфейс користувача Electronics Workbench	12
2.2 Меню File.....	13
2.3 Меню Edit.....	14
2.4 Меню Circuit.....	16
2.5 Меню Analysis.....	19
2.6 Меню Window.....	21
2.7 Меню Help.....	22
2.8 Порядок проведення роботи з підготовки, вводу та моделювання принципової електричної схеми.....	22
3 МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ В СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ELECTRONICS WORKBENCH	23
3.1 Підготовка до роботи з Electronics Workbench.....	23
3.2 Моделювання інтегровального RC-кола.....	23
3.3 Моделювання диференціюючого RC-кола.....	29
3.4 Моделювання автогенератора на біполярному транзисторі.....	31
4 ПРАКТИКУМ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ	33
4.1 Інструментарій Electronics Workbench для створення та дослідження електронних схем.....	35
4.2 Моделювання і дослідження напівпровідникових діодів.....	39

4.3 Моделювання і дослідження тиристорів.....	48
4.4 Моделювання і дослідження біполярних транзисторів.....	53
4.5 Моделювання і дослідження польових транзисторів	61
4.6 Моделювання і дослідження підсилювальних каскадів	70
4.7 Моделювання і дослідження підсилювачів зі зворотним зв'язком.....	81
4.8 Моделювання і дослідження операційних підсилювачів	86
4.9 Моделювання і дослідження автоколивальних та ждучих мультивібраторів на біполярних транзисторах	95
4.10 Моделювання і дослідження автоколивальних та ждучих мультивібраторів на операційних підсилювачах	106
4.11 Моделювання і дослідження блокінг-генераторів.....	112
4.12 Моделювання і дослідження інтегральних таймерів.....	128
ВИСНОВКИ.....	141
Література.....	142

ВСТУП

Електроніка як галузь науки і техніки не має собі аналогів за темпами розвитку і досягнутими результатами. Вона має порівняно коротку, проте надзвичайно багату яскравими подіями історію розвитку. Початковий період її розвитку пов'язаний з створенням найпростіших радіопередавачів та приймачів ключової дії. Він відбувся на початку минулого століття і, власне, відділив електроніку як самостійну галузь від експериментальної фізики. Після закінчення цього періоду настала епоха електровакуумних приладів. Застосування вакуумних радіоламп дозволило втілити в життя абсолютно фантастичні на той час ідеї. Завдяки їм з'явилися радіо і телебачення, люди отримали можливість спілкуватися на відстані у багато тисяч кілометрів. Деякі результати, отримані в електровакуумних приладах, залишаються неперевершеними і по сьогоднішній день, а тому продовжують активно використовуватися і в наш час. Проте, в цілому, епоха електровакуумних приладів вже відійшла у минуле. На зміну їй прийшла електроніка твердого тіла. Поява напівпровідникових приладів зробила можливим якісний стрибок електроніки в плані створення надійних, економічних і порівняно недорогих електронних систем. В цей період була започаткована електроніка інтегральних схем. Її поява зумовила розвиток широко доступної цифрової обчислювальної техніки. Сьогоднішні горизонти електроніки визначаються нанометровими технологіями надвеликих інтегральних схем і обмежуються, по суті, лише можливостями людської уяви і браком ідей в створенні нових електронних систем.

Доцільно зауважити, що в історії розвитку електроніки спостерігається загальна тенденція зменшення вартості електронних систем при збільшенні обсягів їх виробництва.

Сьогодні практично неможливо знайти жодної галузі економіки чи побуту, у якій не використовуються засоби електроніки. Застосування електронних систем завжди приводить до позитивних результатів, підвищує продуктивність і полегшує працю людей, залишає більше часу для їх виключно творчої роботи. Саме тому сьогоднішній фахівець, випускник вищого навчального закладу повинен мати ґрунтовні знання з основ теорії побудови, функціонування і практики використання електронних систем і засобів. Причому, це вже не просто вимога навчального плану, це вже вимога самого життя. Отже, в першу чергу цей навчальний посібник буде корисний для тих студентів, яких зацікавили успіхи електроніки, у яких є бажання освоїти сучасні методи дослідження та конструювання електронних систем.

Як правило, різноманітні електронні системи сьогодні, в цілому, подані надзвичайно складними комплексами, які складаються з кількох сотень, а іноді тисяч і навіть мільйонів елементів, однак всі вони базуються

на використанні елементарних пасивних і активних компонентів та базових електронних схем на їх основі.

Отже, вивчення електроніки студентами в вищому навчальному закладі слід розпочинати з ознайомлення з елементною базою сучасних електронних систем. Знання принципів функціонування особливостей конструкції і типових схем ввімкнення базових компонентів повинні стати тим фундаментом, який дозволить майбутньому інженерові не тільки розумно використовувати всі функціональні можливості тих електронних засобів, які він вивчав у вузі, але й швидко зрозуміти принципи побудови і можливості нових електронних засобів і, при потребі, самостійно спроектувати електронну систему з потрібними функціональними можливостями.

Для досягнення вказаної мети вивчення студентами курсу електроніки передбачає інтеграцію чотирьох складових частин:

- засвоєння теоретичного матеріалу лекційного курсу з врахуванням розділів і питань, рекомендованих для самостійної роботи студентів;
- виконання робіт лабораторного практикуму має на меті отримання студентами практичних навичок в складанні, дослідженні і налагоджуванні електронних систем;
- практичні заняття передбачають виконання студентами практичних завдань розрахункового характеру, які допомагають студентам краще засвоїти методики розрахунків електронних схем;
- виконання курсової роботи допомагає остаточно закріпити отримані студентами теоретичні і практичні знання з даної дисципліни.

Означена вище схема викладання предмета, в принципі, є класичною і з давніх пір застосовується у викладанні більшості вузівських дисциплін. Разом з тим, успіхи розвитку тієї ж таки електроніки дозволяють зробити певні корективи розглянутої схеми.

Насамперед, це стосується найбільш складної і, до того ж, найбільш вартісної частини у викладанні предмета – лабораторного практикуму.

В класичному розумінні лабораторний практикум з електроніки передбачає наявність спеціалізованої лабораторної бази, оснащеної найсучаснішими контрольно-вимірювальними приладами, які повинні періодично повірятися і оновлюватися, відповідних стендів і новітніх електронних компонентів. Причому остання вимога особливо важлива, оскільки справжній фахівець повинен орієнтуватися на останні досягнення у цій галузі.

На жаль, в силу економічних причин сформовані вище вимоги залишаються недосяжними мріями викладачів багатьох університетів. Проте сама ж електроніка пропонує певне рішення цієї проблеми. Його суть полягає в тому, що лабораторні дослідження електронних компонентів і схем на їх основі можна здійснювати за допомогою математичного моделювання на персональних комп'ютерах.

Таким чином, здійснюється перехід від “реальної” (на жаль

недосяжної електроніки) до цілком доступної - “віртуальної”.

Сьогодні існує чимало програм, які дозволяють моделювати, аналізувати і налагоджувати електронні схеми. Нижче коротко розглянемо призначення і можливості деяких з таких програм.

Micro-Cap V – розробка фірми Spectrum Software. Має бібліотеку моделей 10 000 електронних елементів провідних фірм Японії, Європи і США. Програма дозволяє:

- створювати принципову електричну схему і редагувати її;
- виконувати розрахунок статичного режиму за постійним струмом;
- розраховувати частотні характеристики і перехідні процеси;
- виконувати оцінку рівня внутрішнього шуму і граничної чутливості;
- виконувати багатоваріантний аналіз, включно з статистичним аналізом за методом Монте-Карло;
- нарощувати бібліотеку компонентів і т.д.

DesignLab 8.0 – інтегрований пакет корпорації MicroSim. До складу цього пакета входить відома програма моделювання електронних схем Pspise. Цей пакет дозволяє виконувати технологічно завершене проектування електронних пристроїв - від введення принципової схеми і її моделювання до створення керуючих файлів для програматорів, розробки печатних плат і керуючих програм для станків з виготовлення і монтажу печатних плат.

Aplac 7.0 – програмна система з типовим набором функцій вищерозглянутих програм. Особливостями цієї системи є те, що вона дозволяє моделювати пристрої НВЧ-діапазону, зокрема, вона має підпрограму розрахунку тривимірних електромагнітних полів НВЧ-пристроїв і може вводити і виводити дані за допомогою інтерфейсних плат стандарту IEEE-488.

System View 1.9 - програмна розробка фірми Elanix. Ця програма має типовий набір функцій для схемотехнічного моделювання і багатий математичний апарат для обробки отриманих результатів. Особливістю програми є те, що вона дозволяє моделювати електронні пристрої на рівні функціональних схем.

Electronics Workbench (EWB) – розробка фірми Interactive Image Technologies. EWB дозволяє моделювати аналогові, цифрові і цифроаналогові схеми великого ступеня складності. Особливістю цього програмного комплексу є те, що він підтримує віртуальний вимірювальний комплекс, до складу якого входять всі основні контрольно-вимірювальні прилади, які своїм зображенням і характеристиками повністю копіюють промислові аналоги. Програма має зручний для користувача інтерфейс легко засвоюється і формує справжню електронну лабораторію на екрані звичайного персонального комп’ютера. Для освоєння Electronics Workbench потрібно лише одне, два вступні заняття. Процедура роботи з пакетом зводиться до таких дій:

- формується електрична схема аналізованого пристрою за допомогою вбудованого редактора, для цього потрібні компоненти, які “перетягуються” з панелі компонентів у робочу область і з'єднуються один з одним за допомогою провідників, встановлюються значення параметрів компонентів;

- до схеми підключаються необхідні тестові інструменти: функціональний генератор, вольтметр, амперметр, осцилограф, логічний аналізатор, пробник та ін.;

- робота схеми активується натисканням на віртуальний “вимикач живлення”;

- результати аналізу, наприклад, осцилограми періодичного процесу, амплітудно-частотна характеристика пристрою можуть бути збережені для наступного документування (оформлення лабораторної роботи).

На сьогоднішній день Electronics Workbench не має собі аналогів за простотою інтерфейсу і числом виконуваних функцій.

Враховуючи такі властивості Electronics Workbench можна рекомендувати як основний інструментарій “віртуальної” електроніки, придатний для використання в навчальному процесі студентів технічних вузів.

1 ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ELECTRONICS WORKBENCH

Electronics Workbench сьогодні є достатньо розповсюдженим засобом комп'ютерного моделювання електронних схем. В своєму класі програмних продуктів він очолює список найбільш поширених у світі програмних комплексів. Electronics Workbench призначений для схематичного представлення і моделювання аналогових, цифрових і аналого-цифрових кіл [5]. Він має ряд переваг, у порівнянні з аналогічними програмними продуктами і широкий вибір можливостей.

Для виконання моделювання електронна схема зображається на екрані комп'ютера в класичному вигляді. З меню вибирають бібліотеку компонентів, склад якої відображається на робочому полі екрана. За допомогою курсора символи компонентів переносять на схему і виконують електричні з'єднання. На відміну від DesignLab і Micro-Cap досить вказати початковий і кінцевий виводи з'єднання, як воно буде прокладено автоматично [6].

Програма повністю підтримує текстовий формат програми моделювання SPICE, причому при завантаженні текстового файлу у форматі SPICE на екрані буде відображатися принципова схема з підключеними вимірювальними приладами (топология складних схем синтезується не зовсім вдало, але моделюються такі схеми без помилок).

Передбачено виведення списку з'єднань у форматі програми OrCAD PCB (у файлах з розширенням імені .NET) для розробки друкованих плат.

Підтримується стандартний набір компонентів: резистори, конденсатори, індуктивності, керовані лінійні і нелінійні джерела, лінії затримки без втрат і з втратами, діоди, тиристори, різні транзистори, операційні підсилювачі, цифрові інтегральні схеми та ін., а також світлодіоди, цифрові індикатори, резистивні матриці, плавкі запобіжники, лампи розжарювання і ключі. Є можливість створювати власні макромоделі.

Передбачено можливість зміни параметрів компонентів простим натисканням клавіш. Так, у схемі де є потенціометр, його опір можна зменшити натисканням клавіші R, або збільшити натисканням Shift+R. Є кнопкові перемикачі, якими можна керувати з клавіатури. При цьому параметри компонентів можна змінювати, не перериваючи процесу моделювання, як у реальному експерименті.

В системі є досить потужний віртуальний комплекс вимірювальних приладів: мультиметри (для вимірювання постійної і змінної напруги та струму, опору, результати цих вимірювань виводяться у відносних одиницях і децибелах); двопроменеві осцилографи (регулюється підсилення каналів, частота розгортки, зсув зображення по координатах X,

У, є відкритий і закритий входи, передбачено введення сигналів синхронізації); вимірювачі частотних характеристик (Bode Plotter); генератор цифрових сигналів (Word Generator); цифровий логічний аналізатор і логічний перетворювач.

Піктограми контрольно-вимірювальних приладів та деяких елементів принципових схем подані на рисунку 1.1.

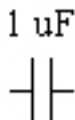



Котушка	Конденсатор	Резистор	Заземлення
			
Джерело синусоїдальної напруги	Джерело постійної напруги	Амперметр	Вольтметр
			
Мультиметр	Осцилограф	Генератор сигналів	Аналізатор АЧХ
			

Рисунок 1.1- Піктограми електронних елементів та контрольно-вимірювальних приладів EWB

Подвійне натискання лівої кнопки миші робить відмічену курсором піктограму вибраного приладу активною і викликає на екран повне зображення лицьової панелі приладу.

На рисунку 1.2 подано зображення лицьової панелі осцилографа з програми EWB.

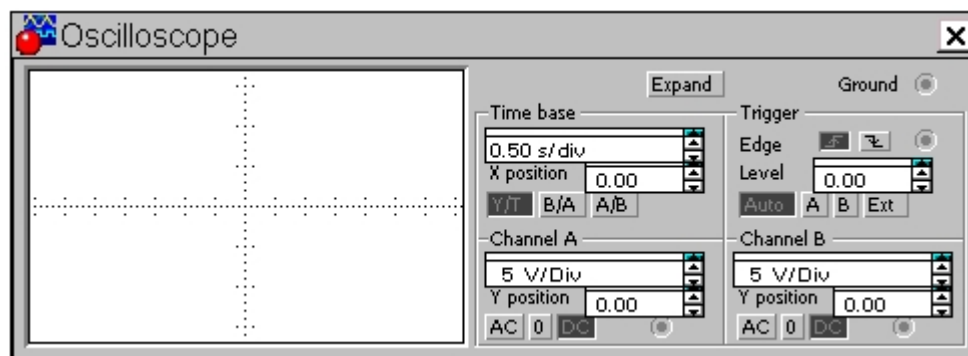


Рисунок 1.2 – Зображення лицьової панелі осцилографа

Для поліпшення сприйняття електронної схеми, фрагменти даної схеми можна забарвлювати в різні кольори. При цьому часові діаграми на екрані двопроменевого осцилографа і багатоканального логічного аналізатора забарвлюються в ті самі кольори.

На периферійні пристрої можна вивести принципову схему, її текстовий опис, перелік компонентів, параметри математичних моделей компонентів, описи макромоделей, параметри завдання для моделювання та перелік вимірювальних інструментів. Для вимірювальних інструментів відтворюється лицьова панель із зображенням характеристик і положенням органів керування, а для осцилографа зображаються також епюри напруги.

Символи кирилиці в текстових коментарях до схем, на жаль, не допускаються.

Існують версії Electronics Workbench для DOS, Windows і Macintosh. При установці в середовищі Windows можна вибрати 16- і 32-розрядну версію.

На рисунку 1.3 подано приклад дослідження електронної схеми за допомогою Electronics Workbench.

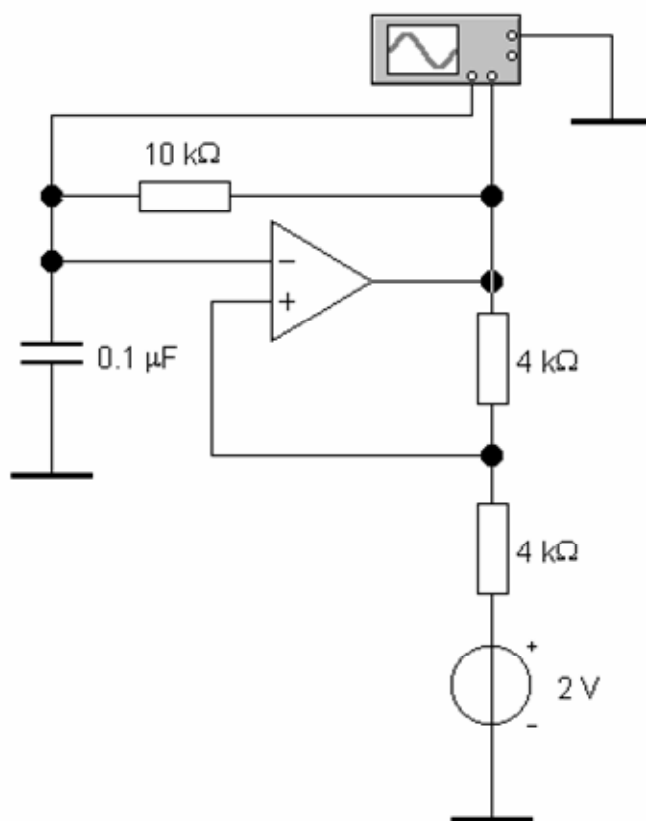


Рисунок 1.3 - Приклад дослідження електронної схеми за допомогою Electronics Workbench.

2 ІНТЕРФЕЙС ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ELECTRONICS WORKBENCH

2.1 ЗОВНІШНІЙ ІНТЕРФЕЙС КОРИСТУВАЧА ELECTRONICS WORKBENCH

Програмний комплекс Electronics Workbench є засобом програмної розробки та імітації електронних схем.

Інтерфейс користувача складається з меню, панелі інструментів і робочої області. Його загальний вигляд подано на рисунку 2.1.

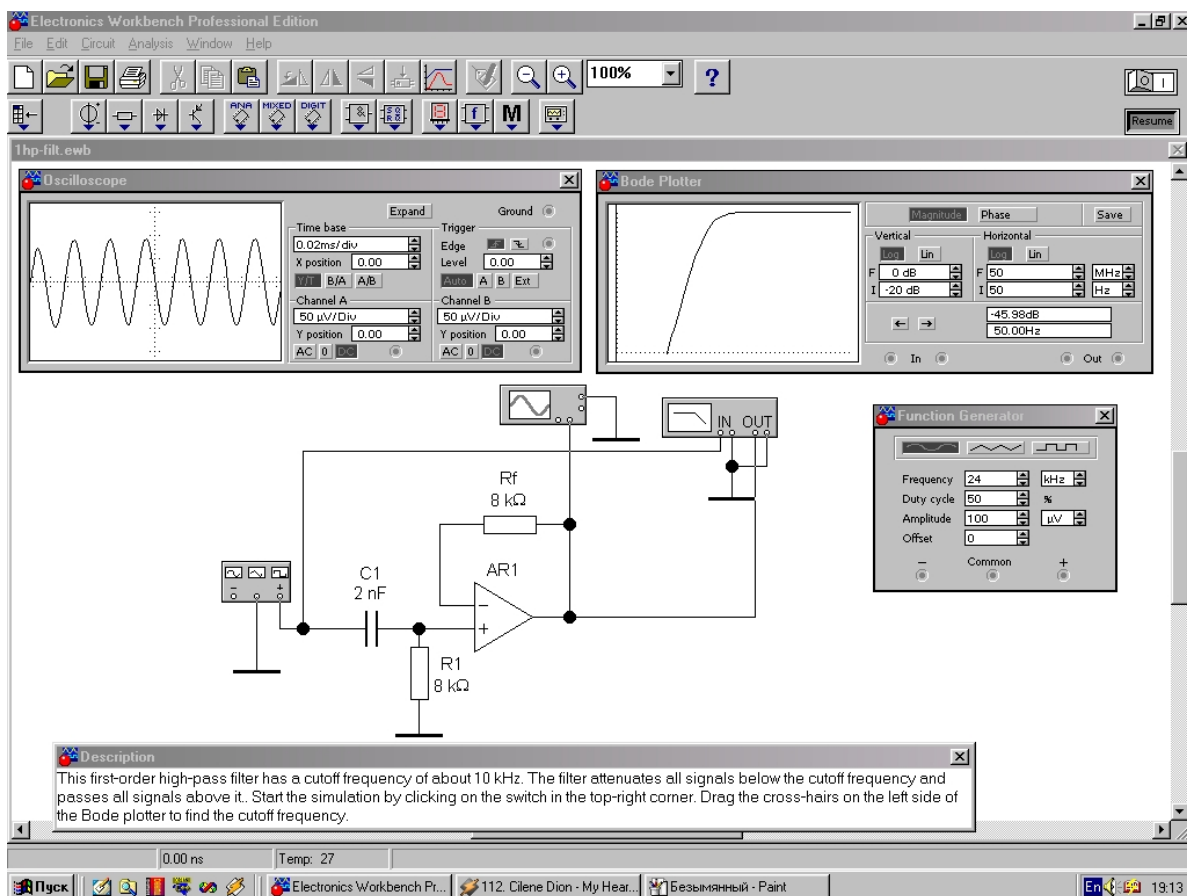


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд екрана комп'ютера при роботі з програмою EWB

Головне меню складається з таких компонентів: меню роботи з файлами (File), меню редагування (Edit), меню роботи з колами (Circuit), меню аналізу схем (Analysis), меню роботи з вікнами (Window), меню роботи з файлами довідок (Help).

Панель інструментів складається з “швидких кнопок”, що мають аналоги в головному меню, кнопок запуску і призупинення роботи, набору радіоелектронних аналогових і цифрових компонентів, індикаторів, елементів керування й інструментів.

2.2 МЕНЮ FILE

Меню File дозволяє здійснювати операції роботи з файлами. На рисунку 2.2 зображено зовнішній вигляд меню File

New	Ctrl+N
Open...	Ctrl+O
Save	Ctrl+S
Save As...	
Revert to Saved...	
Import...	
Export...	
Print...	Ctrl+P
Print Setup...	
Exit	Alt+F4
Install...	

Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд меню File

Розглянемо послідовно операції даного меню.

File/New - операція призначена для закриття поточної схеми і створення нової. Цю операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+N**. При цьому створюється безіменне вікно, що може використовуватись для синтезу схеми. Якщо перед цим ви зробили які-небудь зміни поточної схеми, то вам буде запропоновано зберегти поточну схему перед її закриттям. При запуску Electronics Workbench дана операція виконується автоматично. За замовчуванням схема іменується як Default.ewb.

File/Open - операція призначена для відкриття вже існуючого файлу схеми. Її також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+O**. Вона відображає стандартне діалогове вікно відкриття файлу, у якому необхідно вибрати диск і каталог, що містить файл схеми, яку потрібно відкрити. Відкривати можна тільки файли з розширеннями .ca, .ca3, .cd3, .ca4, .ewb.

File/Save - операція зберігає поточний файл схеми. Цю операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+S**. При цьому відображається стандартне діалогове вікно збереження файлу, у якому необхідно вибрати диск і каталог, де потрібно зберегти схему та дати назву файлу, в якому вона буде зберігатися. Розширення .ewb додаються до імені файлу автоматично. Наприклад, схема з ім'ям Piol, буде збережена як Piol.ewb.

File/Save as - команда аналогічна операції Save, але вона зберігає поточну схему з новим ім'ям файлу, залишаючи початкову схему

незмінною. Використовуйте цю команду для безпечного експериментування на копії схеми, без зміни оригіналу.

File/Revert to Saved (Revert) - команда повертає схему до вигляду, який вона мала в момент останнього збереження.

File/Import - перетворить нестандартні файли схем (розширення .net, .cir) до стандартного типу файлів Electronics Workbench.

File/Export - зберігає файл схеми з одним із таких розширень: .net, .scr, .cmp, .cir, .plc.

File/Print - команда призначена для повної чи часткової роздруківки схеми і показників приладів. Цю операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+P**. Для виконання операції необхідно вибрати елементи, які будуть надруковані, у порядку, в якому ви хочете їх надрукувати.

File/Print Setup (Windows) - операція призначена для налаштування принтера. Відображає стандартне діалогове вікно Print Setup, з якого потрібно вибрати встановлений принтер і визначати орієнтацію зображення, розмір паперу, джерело паперу й інші параметри.

File/Exit - операція призначена для закінчення роботи з пакетом Electronics Workbench. Якщо зміни в схемі не були попередньо збережені, то буде зроблений запит на збереження. Дану операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Alt+F4**.

File/Install (Windows) - операція призначена для установки додаткових компонентів Electronics Workbench. Для її виконання потрібно звернутися до диска, що містить додаткові компоненти.

2.3 МЕНЮ EDIT

Меню Edit дозволяє здійснювати операції редагування (рис.2.3).

Cut	Ctrl+X
Copy	Ctrl+C
Paste	Ctrl+V
Delete	Del
Select All	Ctrl+A
Copy as Bitmap	Ctrl+I
Show Clipboard	

Рисунок 2.3 - Зовнішній вигляд меню Edit

Edit/Cut - команда використовується для видалення обраних компонентів, схем чи тексту. При цьому обране поміщається в буфер обміну, звідки його можна вставляти в потрібне місце. Команда не спрацьовує, якщо вибір містить у собі інструментальні піктограми. Цю

операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+X**.

Edit/Copy - команда призначена для копіювання обраних компонентів, схеми чи тексту. Копія поміщається в буфер обміну. Потім можна використовувати команду **Paste**, щоб вставити копію в потрібному місці. Операція не виконається, якщо вибір включає інструментальні піктограми. Вказану команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+C**.

Edit/Paste - команда розташовує копію вмісту буфера обміну в активне вікно (вміст залишається в буфері обміну). Для успішного виконання операції буфер повинен містити компоненти **Electronics Workbench** чи текст. Вміст буфера обміну може вставлятися тільки у вікна, в яких передбачається розміщення такої інформації. Наприклад, не можна вставити компонент електричної схеми у вікно опису. Цю операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+V**.

Edit/Delete - команда повністю видаляє обрані компоненти чи текст. Використовуйте команду **Delete** з обережністю. Видалена інформація не може бути відновлена. Операцію також можна викликати натисканням клавіші **Delete**.

Edit/Select All - команда вибирає всі елементи в активному вікні. Якщо прилад - частина вибору, то команди **Edit/Copy** і **Edit/Paste** стають недоступними. Для того, щоб вибрати всі компоненти схеми, крім кількох елементів, використовуйте команду **Select All**, а потім зніміть виділення з зайвих елементів, натискаючи одночасно клавішу **Ctrl** та ліву кнопку миші.

Edit/Copy as Bitmap - команда призначена для копіювання растрового зображення елементів у буфер обміну. Ви можете використовувати ці зображення в текстових процесорах чи програмах обробки зображень.

Щоб скопіювати растрове зображення елементів необхідно:

- a) вибрати **Edit/Copy as Bitmap** (курсор зміниться на crosshair);
- б) натиснути й утримувати ліву кнопку миші переміщаючи курсор, щоб сформувати прямокутник, який включає необхідні для копіювання елементи;
- в) відпустити ліву кнопку миші.

Edit/Show Clipboard - команда відображає вміст буфера обміну. Буфер обміну - тимчасове місце збереження для компонентів чи тексту, які вам потрібно помістити пізніше в іншому місці в схемі. Ви можете також використовувати буфер обміну, щоб передати інформацію від **Electronics Workbench** до іншої прикладної програми. Буфер обміну може містити в собі графіку (компоненти чи схеми) і текст. Якщо активне вікно не може містити тип інформації, що знаходиться в буфері обміну, або якщо буфер обміну порожній, команда **Edit/Paste** буде недоступною. Наприклад, якщо буфер обміну містить компоненти, а поточним є вікно опису, то команда

Paste буде недоступною. Щоб закрити буфер обміну, двічі натисніть позначку меню Control (Windows).

2.4 МЕНЮ CIRCUIT

Меню Circuit дозволяє здійснювати операції для роботи з колами.

Rotate	Ctrl+R
Flip Horizontal	
Flip Vertical	
Component Properties...	
Create Subcircuit...	Ctrl+B
Zoom In	Ctrl++
Zoom Out	Ctrl+-
Schematic Options...	

Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд меню Circuit

Circuit/Rotate - команда дозволяє обертати обрані компоненти на 90 градусів за годинниковою стрілкою. Текст, пов'язаний з компонентом (мітки, значення й інформація про модель), може бути повторно встановлений, але при виконанні команди він не відображається. При обертанні провідники, прикладені до компонента, переорієнтовуються автоматично. Коли під дію команди потрапляє амперметр або вольтметр, то обертаються тільки їхні термінали. Операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+R**.

Circuit/Flip Vertical - команда дзеркально відображає обрану схему по вертикалі у вікні схеми. Зверніть увагу, що будь-які провідники, які під'єднані до дзеркально відображеного компонента переорієнтовуються за необхідності. Текст, пов'язаний з компонентом (мітки, значення й інформація про модель), може бути повторно встановлений, але після закінчення операції він не відображається.

Circuit/Flip Horizontal - команда дзеркально відображає обрану схему по горизонталі у вікні схеми. Будь-які провідники, які під'єднані до дзеркально відображеного компонента переорієнтовуються за необхідності. Текст, пов'язаний з компонентом (мітки, значення й інформація про модель), може бути повторно встановлений, але після закінчення цієї операції він також не відображається.

Circuit/Component Properties - команда призначена для зміни властивостей обраного компонента. Вона також виводиться при подвійному натисканні на зображення компонента. При виклику за допомогою меню, після натискання правої кнопки миші, призначаються

задані за замовчуванням властивості для всіх обраних компонентів. Виконання команди не впливає на вже розміщені компоненти.

При виконанні команди відкривається діалогове вікно **Circuit/Component Properties**, закладки якого залежать від типу обраного компонента. Можливі такі типи закладок:

- Label;
- Value;
- Models;
- Schematic Options;
- Fault;
- Node;
- Display;
- Analysis Setup.

Зкладка **Label** – використовується для встановлення або заміни мітки компонента та ідентифікатора (компоненти типу з'єднувачів, заземлень, вимірників не мають ідентифікаторів). Закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+L**.

Якщо виконується дзеркальне повертання або відображення компонентів, то мітка може бути встановлена повторно. Якщо, в результаті виконання цих операцій провідник проходить через мітку, то її можна змістити праворуч, додаючи кілька пропусків перед нею.

Щоб вставити загальну інформацію в схему, введіть текст у вікно опису, доступне з меню **Window**.

Зверніть увагу, що ідентифікатори призначаються системою унікально ідентифікуючи компонент. Ви можете змінювати їх в разі потреби, але вони повинні залишатися унікальними. Ідентифікатори не можуть бути видалені.

Value Tab - закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+U**. Поля на цій закладці визначаються в залежності від компонента.

Models - закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+M**. Використовуйте цю закладку для вибору моделі компонента і для її редагування, додавання чи видалення моделей чи бібліотек. Компоненти за замовчуванням „ідеальні”, що для більшості схемотехнічних моделювань може бути достатнім. Однак, якщо потрібно збільшити точність результатів моделювання, то потрібно використовувати „реальну” модель.

Schematic Options - закладка використовується для встановлення кольору провідника.

Fault - закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+F**. Використовується для імітації несправності виділеного компонента:

- Leakage - встановлює значення опору, визначене в суміжних полях, паралельно з обраними терміналами. Це змушує струм текти повз термінали замість того, щоб пройти через них, тобто імітується опір електричних втрат;

- Short - встановлює дуже низький опір між двома терміналами, так що компонент не має ніякого вимірного ефекту на схемі;

- Open - встановлює дуже високий опір на терміналі, тобто імітує обрив з'єднання з даним терміналом.

Node - закладка використовується для зміни властивостей вузла:

- Node ID - призначене системою ім'я вузла;

- Use as Testpoint - визначає, що даний вузол розглядається як тестова точка;

- Set Node Color - скасовує набір кольорів для окремих проводів.

Display - закладка використовується для відображення або приховування тих чи інших елементів Electronics Workbench.

Якщо обрано Use Schematic Options, то використовуються налаштування параметрів дисплея з закладки Show/Hide діалогового вікна Circuit/Schematic Options.

Show labels, Show models, Show reference ID - коли не обрано Use Schematic Options, використовуються параметри дисплея як вони були визначені.

Analysis Setup - закладка використовується для налаштування параметрів елементів, таких, наприклад як робоча температура.

Якщо обрано Use global temperature, то використовується набір температур встановлений у Analysis/Analysis Options. Якщо не обрано, то використовуються ті температури, що були визначені автоматично.

Set initial conditions - встановлює початкові значення для компонента.

Деякі компоненти відображають додаткові параметри на цій закладці для використання разом з параметрами, описаними в технічному довіднику Electronics Workbench.

Circuit/Create Subcircuit - команда поєднує обрані елементи схеми в під схему і це відповідає створенню інтегральної схеми. Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+B**. Підсхема може містити стільки компонентів, скільки потрібно.

Для створення підсхеми:

а) виберіть елементи, які потрібно використовувати для підсхеми;

б) виберіть Circuit/Create Subcircuit, і завершіть діалог, що з'являється:

Copy from Circuit - поміщає копію обраних компонентів у підсхемі. Початкові компоненти залишаються на своїх місцях, оскільки вони знаходяться у вікні схеми.

Move from Circuit - видаляє обрані компоненти зі схеми, так що вони з'являються тільки в підсхемі.

Replace in Circuit - поміщає обрані компоненти в підсхему і заміняє обрані компоненти в схемі прямокутником, позначеним ім'ям підсхеми.

Обрані компоненти з'являються в новому вікні, вікні підсхеми. Ім'я нової підсхеми додається до списку доступних підсхем, що відображається, коли піктограма підсхеми переміщається з інструментальної панелі Favorites. Підсхема доступна тільки для поточних схем.

Circuit/Zoom - команда відображає підменю вибору збільшення або зменшення розміру вікна схеми.

Circuit/Schematic Options - команда призначена для керування всім вікном схеми. Зміни відносяться тільки до поточної схеми.

У вікні команди виводиться такий набір закладок:

- Grid;
- Show/Hide;
- Display;
- Value.

Grid - закладка керує дисплеєм і використанням сітки, що лежить в основі вікна схеми. Використання сітки спрощує вирівнювання елементів у схемі. Ви можете використовувати сітку без її відображення. Відображення сітки здійснюється на задньому плані вікна схеми. Сітку зручно використовувати для розміщення об'єктів.

Show/Hide - закладка керує полем інформації у вікні схеми. Її параметри корисно використовувати, коли потрібно „заховати” об'єкт.

Display - закладка керує шрифтом, який використовується для міток і посилань на ідентифікатори.

Value - закладка керує шрифтом, який використовується для виводу значень і моделей.

2.5 МЕНЮ ANALYSIS

Меню Analysis дозволяє вибирати для виконання різні види аналізу. Зовнішній вигляд меню наведений на рисунку 2.5.

Перед виконанням кожного з них користувачу буде запропоновано заповнити параметри аналізу. Аналіз буде виконаний тільки в тому випадку, коли це можливо для даної схеми.

Analysis/Activate - команда активізує схему (вмикає перемикач живлення). Активізація схеми запускає послідовність математичних операцій, щоб обчислити значення сигналів в тестових точках схеми. Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+G**.

Перемикач живлення залишається увімкненим до моменту зупинки або призупинення моделювання.

Activate	Ctrl+G
Resume	F9
Stop	Ctrl+T
Analysis Options...	Ctrl+Y
DC Operating Point	
AC Frequency...	
Transient...	
Fourier...	
Noise...	
Distortion...	
Parameter Sweep...	
Temperature Sweep...	
Pole-Zero...	
Transfer Function...	
Sensitivity...	
Worst Case...	
Monte Carlo...	
Display Graphs	

Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд меню Analysis

Analysis/Pause and Analysis/Resume - команда тимчасово перериває або продовжує моделювання (керується кнопкою Pause/Resume). Припинення корисне, якщо потрібно більш детально розглянути форму хвилі (форму кривої, форму сигналу) або зробити зміни в настройках інструментів.

Analysis/Stop - команда примусово зупиняє моделювання. Вона еквівалентна вимиканню перемикача живлення. Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+T**.

Зверніть увагу, що вимикання живлення схеми стирає отримані дані і „скидає” всі значення до початкового.

Analysis/Analysis Options - команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+Y**.

Electronics Workbench дозволяє оперативно керувати багатьма аспектами моделювання, вибирати методи моделювання і перегляду результатів. Ефективність моделювання в значній мірі залежить від параметрів компонентів схеми. Більшість параметрів має значення за замовчуванням.

Щоб розглянути чи змінити будь-який з параметрів потрібно вибрати Analysis/Analysis Options:

Analysis/DC Operating Point - команда виконує аналіз DC Operating Point;

Analysis/AC Frequency - команда виконує аналіз AC Frequency;

Analysis/Transient - команда виконує аналіз Transient;

Analysis/Fourier - команда виконує аналіз Fourier;

Analysis/Noise - команда виконує аналіз Noise;

Analysis/Distortion - команда виконує аналіз Distortion;

Analysis/Parameter Sweep - команда виконує аналіз Parameter Sweep;

Analysis/Temperature Sweep - команда виконує аналіз Temperature Sweep;

Analysis/Pole-Zero - команда виконує аналіз Pole-Zero;

Analysis/Transfer Function - команда виконує аналіз Transfer Function;

Analysis/Sensitivity - команда виконує аналіз Sensitivity;

Analysis/Worst Case - команда виконує аналіз Worst Case;

Analysis/Monte Carlo - команда виконує аналіз Monte Carlo;

Analysis/Display Graph - команда виводить на екран монітора графічні результати аналізу.

2.6 МЕНЮ WINDOW

Меню Window дозволяє здійснити операції роботи з вікнами. Зовнішній вигляд меню поданий на рисунку 2.6.

Arrange	Ctrl+W
1 Circuit	
3 Description	Ctrl+D

Рисунок 2.6 - Зовнішній вигляд меню Window

Window/Arrange - команда акуратно розміщує в полі екрану всі відкриті вікна. Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+W**.

Window/Circuit - команда переносить вікно схеми на передній план.

Window/Description - команда відкриває вікно опису, а якщо вікно опису вже відкрито, то переносить його на передній план. Ви можете надрукувати коментарі і вказівки у вікні опису, а також вставити текст з іншої прикладної програми чи опису схеми. Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **Ctrl+D**.

2.7 МЕНЮ HELP

Меню Help викликає файл-довідку. Виклик довідки також можна здійснити натисканням клавіші F1.

2.8 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ З ПІДГОТОВКИ, ВВОДУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ

1. Завантажте Electronics Workbench.

2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

3. Перенесіть необхідні елементи з заданої викладачем схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

4. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

5. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

6. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

7. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольні-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

8. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis.

3 МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ В СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ELECTRONICS WORKBENCH

3.1 ПІДГОТОВКА ДО РОБОТИ З ELECTRONICS WORKBENCH

Для роботи з програмним комплексом Electronics Workbench V.5.0С необхідний IBM - сумісний персональний комп'ютер з процесором І486 (рекомендується Pentium) і операційною системою Windows (рекомендується Windows 95 , Windows 98 або наступні версії).

Для початку роботи з програмним пакетом необхідно завантажити систему, встановити Electronics Workbench, якщо це не було зроблено раніше. Потім за допомогою „провідника” (для Windows 95 чи Windows 98) відкрити робочий каталог, у якому встановлено пакет, і запустити файл WEWB32.EXE.

3.2 МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРУВАЛЬНОГО РС - КОЛА

Для початку моделювання необхідно завантажити файл-схему в середовище Electronics Workbench, якщо цей файл був раніше створений і зберігається на одному з накопичувачів комп'ютера. Це робиться за допомогою виконання команди меню File/Open, або натисканням на відповідну „гарячу кнопку” на панелі інструментів з наступним вибором накопичувача, каталогу та імені файлу. Якщо ж файл ще не створений, необхідно створити його за допомогою виконання команди File/New і команди File/Save as. При виконанні першої команди буде створений новий файл-схема й у випадку, якщо яка-небудь схема вже завантажена в Electronics Workbench, користувачу буде запропоновано зберегти попередню схему. Друга команда призначена для запису файлу на накопичувач і встановлення каталогу й імені, під яким буде зберігатися дана схема. Далі потрібно винести на робочу область Electronics Workbench моделі елементів, необхідних для моделювання даної схеми. Для цього потрібно курсор навести на іконку потрібного набору елементів, натиснути ліву кнопку миші, після чого на екрані монітора з'явиться допоміжне вікно із зображеннями елементів цього набору. Далі необхідно вибрати відповідний елемент. Для цього курсор наводиться на малюнок елемента, натискається ліва кнопка миші й елемент переноситься на робочу область (кнопку миші необхідно тримати натиснутою до вибору місця розташування елемента).

У даному випадку необхідні: джерело імпульсів (Function Generator), резистор (Resistor), конденсатор (Capacitor), осцилограф (Oscilloscope) і заземлення (Ground). Резистор і конденсатор знаходяться в

наборі Basics, заземлення - у наборі Sources, осцилограф і генератор імпульсів - у наборі Instruments.

Кожен елемент має точки з'єднання, які потрібно з'єднати для отримання потрібної схеми.

Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. При цьому створюється провідник, що з'єднує їх. За необхідності на провідник можна нанести вузол (Connector у наборі Basics). Потім для наочності можна перенести елементи в необхідні місця робочої області. Для перенесення елемента необхідно навести курсор на вибраний елемент та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, перенести у відповідна місце. При цьому з'єднувальні провідники будуть переміщені автоматично. За необхідності провідники також можна переміщати. На рисунку 3.1 подано вигляд інтерфейсу Electronics Workbench після створення моделі RC – кола.

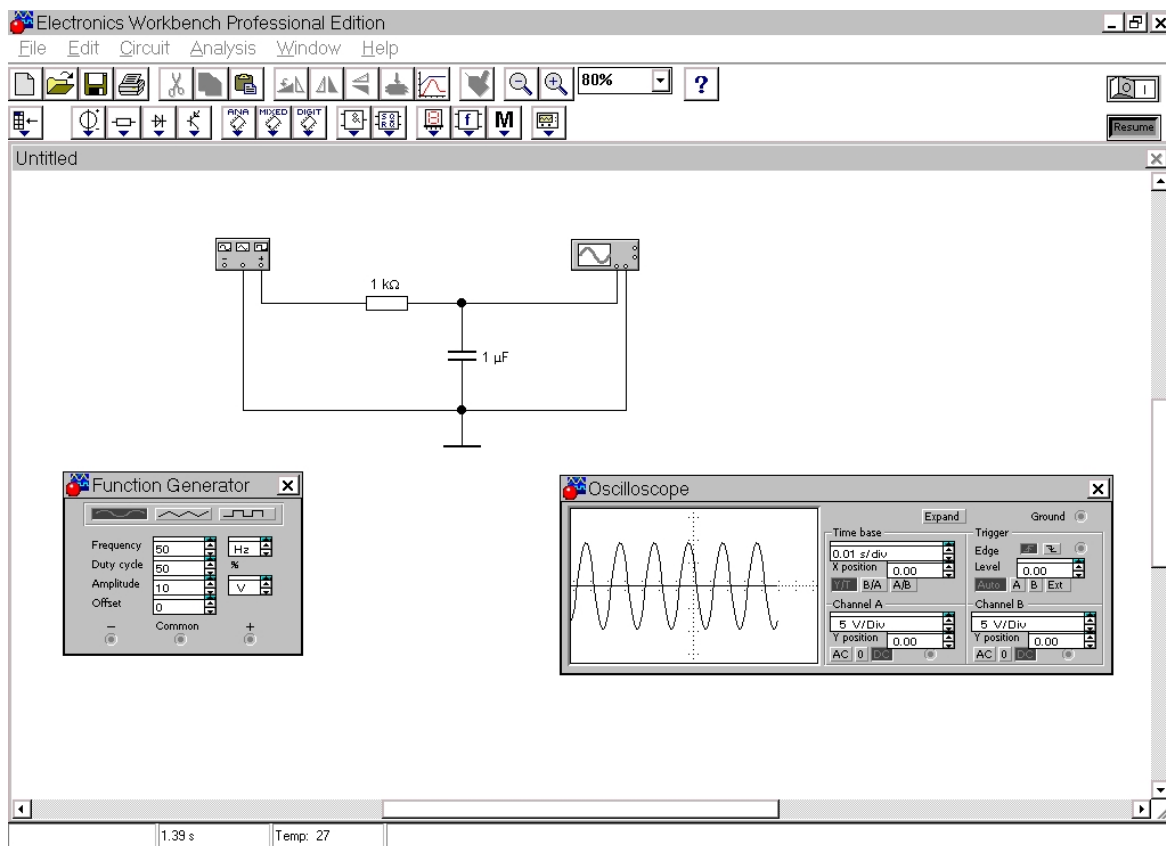


Рисунок 3.1 – Модель RC-кола в Electronics Workbench

Коли схема створена і готова до роботи, тоді для початку імітації процесу роботи необхідно виконати команду меню - натиснути кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. Ця дія приведе до робочого стану схему, а в одному з вікон рядка стану буде відображатися індикація

часу роботи схеми. Цей час не відповідає реальному, він залежить від швидкодії процесора і системи персонального комп'ютера, саме тому для розробки складних схем рекомендується використовувати комп'ютери не нижче Pentium II з тактовою частотою процесора 300 МГц.

Зупинити імітацію можна двома способами. Якщо ви закінчили роботу і перегляд результатів імітації, то можна повторно натиснути перемикач живлення. Якщо потрібно тимчасово перервати роботу схеми, наприклад, для детального розгляду осцилограми, а потім продовжити роботу, то потрібно скористатися кнопкою Pause, що розташована на панелі інструментів. Можливість призупинення процесу є великою перевагою у порівнянні з традиційними засобами тестування радіоелектронних пристроїв.

Тепер для виконання аналізу імітації можна змінювати номінали елементів, виводити і налаштовувати термінали приладів. У даному випадку можна переглянути осцилограму на виході RC-кола. Для цього потрібно вивести вікно терміналу осцилографа подвійним натисканням на компоненті Oscilloscope. Вигляд панелі осцилографа поданий на рисунку 3.2.

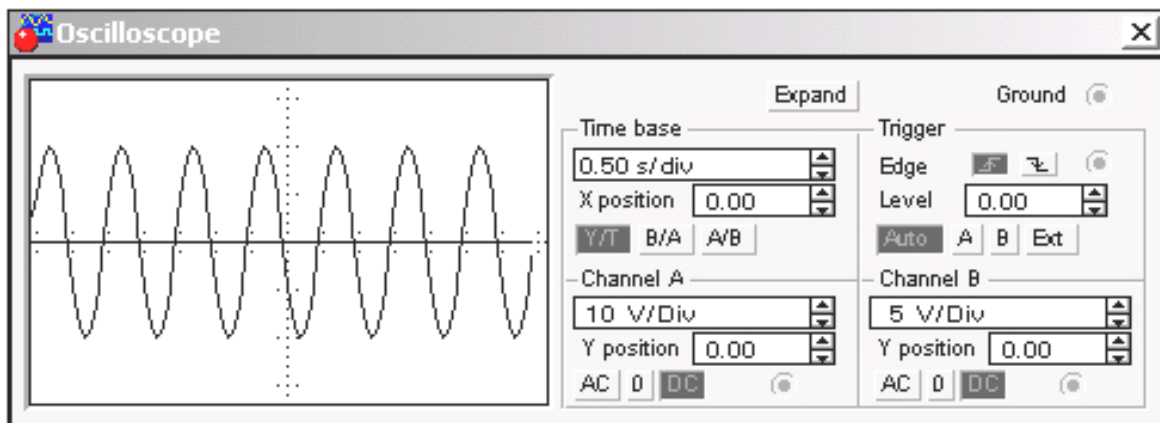


Рисунок 3.2 – Вигляд нормальної панелі віртуального осцилографа в системі Electronics Workbench

При використанні осцилографа в Electronics Workbench є можливість перегляду сигналу протягом усього часу імітації. Для цього можна застосувати кнопку Expand і скористатися смугами прокручування зображення. Для переведення панелі у нормальний режим використовується кнопка Reduce.

Вигляд розширеної панелі осцилографа показаний на рисунку 3.3.

Для вивчення властивостей RC-кола можна змінити сигнал на його вході. Для цього потрібно вивести на екран панель генератора імпульсів, що здійснюється таким чином: курсором відмічаємо потрібну компоненту та двічі натискаємо ліву кнопку миші. Її вигляд поданий на рисунку 3.4.

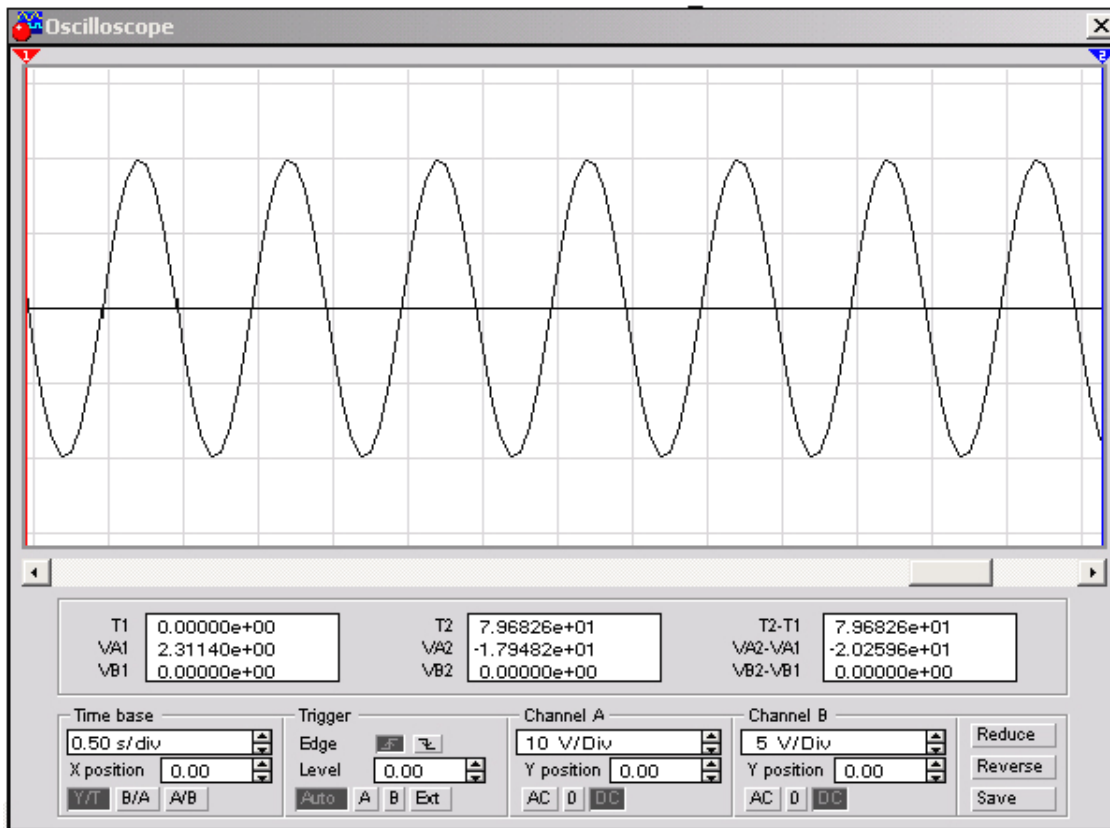


Рисунок 3.3 – Розширена панель осцилографа

За допомогою генератора імпульсів можна формувати три види сигналів: синусоїдальний, пилкоподібний і прямокутний. У даному випадку для аналізу потрібна послідовність прямокутних імпульсів. Для переведення генератора в потрібний режим потрібно натиснути відповідну кнопку на панелі. Також можна змінити інші параметри – частоту й амплітуду сигналу.

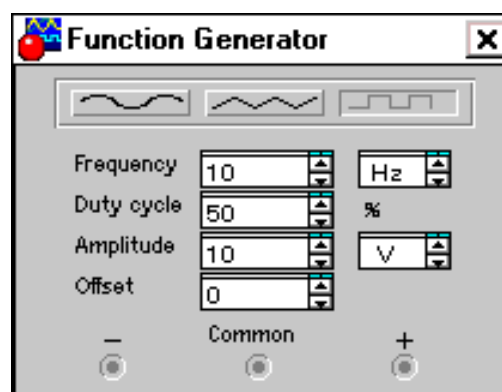


Рисунок 3.4 – Панель генератора імпульсів

Перед зміною будь-яких параметрів бажано відключати джерела живлення схеми, інакше отримані результати можуть бути недостовірними.

Вихідний сигнал інтегрувального кола показаний на рисунку 3.5.

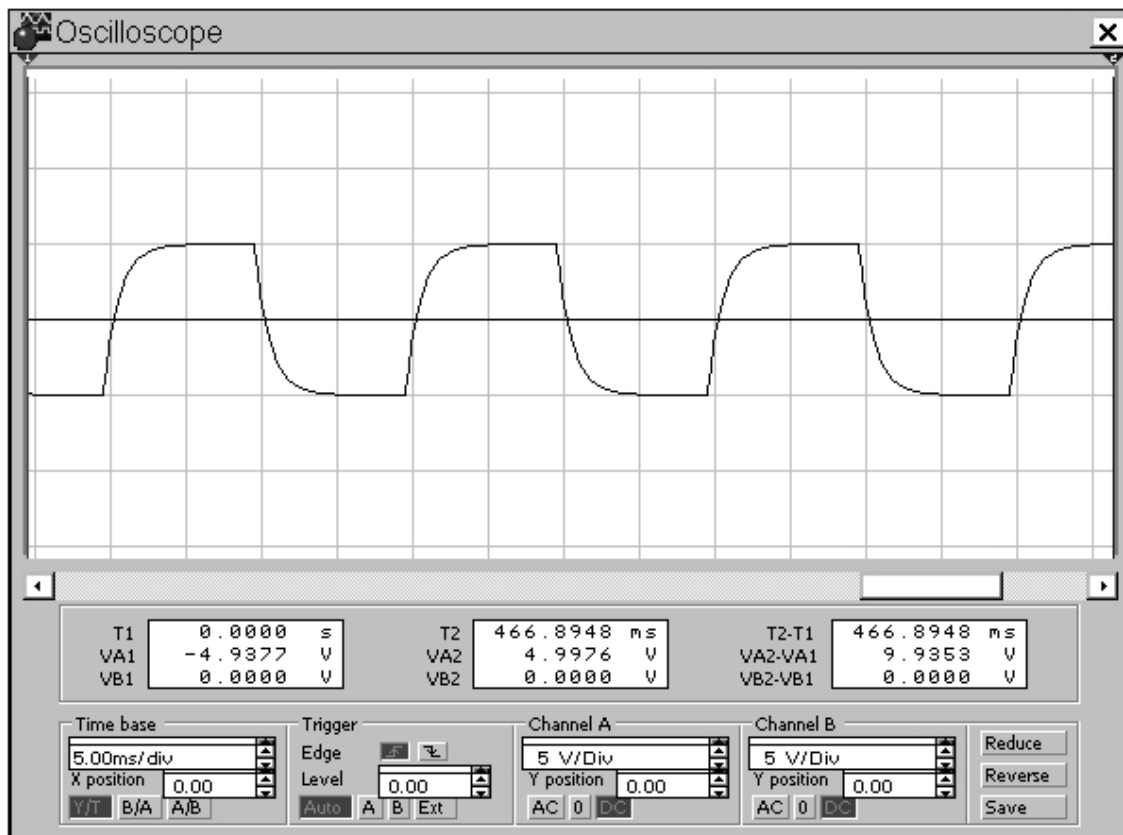


Рисунок 3.5 – Сигнал на виході інтегрувального RC – кола

Для того, щоб змінити будь-які параметри елементів схеми потрібно підвести курсор до потрібного елемента та двічі клацнути лівою кнопкою миші, при цьому на екрані буде виведене вікно властивостей елемента. Приклад такого вікна наведений на рисунку 3.6.

Крім аналізу прямого спостереження за терміналами інструментів, Electronics Workbench дозволяє виконувати додаткові види аналізу. Як приклад, для даної схеми можна отримати АЧХ і ФЧХ схеми як чотирьохполосника. Тобто, при розрахунку на вхід схеми буде подаватися сигнал різної частоти і буде виконано аналіз залежності вигляду вихідного сигналу від вхідного. При цьому потрібно задати початкову і кінцеву частоти смуги, в межах якої буде виконано аналіз.

Для проведення цього аналізу потрібно припинити роботу кола, тобто скористатися перемикачем живлення чи кнопкою Pause і виконати команду меню Analysis / AC Frequency. Перед розрахунком виводиться вікно параметрів аналізу. Вигляд цього вікна наведений на рисунку 3.7.

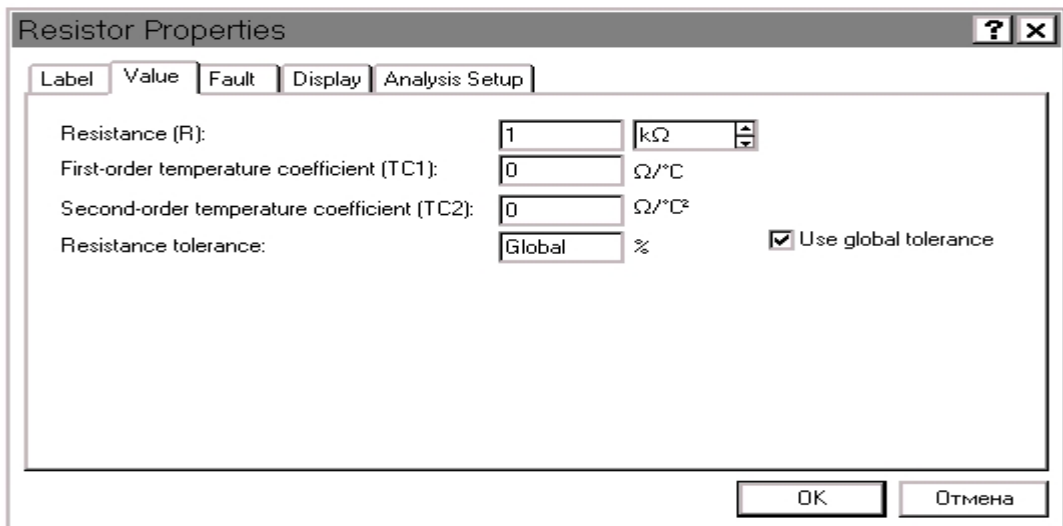


Рисунок 3.6 Вікно параметрів резистора

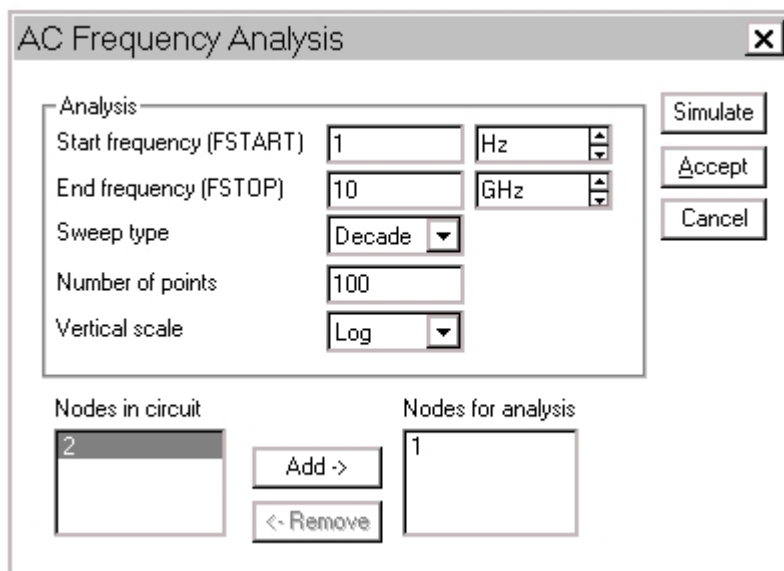


Рисунок 3.7 – Параметри аналізу AC Frequency

За необхідності можна змінити деякі з параметрів: Start frequency (початкова частота), End frequency (кінцева частота), Sweep type (тип горизонтальної осі на кінцевому графіку), Number of points (кількість точок аналізу). У даному випадку зручно встановити кількість досліджуваних точок рівною 1000 для отримання більш гладкого графіка, тип горизонтальної осі – логарифмічним і діапазон частот від 1Гц до 100 кГц.

Для отримання графіків АЧХ і ФЧХ потрібно натиснути кнопку Simulate у вікні параметрів аналізу, після чого буде виведено вікно результатів, подане на рисунку 3.8.

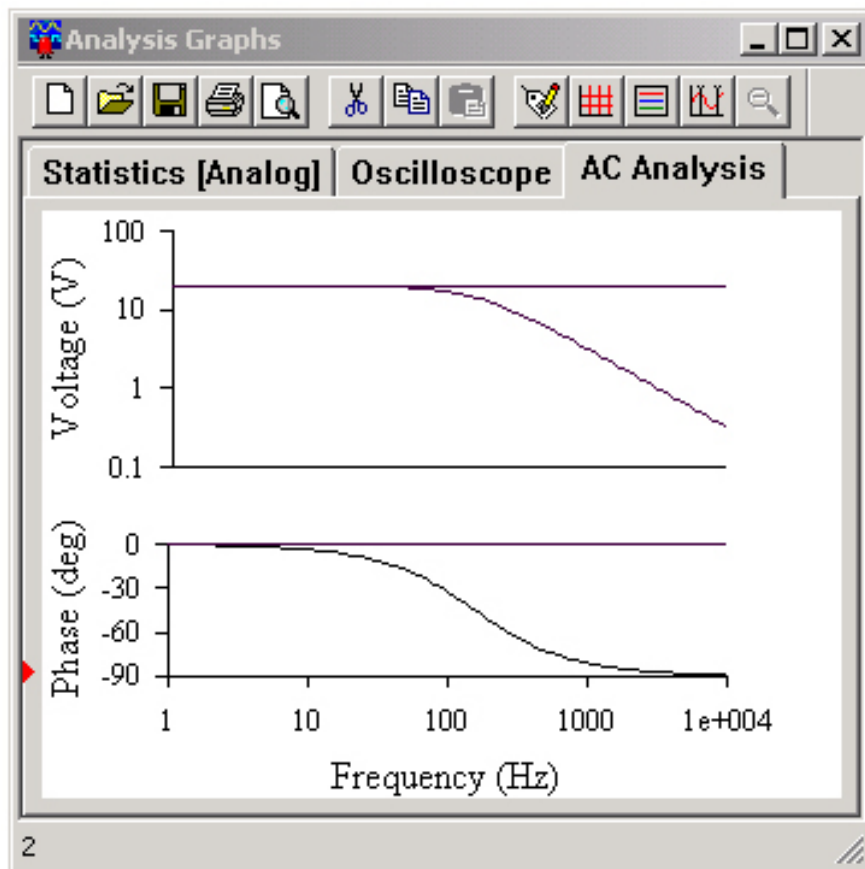


Рисунок 3.8 – АЧХ і ФЧХ інтегрувального RC – кола

3.3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЮЮЧОГО RC - КОЛА

Для моделювання диференціюючого RC - кола можна скористатися вже готовим файлом схеми інтегрувального кола, описаного в пункті 3.2. Для цього необхідно завантажити в середовище Electronics Workbench цей файл, скориставшись командою меню File/Open, та вибрати відповідний каталог і файл, після чого поміняти місцями розташовані в схемі резистор і конденсатор. При цьому буде зручно користуватися командою Rotate, яка стає доступною при розміщенні курсору миші на відповідному елементі та натисканні правою кнопкою миші. Також зручно пересувати елементи і провідники шляхом вибору і перенесення контактів при натиснутій лівій кнопці миші. Якщо файл схеми, описаної в пункті 3.2, відсутній на накопичувачах, то можна повторити операції підготування схеми до роботи, описані в пункті 3.2. Вигляд створеної схеми наведений на рисунку 3.9.

З диференціюючим RC – колом можна виконати такі ж види аналізу, які були описані в пункті 3.2. На рисунку 3.10 показаний сигнал на виході кола, а на рисунку 3.11 - АЧХ і ФЧХ схеми.

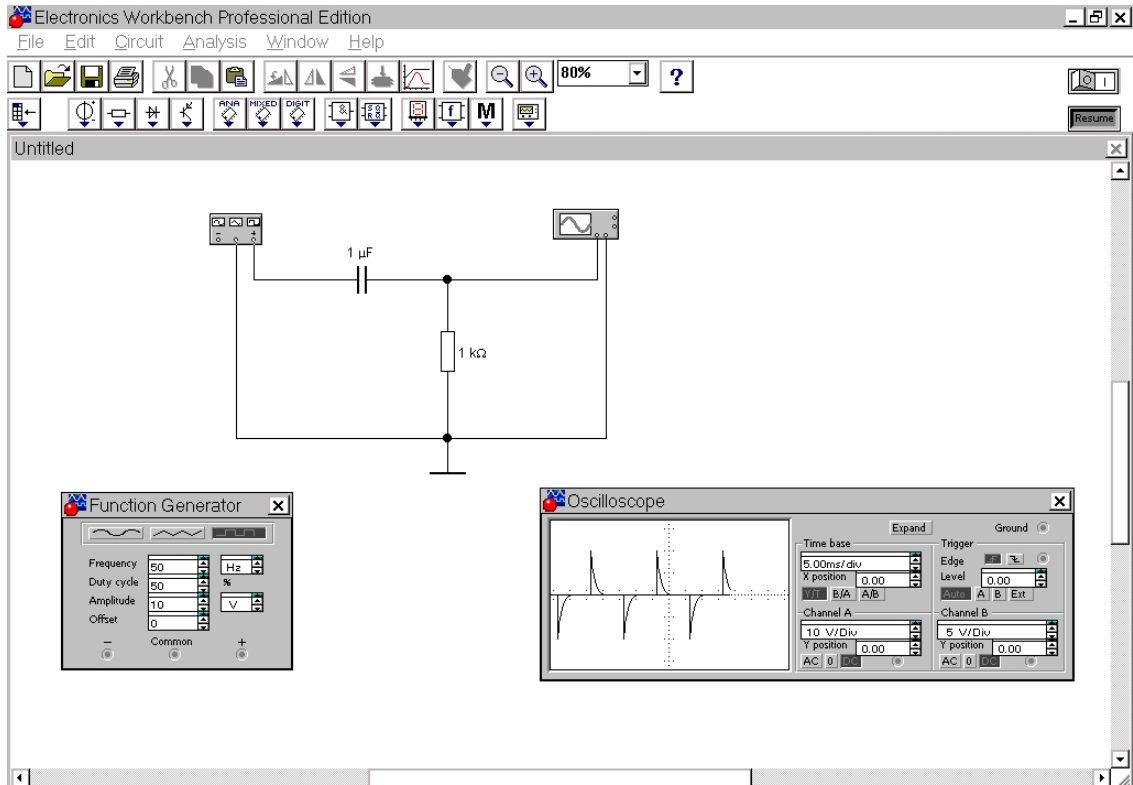


Рисунок 3.9 – Диференціююче RC – коло

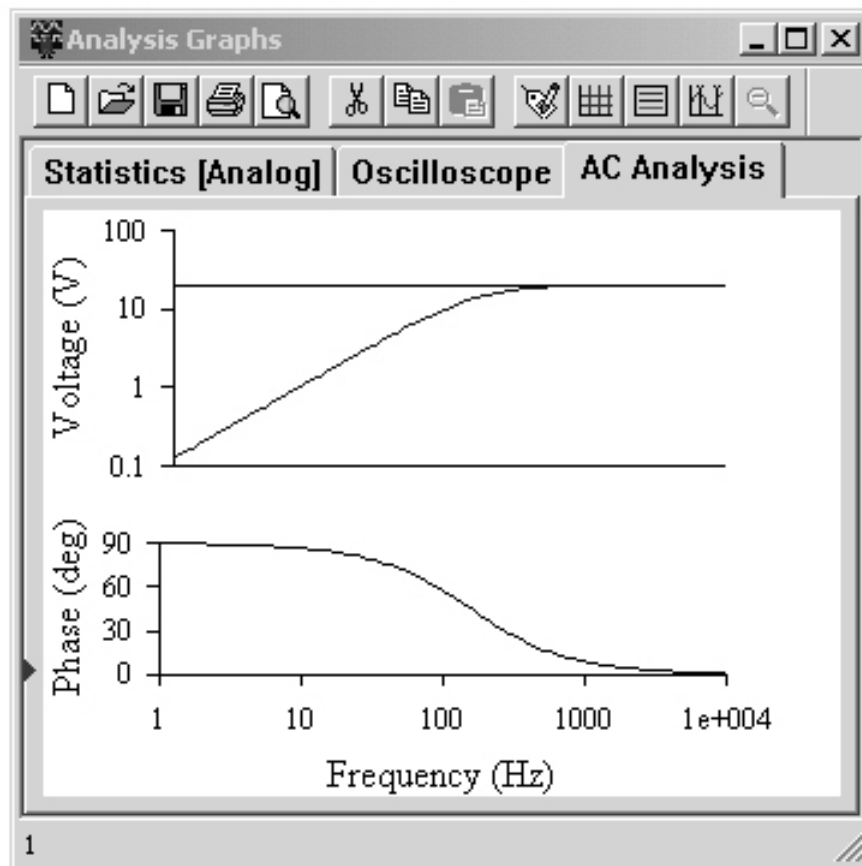


Рисунок 3.10 – Сигнал на виході диференціюючого RC – кола

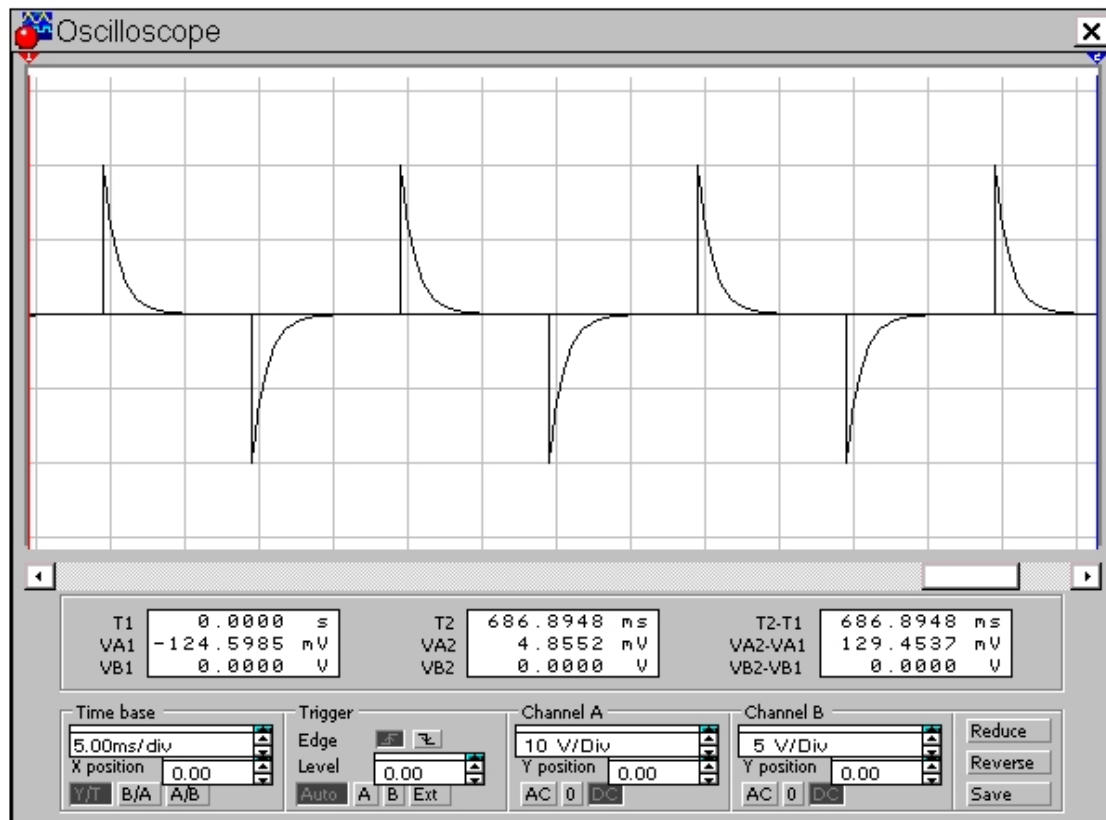


Рисунок 3.11 – АЧХ і ФЧХ диференціюючого RC - кола

3.4 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОГЕНЕРАТОРА НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ

Для моделювання транзисторного автогенератора необхідно скласти схему, подану на рисунку 3.12.

Для цього потрібно розмістити всі компоненти схеми на робочу область Electronics Workbench і з'єднати всі контакти провідниками. Модель транзистора знаходиться в наборі деталей Transistors, а джерело живлення - в наборі Sources. Після з'єднання моделей деталей у схему необхідно відредагувати параметри кожного компонента навівши на нього курсор миші, двічі натиснувши ліву кнопку та заповнивши вікна параметрів. Більш детально порядок виконання цих операцій описаний в розділі 1. Після настроювання параметрів можна ввімкнути джерело живлення шляхом натискування кнопки перемикання живлення і перевірити, спостерігаючи за панеллю осцилографа, чи виходить генератор у режим генерації. Якщо на виході не з'являється сигнал змінної напруги, тоді потрібно повторити розрахунок параметрів схеми і змінити їх відповідним чином.

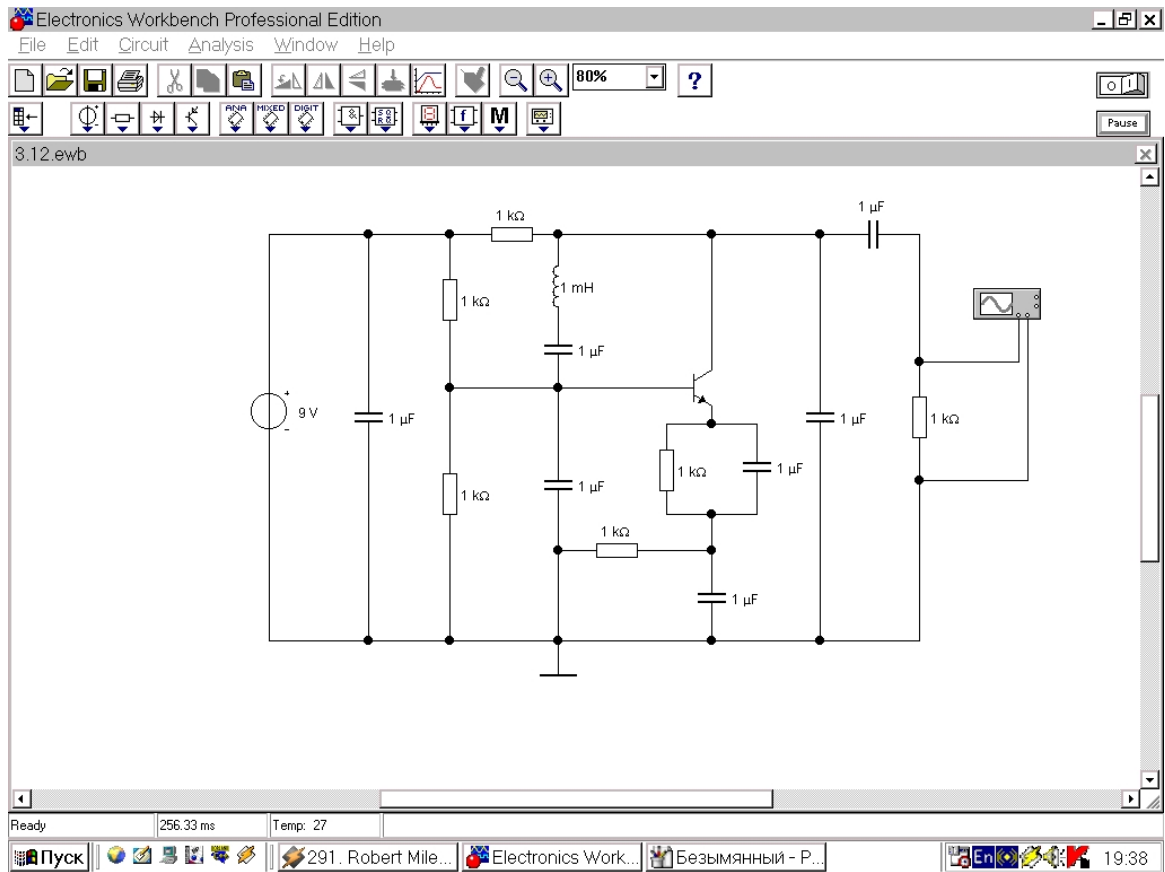


Рисунок 3.12 – Модель транзисторного автогенератора

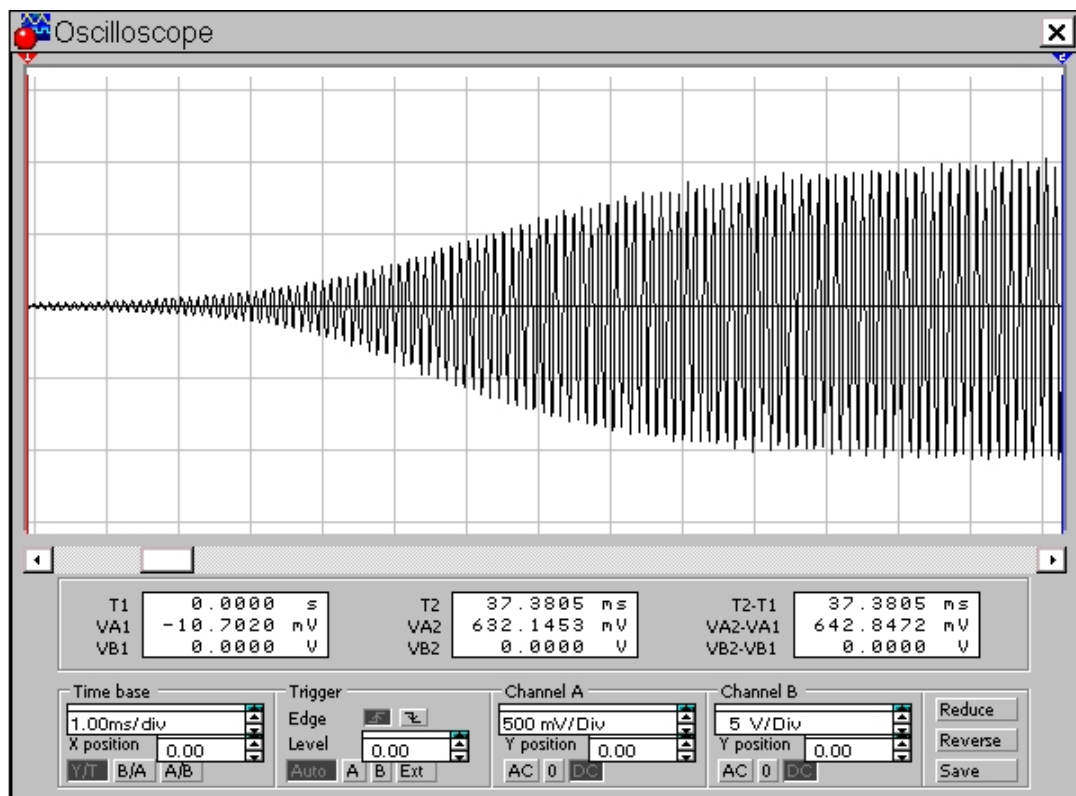


Рисунок 3.13 – Сигнал на виході транзисторного автогенератора

За сигналом на виході генератора зручно спостерігати використовуючи розширене вікно терміналу осцилографа. На рисунку 3.13 показано момент початку генерації сигналу і момент встановлення стабільного режиму транзисторного автогенератора. Для більш детального вивчення можна користуватись смугами прокручування і змінами параметрів терміналу.

Для отримання більш точної моделі можна замінити ідеальні компоненти моделями реальних деталей, тобто, наприклад, замінити ідеальний транзистор моделлю реально існуючого транзистора. Electronics Workbench містить у своїй базі досить велику кількість реальних моделей деталей широко відомих виробників.

Після завершення роботи з програмним комплексом потрібно закрити програму, але перед цим попередньо зберегти схему, якщо це потрібно.

4 ПРАКТИКУМ МОДЕЛЮВАННЯ БАЗОВИХ ВУЗЛІВ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ

Проведення практикуму призначене для закріплення студентами теоретичних знань та отримання практичних навичок в користуванні пакетом Electronics Workbench для моделювання роботи базових електронних схем.

Практикум складається з дванадцяти лабораторних робіт, виконання яких дозволить студентам повністю засвоїти сучасні методи синтезу і моделювання електронних схем. Розпочинається практикум з першої лабораторної роботи, в процесі виконання якої студенти вивчають і практично навчаються використовувати інструментарій пакету Electronics Workbench для створення та дослідження електронних схем. Всі подальші лабораторні роботи носять дослідницький характер. Вони присвячені моделюванню та дослідженню конкретних електронних елементів або базових вузлів електронних систем. Під час виконання цих робіт особливу увагу слід приділяти достовірності результатів моделювання. Потрібно проводити моделювання з застосуванням ідеальних моделей електронних компонентів, а потім виконувати уточнююче моделювання з заміною ідеальних моделей наближеними до реальних елементів.

При фронтальному методі виконання лабораторних робіт кожний студент виконує дослідження відповідно до індивідуального завдання, при цьому типи активних елементів пропонуються викладачем із бази активних елементів пакета Electronics Workbench або створюються студентом самостійно.

Перелік тем лабораторних робіт, які рекомендовані для виконання з метою закріплення практичних навичок студентів.

1. Інструментарій Electronics Workbench для створення та дослідження електронних схем.
2. Моделювання і дослідження напівпровідникових діодів.
3. Моделювання і дослідження тиристорів.
4. Моделювання і дослідження біполярних транзисторів.
5. Моделювання і дослідження польових транзисторів.
6. Моделювання і дослідження підсилювальних каскадів.
7. Моделювання і дослідження підсилювачів зі зворотним зв'язком.
8. Моделювання і дослідження операційних підсилювачів.
9. Моделювання і дослідження автоколивальних та ждучих мультивібраторів на біполярних транзисторах.
10. Моделювання і дослідження автоколивальних та ждучих мультивібраторів на операційних підсилювачах.
11. Моделювання і дослідження блокінг-генераторів.
12. Моделювання і дослідження інтегральних таймерів.

4.1 ІНСТРУМЕНТАРІЙ ELECTRONICS WORKBENCH ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

Лабораторна робота № 1.

Тема. Ознайомлення з інтерфейсом та основними можливостями програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: освоїти інтерфейс програмного комплексу Electronics Workbench і навчитися за її допомогою створювати і досліджувати віртуальні принципові і електронні схеми.

Теоретичні відомості

Програма Electronics Workbench є засобом програмної розробки та імітації електричних ланцюгів.

Інтерфейс користувача складається з меню, панелі інструментів і робочої області. На рисунку 4.1 зображено зовнішній інтерфейс користувача Electronics Workbench.

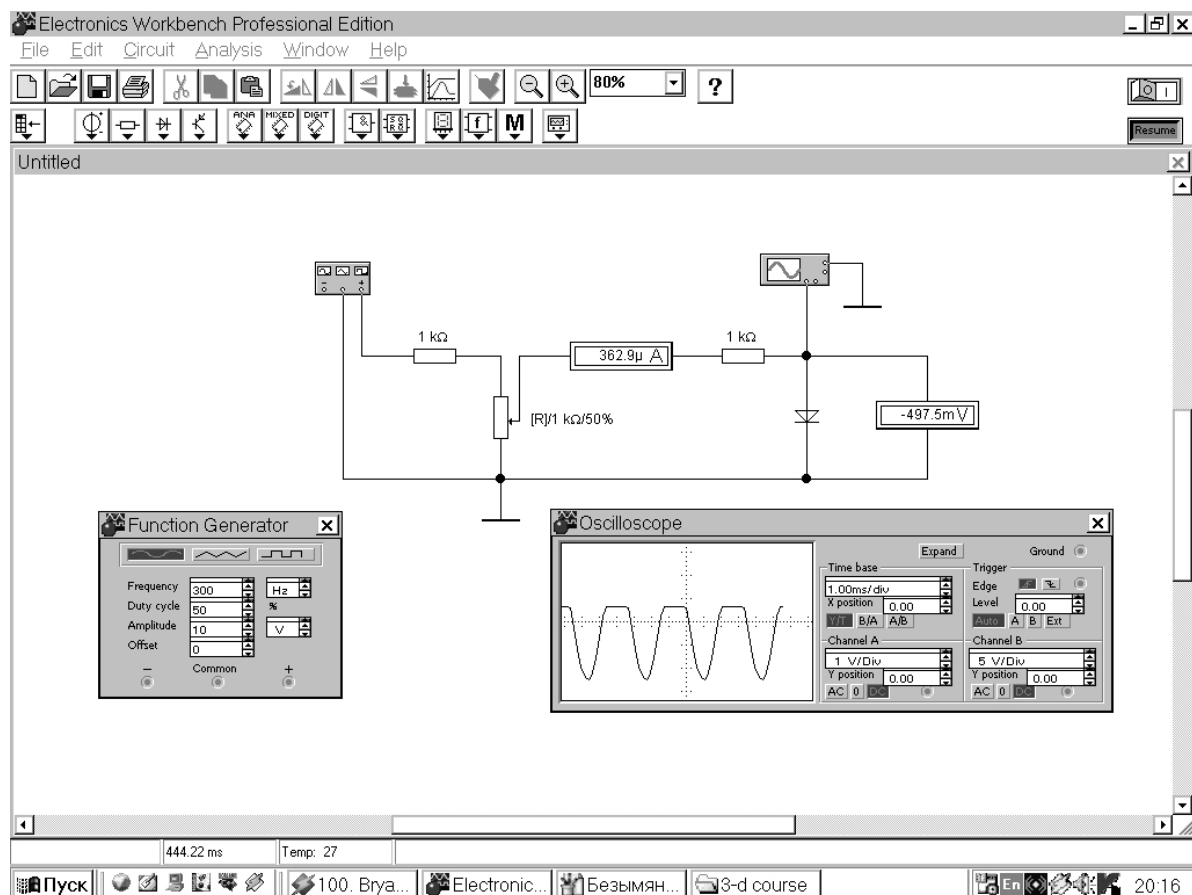


Рисунок 4.1 - Зовнішній вигляд екрана комп'ютера при роботі з програмою EWB.

Смуга меню складається з таких компонентів: меню роботи з файлами (File), меню редагування (Edit), меню роботи з ланцюгами (Circuit), меню аналізу схем (Analysis), меню роботи з вікнами (Window), меню роботи з файлами довідок (Help).

Панель інструментів складається з “швидких кнопок”, що мають аналоги в меню, кнопок запуску і зупинки аналізу, набору зображень і відповідних моделей радіоелектронних аналогових і цифрових елементів, індикаторів, елементів керування й інструментів.

Зовнішній вигляд меню File, Edit, Circuit, Analysis, Window і Help послідовно подано на рисунках 2.2 - 2.7. Перелік операцій з вказаних меню, порядок їх застосування і результати виконання детально розглянуті у розділі 2 даного посібника.

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.
3. Складіть схему, запропоновану викладачем.
4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.
5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).
6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.
7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольно-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Скласти схему (рисунок 4.2).

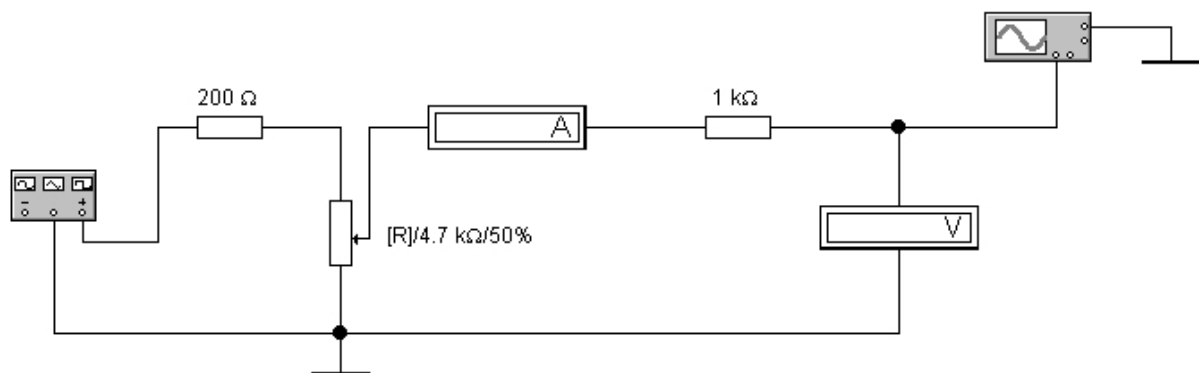


Рисунок 4.2 - Схема досліджень

Задаємо на генераторі, рисунок 4.3 (Function Generator), параметри сигналу:

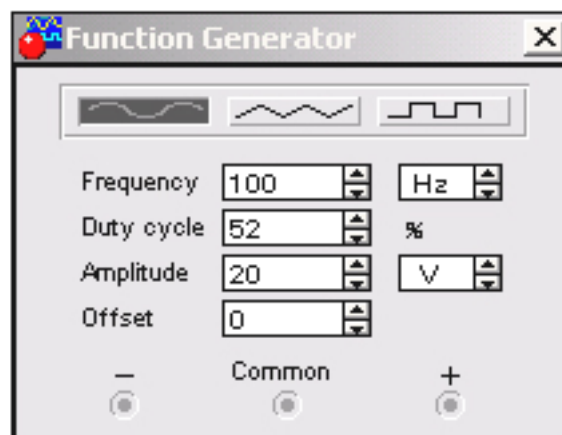


Рисунок 4.3 - Зображення генератора

На осцилографі ви повинні отримати сигнал, подібний до зображеного на рисунку 4.4.

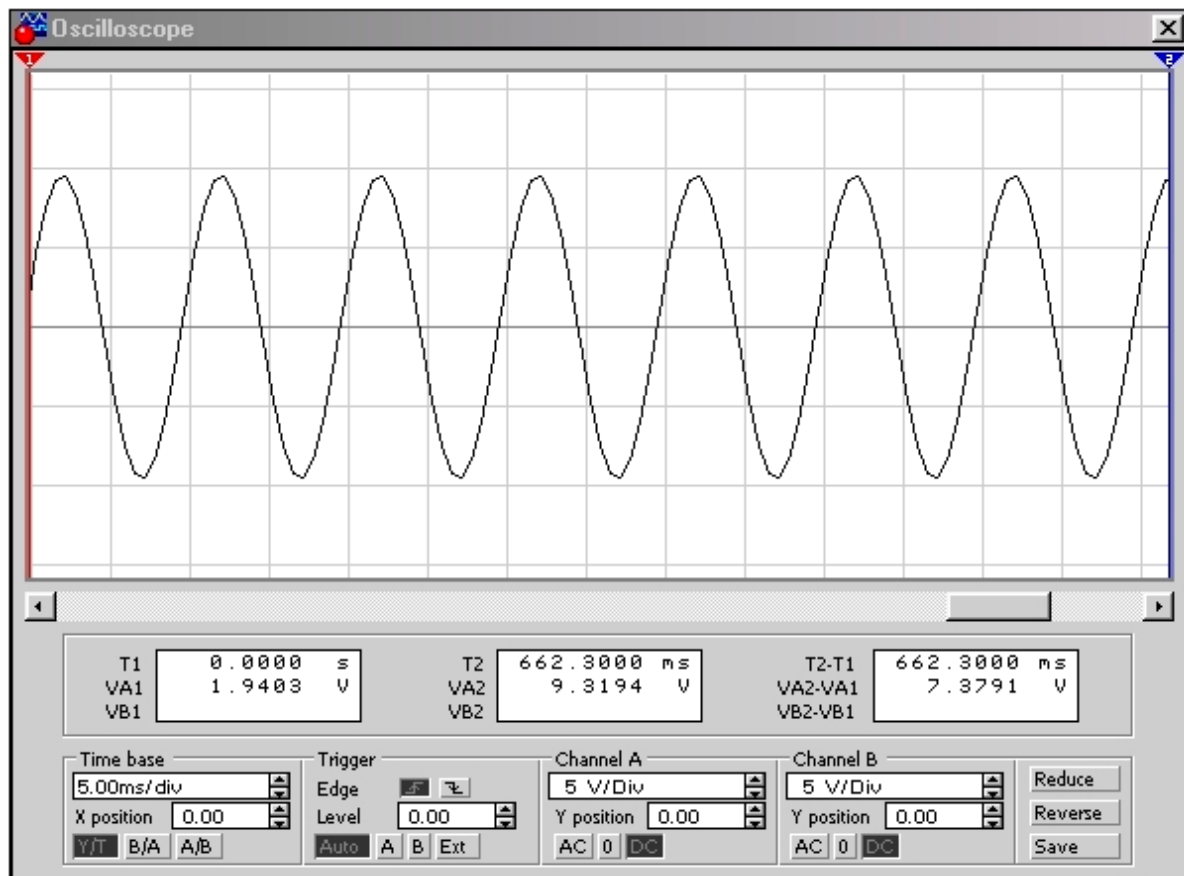


Рисунок 4.4 - Результат моделювання на екрані осцилографа

Контрольні запитання

1. Що таке підсхема і як її створити?
2. Якими командами можна змінити графічне зображення компонента, наприклад, конденсатора змінної ємності?
3. Яким чином можна створити бібліотеку моделей компонентів, яка складається з вітчизняних комплектуючих?
4. Якою командою задаються параметри контрольно-вимірювальних приладів?

4.2 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

Лабораторна робота №2.

Тема. Дослідження напівпровідникових діодів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.








Мета роботи: вивчення принципів дії та основних властивостей напівпровідникових діодів, стабілітронів; дослідження їх вольт-амперних характеристик, ознайомлення з основними параметрами та практичним використанням.

Теоретичні відомості

Розділ “Diodes” (рис. 4.5) містить напівпровідникові діоди, стабілітрони, світлодіоди, тиристори або диністори, симетричний диністор або діак, симетричний триністор або триак, випрямний міст.



Рисунок 4.5 - Зовнішній вигляд меню Diodes

-  – напівпровідникові діоди;
-  – стабілітрони;
-  – світлодіоди;
-  – випрямний міст;
-  – діод Шоклі;
-  – тиристори або диністори;
-  – симетричний диністор або діак;
-  – симетричний триністор або триак.

Розглянемо властивості діода, які користувач може задавати самостійно. Для цього потрібно курсор навести на діод та натиснути два рази лівою кнопкою мишки, після чого в діалоговому вікні “Diode Properties” вибрати потрібний діод на закладці “Models”. Якщо потрібно

змінити параметри, то натисніть кнопку „Edit”. У діалоговому вікні, яке складається із двох однакових на зовнішній вигляд закладок (перша із них показана на рис. 4.6, друга показана на рис. 4.7), потрібно задати такі параметри діода:

Parameter	Value	Unit
Saturation current (IS):	1e-14	A
Ohmic resistance (RS):	0	Ω
Zero-bias junction capacitance (CJO):	0	F
Junction potential (VJ):	1	V
Transit time (TT):	0	s
Grading coefficient (M):	0.5	
Reverse breakdown voltage (BV):	1e+30	V
Emission coefficient (N):	1	
Activation energy (EG):	1.11	eV
Temperature exponent for effect on IS (XTI):	3	

Buttons: OK, Отмена

Рисунок 4.6 - Зовнішній вигляд меню для встановлення параметрів діода

Flicker noise coefficient (KF):	0	
Flicker noise exponent (AF):	1	
Coefficient for forward-bias depletion capacitance formula (FC):	0.5	
Current at reverse breakdown voltage (IBV):	0.001	A
Parameter measurement temperature (TNOM):	27	$^{\circ}\text{C}$

Buttons: OK, Отмена

Рисунок 4.7 - Зовнішній вигляд меню для встановлення додаткових параметрів діода

I_S – зворотний струм діода, А;
 R_S – об'ємний опір, Ом;
 C_{JO} – бар'єрна ємність р-п переходу при нульовій напрузі, Ф;
 V_J – контактна різниця потенціалів, В;
 T_T – час переносу заряду, с;
 M – конструктивний параметр р-п переходу;
 BV – напруга пробою, (для стабілітронів замість цього параметра використовується параметр V_{ZT} – напруга стабілізації) В;
 N – коефіцієнт інжекції;
 E_G – ширина забороненої зони, еВ;
 X_{TI} – температурний коефіцієнт струму насичення;
 K_F – коефіцієнт фліккер-шуму;
 A_F – показник степеня в формулі для фліккер-шуму;
 F_C – коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямозмщеного переходу;
 I_{BV} – початковий струм пробою при напрузі BV , А; для стабілітронів замість цього параметра використовується параметр I_{ZT} – початковий струм стабілізації;
 T_{NOM} – температура діода, °С.

Еквівалентні схеми діода показані на рис. 4.8 а, б, на яких позначено: А – анод, К – катод, I – джерело струму, R_s – об'ємний опір, С – ємність переходу, G_{min} – провідність, обумовлена зворотним струмом переходу.

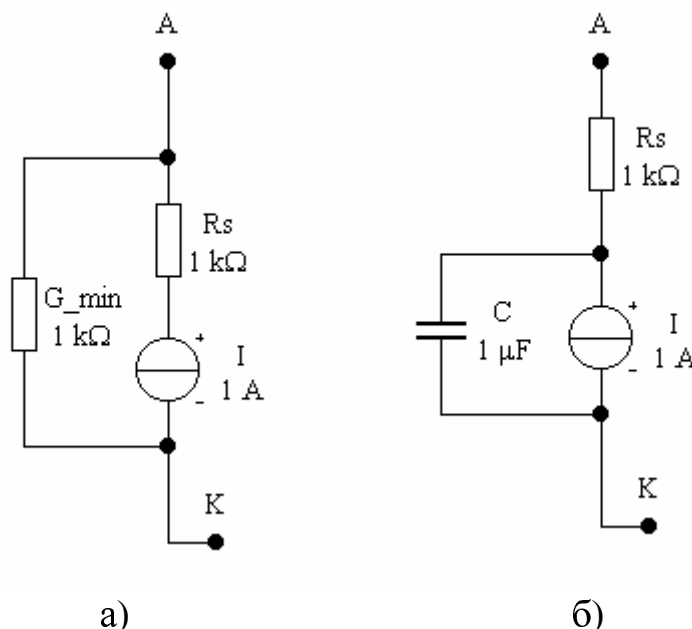


Рисунок 4.8 - Еквівалентні схеми діода

Вольт-амперна характеристика діода визначається такими виразами:

для прямої гілки

$$I = I_0[\exp(U/(N \cdot U_t)) - 1] + U \cdot G_{\min} \quad \text{для } U \geq 0; \quad (4.1)$$

для зворотної гілки

$$I = I_0[\exp(U/(N \cdot U_t)) - 1] + U \cdot G_{\min} \quad \text{для } -5NU_t \leq U \leq 0; \quad (4.2)$$

$$I = -I_0 + U \cdot G_{\min} \quad \text{для } -BV < U < -5N \cdot U_t; \quad (4.3)$$

$$I = -IBV \quad \text{для } U = -BV; \quad (4.4)$$

$$I = I_0 \{ \exp[-(U + BV)/(N \cdot U_t)] - 1 + BV/U_t \} \quad \text{для } U < -BV. \quad (4.5)$$

де $I_0=I_s$ – зворотний струм діода при температурі $T_{\text{ном}}$;

N – коефіцієнт інжекції;

BV, IBV – напруга і струм пробою;

U_t –температурний потенціал переходу;

U – напруга на діоді.

При проведенні розрахунку перехідних процесів використовується еквівалентна схема діода (рис. 4.8, б), для якої ємність переходу визначається за допомогою виразів:

$$C = \tau(dI/dU) + CJO(1 - U/U_t)^{-m} \quad \text{для } U < FC \cdot VJ; \quad (4.6)$$

$$C = \tau(dI/dU) + CJO(F3 - mU/U_t)/F2 \quad \text{для } U \geq FC \cdot VJ, \quad (4.7)$$

де $F2 = (1 - FC)^{1+m}$;

$F3 = 1 - FC(1 - m)$.

В даних формулах τ – час переносу заряду; CJO – бар'єрна ємність при нульовому зміщенні на переході; VJ – контактна різниця потенціалів; $m = 0,33 \dots 0,5$ – параметр переходу.

Дослідження прямої гілки ВАХ діода може бути проведено за допомогою схеми рис. 4.9.

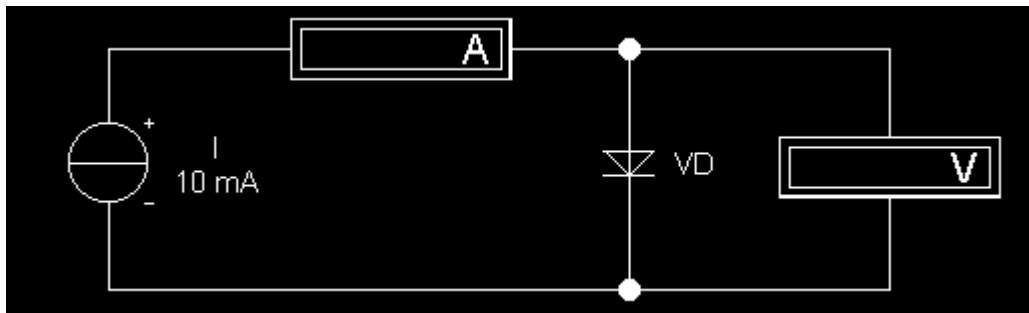


Рисунок 4.9 - Дослідження прямої гілки ВАХ діода

Вона складається із джерела струму I , амперметра A (можна обійтись і без нього, оскільки струм в амперметрі дорівнює заданому), досліджуваного діода VD і вольтметра V для вимірювання напруги на діоді.

Для дослідження зворотної гілки ВАХ діода використовується схема, зображена на рис. 4.10.

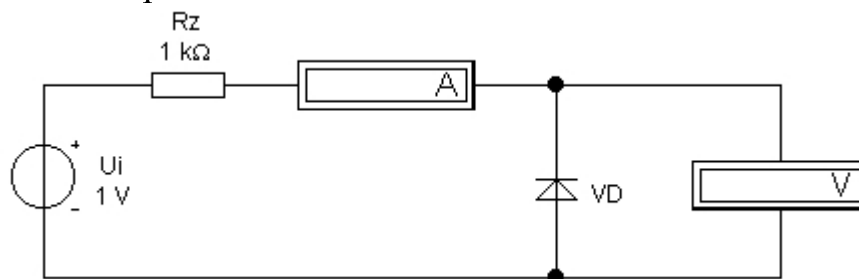


Рисунок 4.10 - Дослідження зворотної гілки ВАХ діода

В ній замість джерела струму використовується U_i із запобіжним резистором R_z для обмеження струму через діод в разі його пробую.

Крім окремих діодів, в бібліотеці EWB є також діодний міст, для якого можна додатково задавати коефіцієнт емісії N (Emission Coefficient).

Світлодіод - спеціально сконструйований діод, в якому передбачена можливість виводу світлового випромінювання із області переходу крізь прозоре вікно в корпусі.

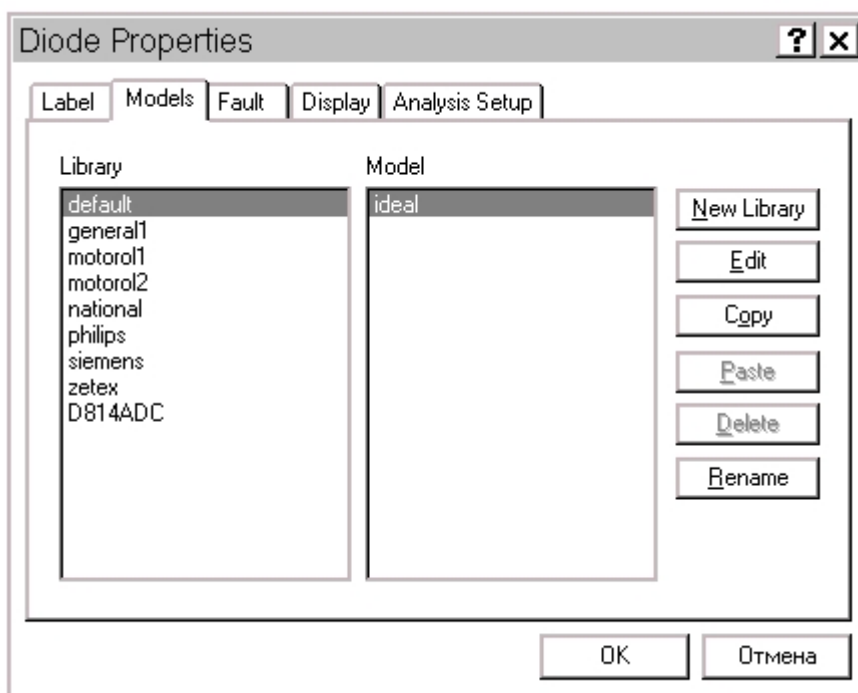


Рисунок 4.11 – Вибір типу діода

При проходженні через діод струму в областях напівпровідника, що прилягають до переходу, відбувається інтенсивна рекомбінація носіїв зарядів – електронів та дірок. Частина вивільнюваної енергії виділяється у

вигляді квантів світла. Залежно від ширини забороненої зони напівпровідника випромінювання може мати довжину хвилі або в області видимого оком світла, або невидимого інфрачервоного випромінювання. Випромінювання переходів на основі арсеніду галію має довжину хвилі близько 0,8 мкм. Переходи із карбіду кремнію чи фосфіду галію випромінюють видиме світло в діапазоні від червоного до голубого кольору.

The screenshot shows a dialog box titled "Diode Model 'D814ADC'" with two tabs: "Sheet 1" and "Sheet 2". The "Sheet 1" tab is active. The dialog contains the following parameters and values:

Saturation current (IS):	3.92e-09	A
Ohmic resistance (RS):	1.25	Ω
Zero-bias junction capacitance (CJO):	41.15	F
Junction potential (VJ):	0.73	V
Transit time (TT):	49.11	s
Grading coefficient (M):	0.41	
Reverse breakdown voltage (BV):	0.5	V
Emission coefficient (N):	1.19	
Activation energy (EG):	1.11	eV
Temperature exponent for effect on IS (XTI):	3	

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Отмена".

Рисунок 4.12 – Визначення параметрів діода

The screenshot shows the same dialog box "Diode Model 'D814ADC'" with the "Sheet 2" tab active. The dialog contains the following parameters and values:

Flicker noise coefficient (KF):	0	
Flicker noise exponent (AF):	1	
Coefficient for forward-bias depletion capacitance formula (FC):	0.5	
Current at reverse breakdown voltage (IBV):	0.001	A
Parameter measurement temperature (TNOM):	27	°C

At the bottom of the dialog are two buttons: "OK" and "Отмена".

Рисунок 4.13 – Додаткові параметри діода

Важливими параметрами світлодіода є: яскравість, (вимірюється в нітах при визначеному значенні прямого струму), колір світіння (спектральний склад випромінювання).

Для світлодіода додатково вказується мінімальний струм в прямому напрямі „Turn-on current!” (Ion), при перевищенні якого світлодіод починає випромінювати. Для вимірювання ВАХ світлодіодів можна використовувати наведені вище схеми.

На рис. 4.11 - 4.13 наведений приклад створення моделей вітчизняних діодів: D814AD ($I_s=3.92E-12$; $R_S=1.25$; $C_{JO}=41.15$; $V_j=0.73$; $T_T=49.11$; $M=0.41$; $BV=8E+30$; $N=1.19$; $EG=1.11$; $X_{ti}=3$; $FC=0.5$; $IBV=0.5$).

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.

2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

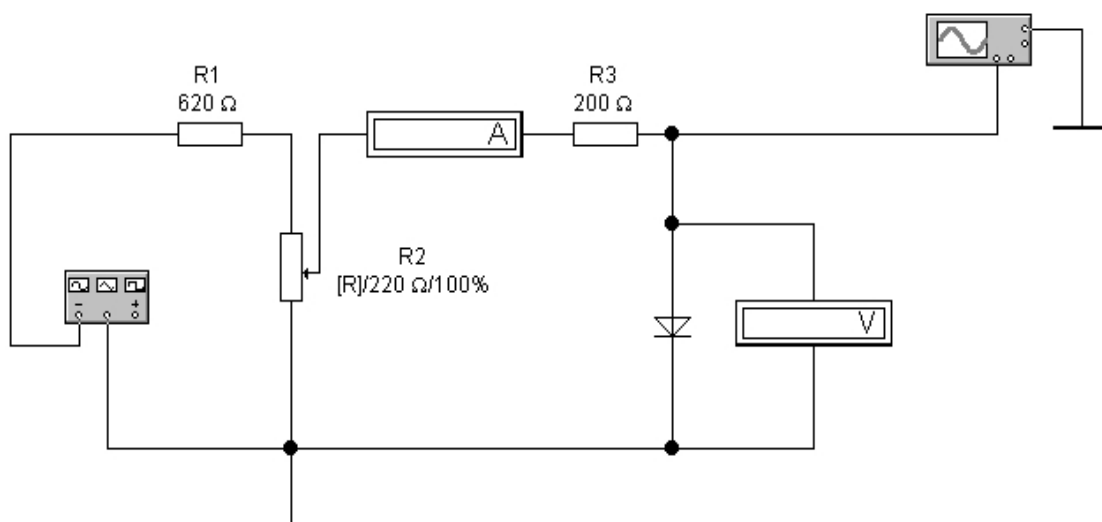


Рисунок 4.14 – Схема для визначення прямої гілки ВАХ діода

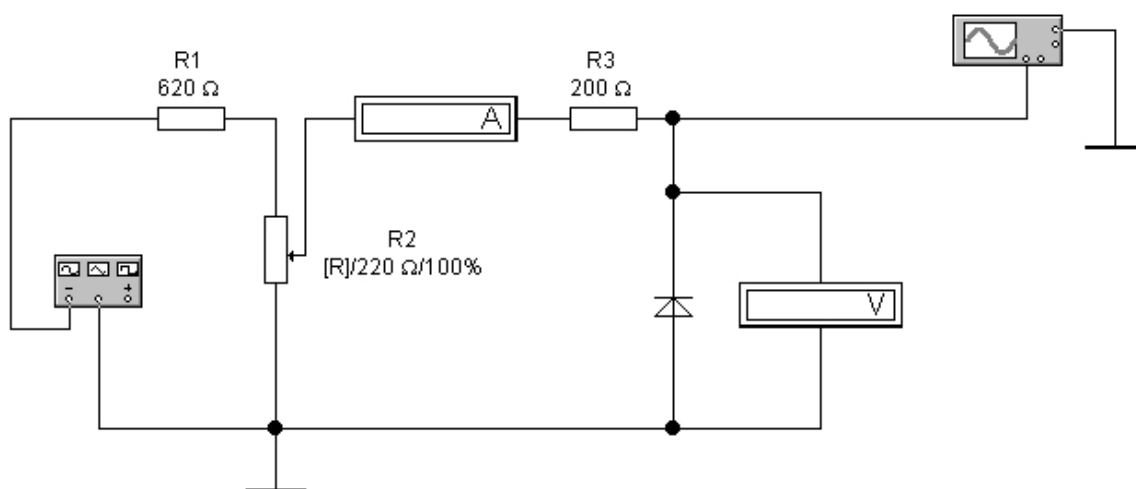


Рисунок 4.15– Схема для визначення зворотної гілки ВАХ діода

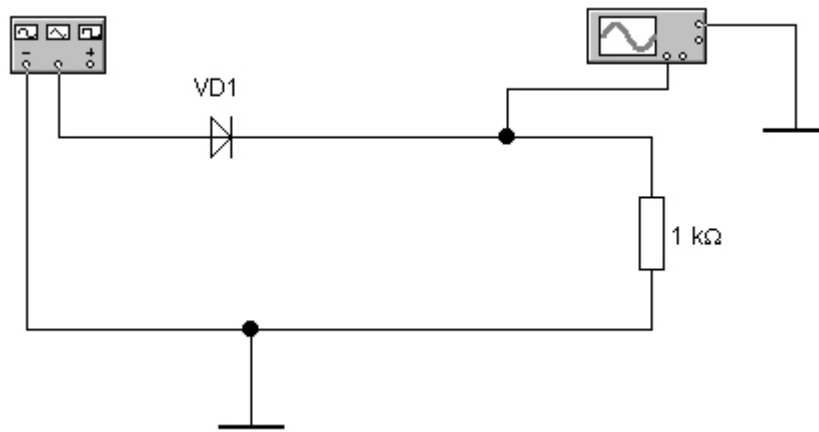


Рисунок 4.16 – Пряме ввімкнення діода

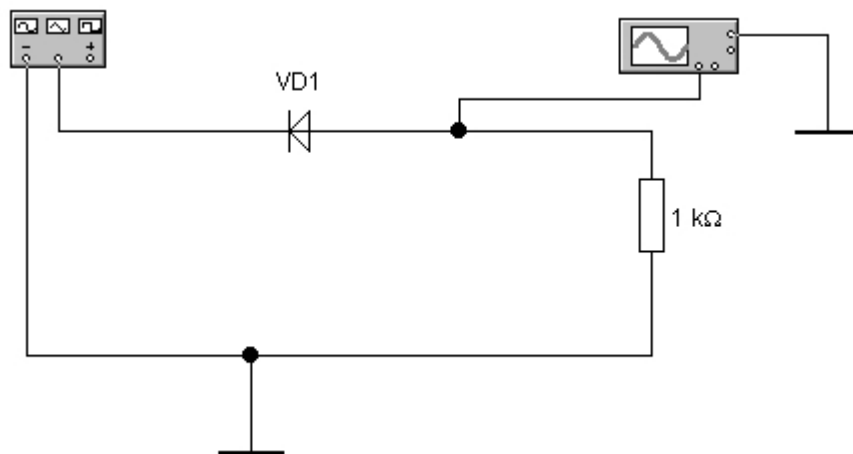


Рисунок 4.17 – Зворотнє ввімкнення діода

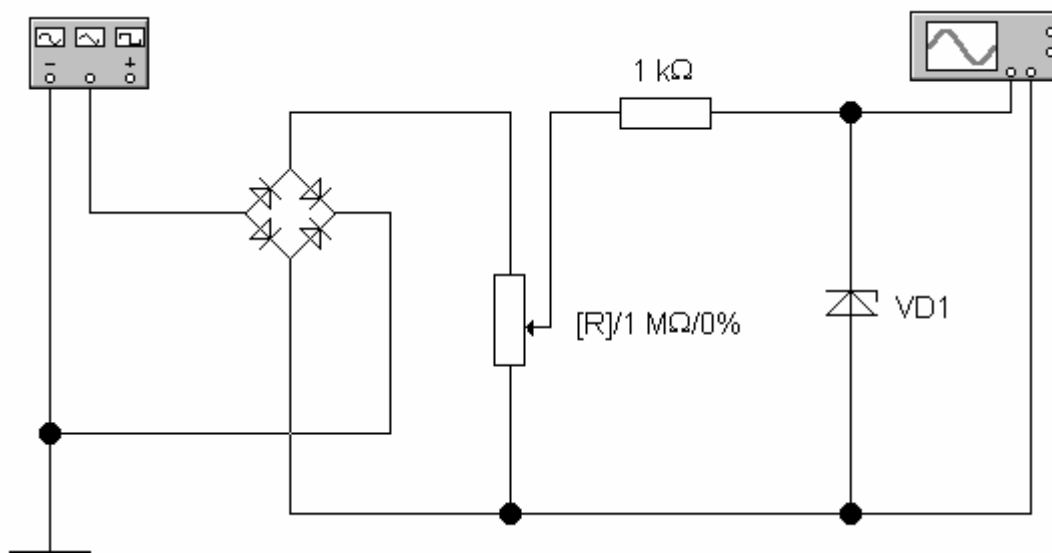


Рисунок 4.18 – Схема для дослідження стабілітрона

3. Розгляньте схеми на рис. 4.14 – 4.18 і послідовно виконайте їх моделювання. Визначить ВАХ діода. Тип діода вибирається відповідно до варіантів завдання, запропонованого викладачем, табл.4.1:

Таблиця 4.1

Номер варіанта	Тип діода
1	Д220
2	P1N1200C
3	KC147A
4	BA315
5	KC168

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольні-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

5. Як побудований напівпровідниковий діод?
6. Які типи р-n переходів Ви знаєте ?
7. Перелічіть складові ємності р-n переходу.
8. Назвіть і коротко охарактеризуйте типи напівпровідникових діодів.

4.3 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ТИРИСТОРІВ

Лабораторна робота №3.

Тема. Дослідження тиристорів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: вивчення принципу дії та властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням тиристорів.

Теоретичні відомості

Перемикальні діоди із р-n-p-n- чи n-p-n-p-структурами - це тиристори. Тиристори, що мають виводи тільки від крайніх електродів, називають диністорами, а прилади з додатковим третім виводом (від одного з середніх переходів) - триністорами. Крім того, до класу тиристорів відносяться симетричні диністори (діаки), симетричні триністори (тріаки) і досить рідкий тип диністора — діод Шоклі, у якому структура n-p-n-p організована за рахунок наявності в р-n-переходу пасток, сформованих шляхом легування. На рис. 4.19 наведені позначення перемикальних діодів, моделі яких є в комплексі EWB 4.1:





-  діод Шоклі;
-  тиристори або диністори;
-  симетричний диністор або діак;
-  симетричний триністор або тріак.

Рисунок 4.19 - Перемикальні діоди

Для перемикальних діодів можна задати значення таких параметрів (для EWB 5.0 їхні позначення вказуються в квадратних дужках):

IS - зворотний струм диністора, А;

VS - напруга, при якій диністор перемикається у відкритий стан, В;

CJO - бар'єрна ємність диністора при нульовій напрузі на переході, Ф.

Перелічені параметри можна задати за допомогою діалогових вікон, аналогічних наведеним на рис. 4.20 для триністора.

IDRM - зворотний струм триністора, А;

VDRM - напруга, при якій триністор перемикається у відкритий стан за нульової напруги на керувальному електроді, В;

VTM - спад напруги у відкритому стані, В;

ITM - струм у відкритому стані, А;

TG - час перемикання до закритого стану, с;

DV/DT - допустима швидкість зміни напруги на аноді триністора, при якому він продовжує залишатися в закритому стані (при більшій швидкості триністор відкривається), В/мкс;

IH - мінімальний струм у відкритому стані (якщо він менше встановленого, то прилад переходить до закритого стану), А;

VGT - напруга на керувальному електроді відкритого триністора, В;

IGT - струм керувального електрода, А;

VD - напруга, що відмикає, на керувальному електроді, В.

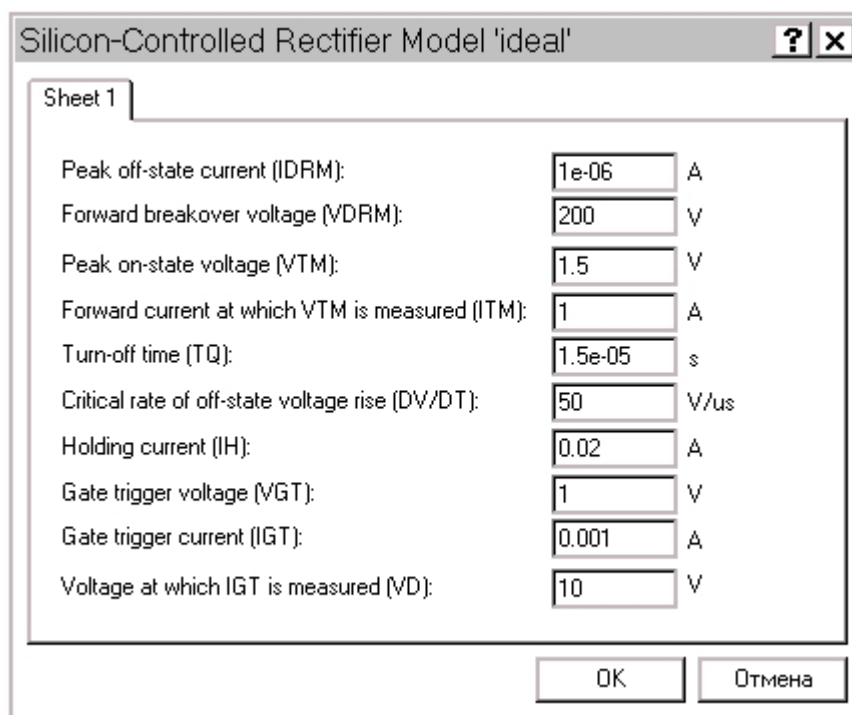


Рисунок 4.20 - Діалогове вікно установки параметрів тиристора

Дослідження прямої гілки ВАХ тиристора можна проводити з використанням схеми, поданої на рис. 4.21, де показано джерела вхідної напруги U_i і напруги керування U_y із захисними резисторами R_{zt} , R_{zy} .

Вимірювання ВАХ здійснюється при зміні U_i від нуля до +50 В при фіксованому значенні U_y , наприклад, у трьох точках $0.5V_d$, V_d і $1.5V_d$. При дослідженні зворотної гілки ВАХ змінюється тільки полярність U_i .

Слід відзначити, що зняття ВАХ перемикальних діодів може бути здійснене в режимі фіксованих струмів у силовому і керувальному колах, тобто за допомогою схем, наведених на рис. 4.22 і 4.23.

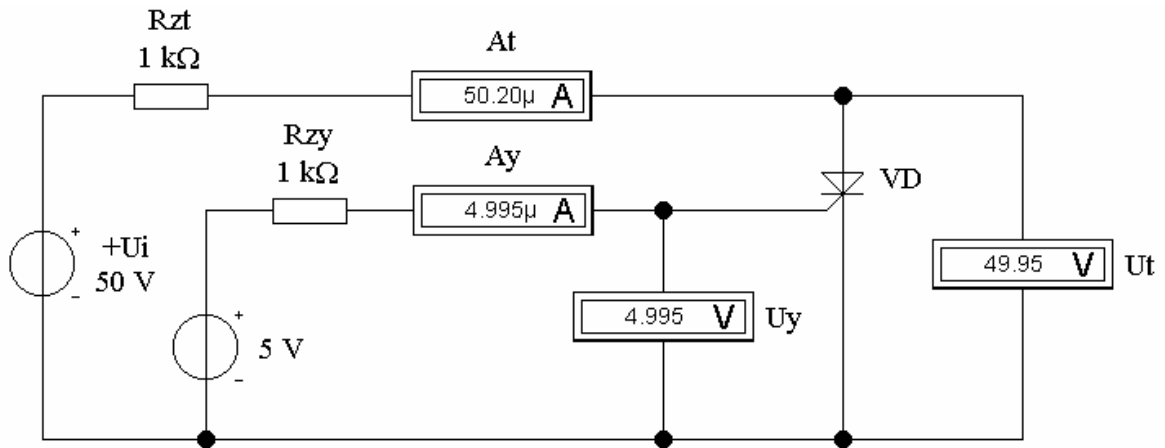


Рисунок 4.21 - Схема дослідження тиристора

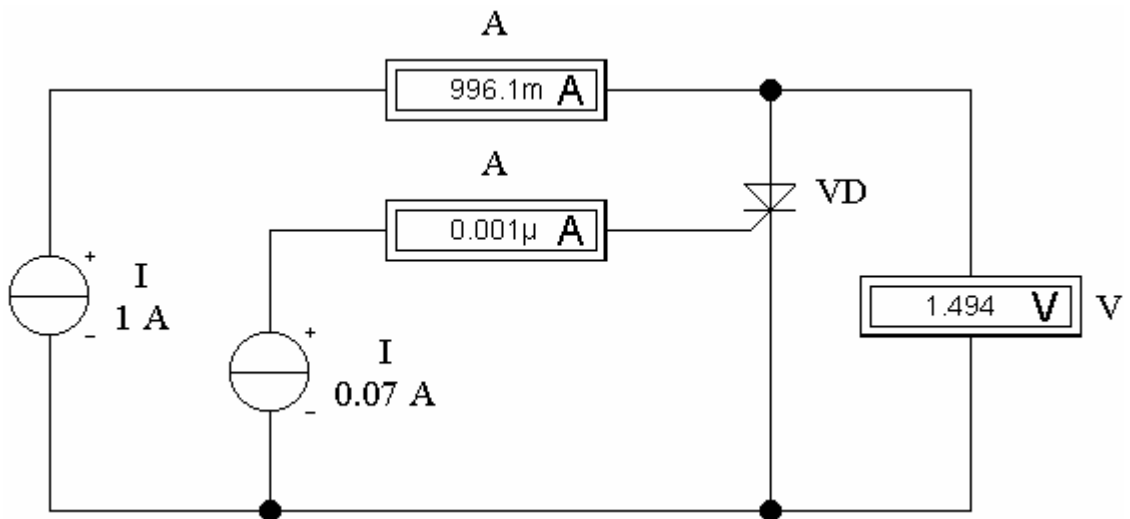


Рисунок 4.22 - Схема для побудови прямої гілки ВАХ тиристора в режимі фіксованих струмів анода

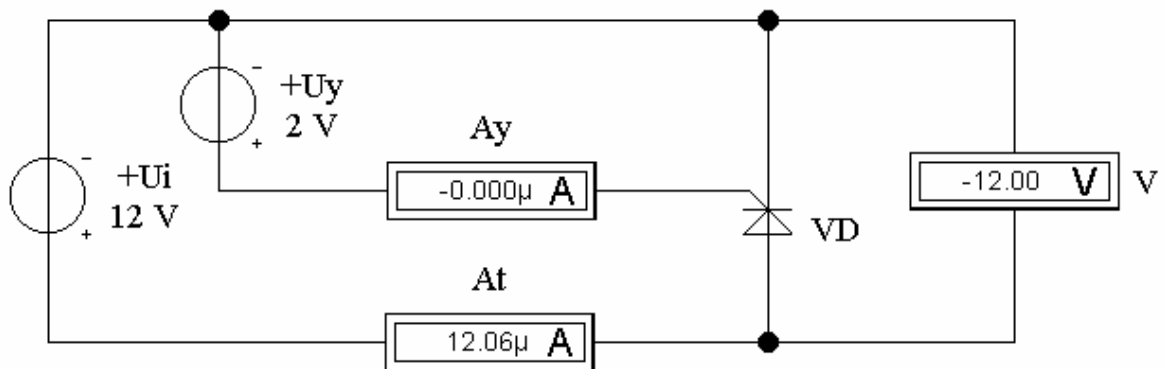


Рисунок 4.23 - Схема для побудови прямої гілки ВАХ тиристора в режимі фіксованих струмів керувального електрода

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.

2. Розгляньте схему на рис. 4.24 і виконайте її моделювання. Визначить ВАХ тиристора та вкажіть межі розташування ділянки негативного диференціального опору. Тип тиристора вибирається відповідно до варіантів завдання, запропонованого викладачем, (наприклад табл.4.2).

Таблиця 4.2

Номер варіанта	Тип тиристора
1	КУ101Г
2	2n2575
3	КУ202
4	2n6397
5	1N57560

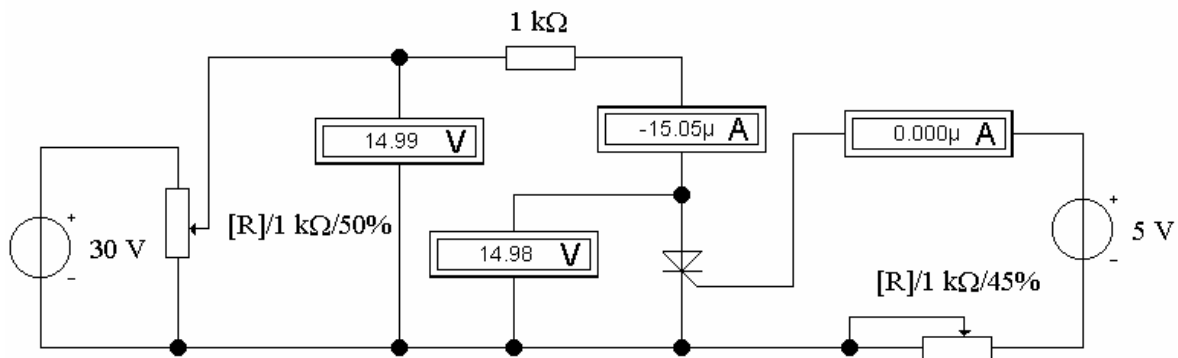


Рисунок 4.24 - Схема для лабораторного дослідження тиристора

3. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку

миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольні-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Тиристри: будова, принципи дії.
2. ВАХ тиристорів.
3. Назвіть типи тиристорів і їх особливості.
4. Які характеристичні параметри мають тиристри?

4.4 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Лабораторна робота №4

Тема. Дослідження біполярних транзисторів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: вивчення принципу дії та властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням біполярних транзисторів.

Теоретичні відомості

Розрізняють три схеми ввімкнення біполярних транзисторів: з загальною базою (ЗБ) (рис.42.5,а), з загальним емітером (ЗЕ) (рис.42.5,б), з загальним колектором (ЗК) (рис.42.5,в).

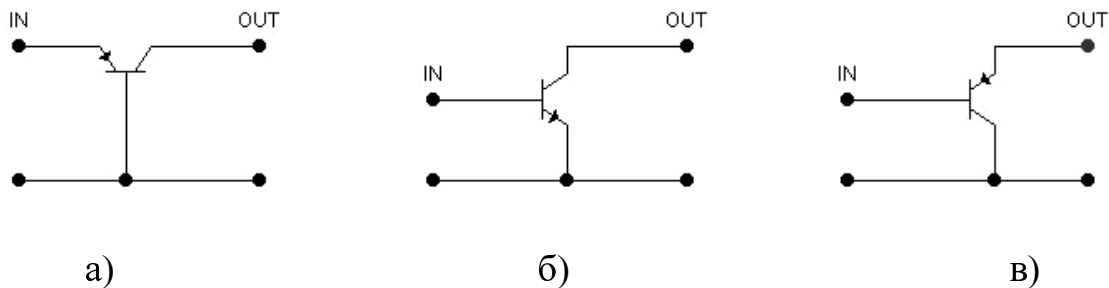


Рисунок 4.25 - Основні схеми ввімкнення транзисторів

У бібліотеку EWB включена досить велика кількість імпортованих біполярних транзисторів. У деяких випадках може виявитися більш зручним і корисним самостійно створити окрему бібліотеку вітчизняних транзисторів, використовуючи команду Model з меню Circuit. В даній бібліотеці подано такі параметри транзисторів (див. рис. 4.26):

IS - зворотний струм колекторного переходу, А;
BF - коефіцієнт підсилення струму в схемі з ЗЕ H_{21} ;
BR - коефіцієнт підсилення струму в схемі з ЗЕ при інверсному ввімкненні транзистора, емітер і колектор міняються місцями;

RB - об'ємний опір бази, Ом;

RE - об'ємний опір емітера, Ом;

RC - об'ємний опір колектора, Ом;

CS - ємність колектор-підкладка, Ф;

CE - ємність емітерного переходу при нульовій напрузі, Ф;

CC - ємність колекторного переходу при нульовій напрузі, Ф.

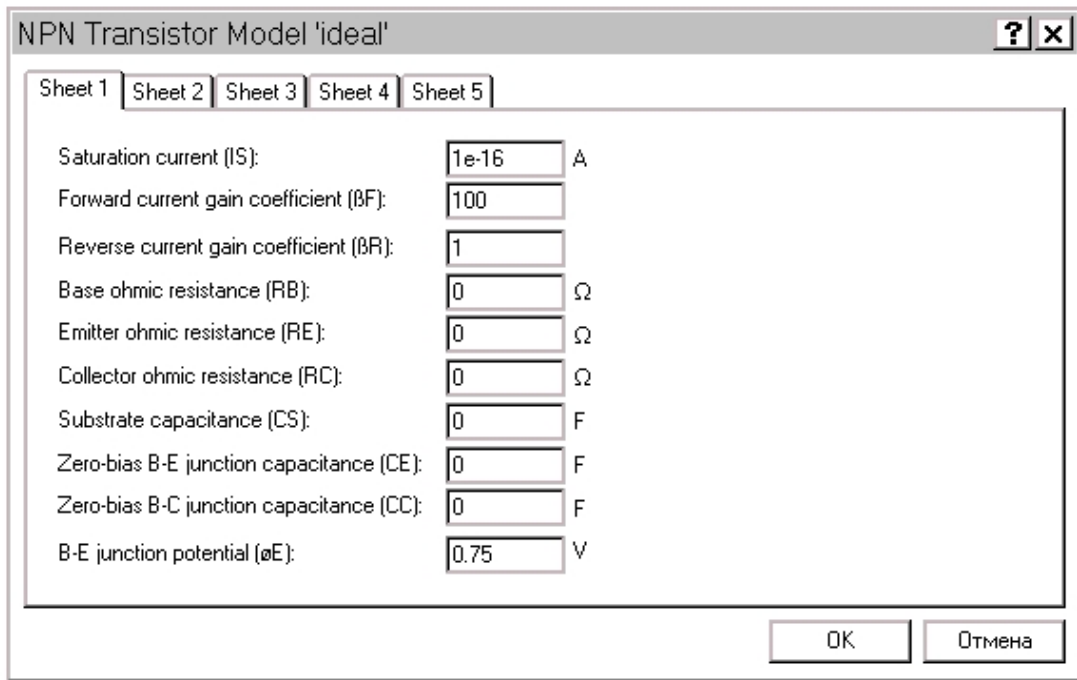


Рисунок 4.26 - Діалогове вікно установки параметрів біполярних транзисторів

Набір параметрів, що задаються, для біполярних транзисторів у EWB 5.0 значно більший, ніж у EWB 4.1 - вони зібрані в п'ятьох вікнах-закладках. Додаткові параметри знаходяться в останніх чотирьох закладках, одна з яких показана на рис. 4.27.

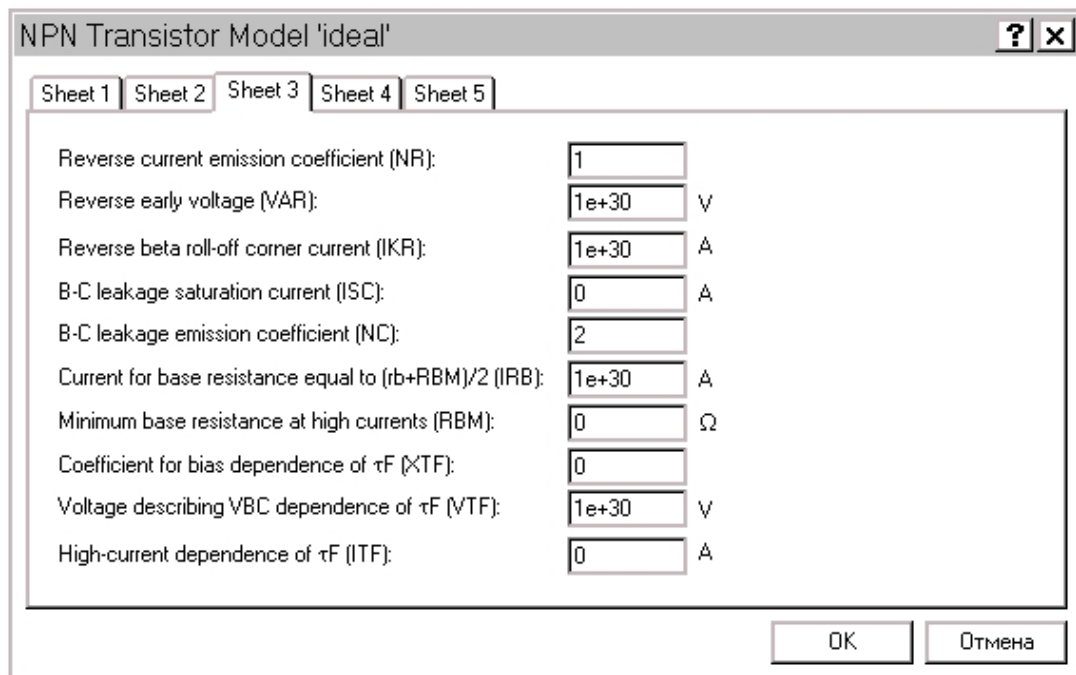


Рисунок 4.27 - Додаткові параметри біполярних транзисторів

Ці параметри мають таке призначення:

- NR - коефіцієнт неідеальності в інверсному режимі;
- VAR – зворотна напруга В;
- IKR – значення струму, при якому розпочинається зменшення коефіцієнта підсилення в інверсному режимі, А;
- ISC – зворотний струм колекторного переходу;
- NC - коефіцієнт неідеальності колекторного переходу;
- IRB - струм бази, при якому опір бази зменшується на 50% від різниці RB-RBM, А;
- RBM - мінімальний опір бази при великих струмах, Ом;
- XTF - коефіцієнт, що визначає залежність часу TF переносу зарядів через базу від напруги колектор-база;
- VTF - напруга колектор-база, при якій починає позначатися її вплив на TF, В;
- ITF - струм колектора, при якому починається позначатися його вплив на TF, А;
- TF - час переносу заряду через базу, с;
- TR - час переносу заряду через базу при інверсному вмиканні, с;
- ME - коефіцієнт плавності емітерного переходу;
- MC - коефіцієнт плавності колекторного переходу;
- VA - напруга Ерлі, близька до параметра $U_{к\max}$, В;
- ISE - зворотний струм емітерного переходу, А;
- IKF - струм спаду посилення за струмом, близький до параметра $I_{к\max}$, А;
- NE - коефіцієнт неідеальності емітерного переходу;
- VJC - контактна різниця потенціалів переходу база-колектор, В;
- VJE - контактна різниця потенціалів переходу база-емітер, В;
- NF - коефіцієнт неідеальності в нормальному режимі;
- PTF - додатковий фазовий зсув на граничній частоті транзистора $F_{гр}=1/(2\pi TF)$, град.;
- VJS - контактна різниця потенціалів переходу колектор-підкладка, В;
- MJS - коефіцієнт плавності переходу колектор-підкладка;
- XCJC - коефіцієнт розщеплення ємності база-колектор;
- FC - коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямозміщених переходів;
- EG - ширина забороненої зони, еВ;
- XTB - температурний коефіцієнт підсилення струму в нормальному й інверсному режимах;
- XTI - температурний коефіцієнт струму насичення;
- KF - коефіцієнт фліккер-шуму;
- AF - показник ступеня у формулі для фліккер-шуму;
- $T_{ном}$ - температура транзистора, °С.

У програмі EWB використовується модель біполярного транзистора Гуммеля-Пуна.

Розглянемо способи вимірювання основних характеристик біполярних транзисторів.

Вольт-амперні характеристики. Більш розповсюдженою і простішою моделлю (у порівнянні з моделлю Гуммеля-Пуна) біполярного транзистора є модель Еберса-Молла. Відповідно до цієї моделі статичні вхідні і вихідні ВАХ транзистора в схемі з ЗБ описуються такими рівняннями:

$$I_e = AI'_{eo} - \alpha CI'_{ko}, \quad (4.8)$$

$$I_k = A\alpha'I'_{eo} - CI'_{ko}, \quad (4.9)$$

де $A = \exp(U_{eb}/U_t) - 1$;

$C = \exp(U_{kb}/U_t) - 1$;

$I'_{eo} = DI_{eo}$; $I'_{ko} = DI_{ko}$;

$D = 1 - \alpha\alpha'$;

I_{eo}, I_{ko} - теплові струми колекторного і емітерного переходів;

α, α' - коефіцієнти передачі струму в схемі з ЗБ для прямого й інверсного вмикання транзистора;

U_{kb}, U_{eb} - напруга на колекторі і емітері відносно бази.

Схема для дослідження вихідних ВАХ транзистора показана на рис. 4.28.

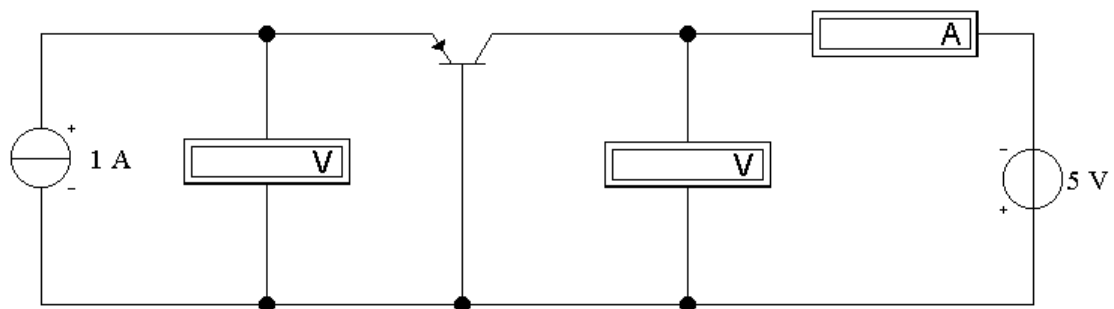


Рисунок 4.28 - Схема для дослідження вихідних ВАХ біполярного транзистора

Дані для побудови сімейства вихідних ВАХ $I_k = f(U_{kb})$ знімаються при фіксованих значеннях I_e шляхом зміни напруги U_{kb} і вимірювання I_k . Сімейство вхідних ВАХ $I_e = f(U_{eb})$ знімаються при фіксованих значеннях U_b шляхом зміни струму I_e і вимірювання U_{eb} .

Модуль коефіцієнта передачі струму $|H_{21\beta}|$ на високій частоті можна визначити за допомогою схеми (рис. 4.29).

Режим за постійним струмом транзистора задають за допомогою джерела струму I_e (5mA), як джерело вхідного синусоїдального сигналу використовується джерело струму I_i (1mA, при вимірюваннях частота варіюється в межах від одиниць до десятків МГц), струм бази I_b і колектора I_k вимірюється амперметрами в режимі АС. Конденсатор C_b - блокувальний (так звана розв'язка на високих частотах). Модуль коефіцієнта передачі струму $|H_{21\beta}|=I_k/I_b$ розраховується за показниками амперметрів. Зокрема, при частоті вхідного сигналу 1 МГц він дорівнює, відповідно до показань амперметрів (див. рис. 4.29), $4954/49,52 \approx 100$.

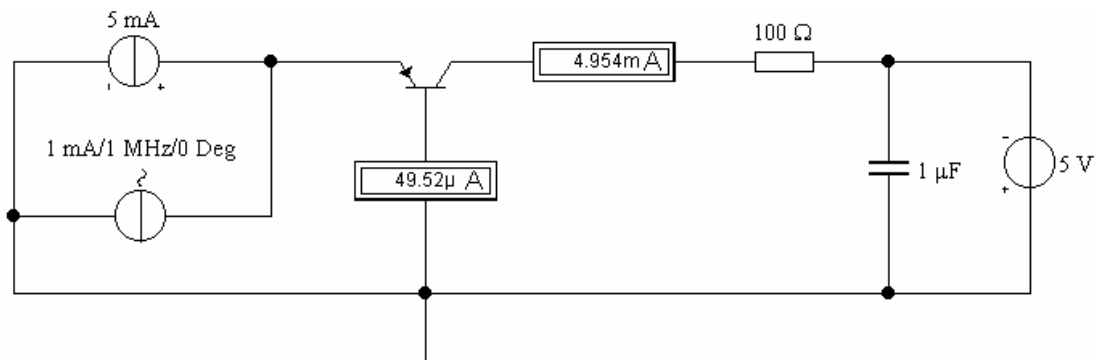


Рисунок 4.29 - Схема для вимірювання коефіцієнта передачі струму на високій частоті

На рисунку 4.30 наведено приклад створення моделей вітчизняних транзисторів:

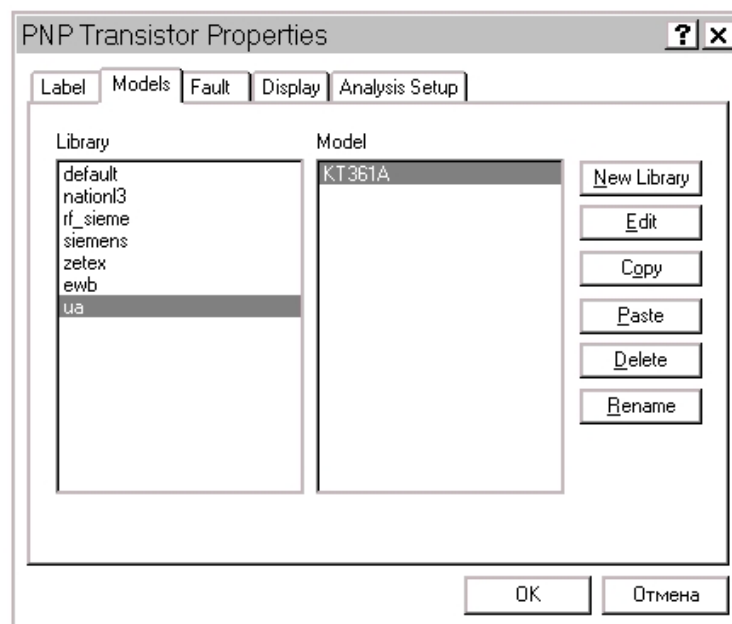


Рисунок 4.30 - Створення моделі транзистора

Model IDEAL NPN : Ідеальний транзистор з іменем IDEAL структури n-p-n.

```
.model KT361A p-n-p (IS=10-6; BF=80; BR=3; RB=10; RE=0,85; RC=5; CS=0; CE=10-11; CC=7·10-12; VJE=0,75; VJC=0,7; TF=10-10; TR=13,05·10-8; ME=0,333; MC=0,333; VA=25; ISE=2,37·10-12; IKF=5·10-2; NE=1,26; NC=1,8; VTF=80; XTF=1,1; IKR=0,02)
```

```
.model KT3102A n-p-n (IS=5·10-8; BF=200; BR=2,71; RB=52; RE=0,6; RC=1,6; CS=0; CE=1,13·10-11; CC=9,92·10-12; VJE=0,69; VJC=0,65; TF=6,12·10-10; TR=5,77·10-8; ME=0,33; MC=0,33; VA=50; ISE=2,82·10-8; IKF=0,1; NE=7,43; NC=2; VTF=80; XTF=2; IKR=0,2)
```

```
.model KT3107A p-n-p (IS=10-7; BF=100; BR=2,7; RB=5,0; RE=0,72; RC=1,65; CS=0; CE=1,13·10-11; CC=10-11; VJE=0,7; VJC=0,6; TF=6,2·10-11; TR=5,8·10-8; ME=0,33; MC=0,33; VA=45; ISE=2,8·10-8; IKF=0,1; NE=7,4; NC=2; VTF=80; XTF=2; IKR=0,25)
```

```
.model KT312A n-p-n (IS=10-5; BF=80; BR=1; RB=300; RE=0,8; RC=0,897; CS=0; CE=2,65·10-11; CC=8·10-12; VJE=0,75; VJC=0,692; TF=1,74·10-9; TR=10-8; ME=0,333; MC=0,29; VA=20; ISE=1,89·10-12; IKF=0,01; NE=1,328; NC=0,5; VTF=17; XTF=1,5; IKR=1,812)
```

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.

2. Розгляньте схеми на рис. 4.31 - 4.33 і виконайте їх моделювання. Для схеми рис.4.31 визначити вхідні ВАХ транзистора з загальним емітером (ЗЕ). Для схеми рис.4.32 визначити вихідні ВАХ транзистора з загальним емітером (ЗЕ). Для схеми рис.4.33 визначити вихідні ВАХ транзистора з загальною базою (ЗБ). Тип біполярного транзистора вибирається відповідно до варіантів завдання, запропонованого викладачем, (наприклад, табл.4.3).

3. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі

потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольно-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Таблиця 4.3

Номер варіанта	Тип транзистора
1	КТ 361 (p-n-p)
2	2N2924 (n-p-n)
3	КТ 3107А (p-n-p)
4	КТ 312А (n-p-n)
5	2N3417 (n-p-n)

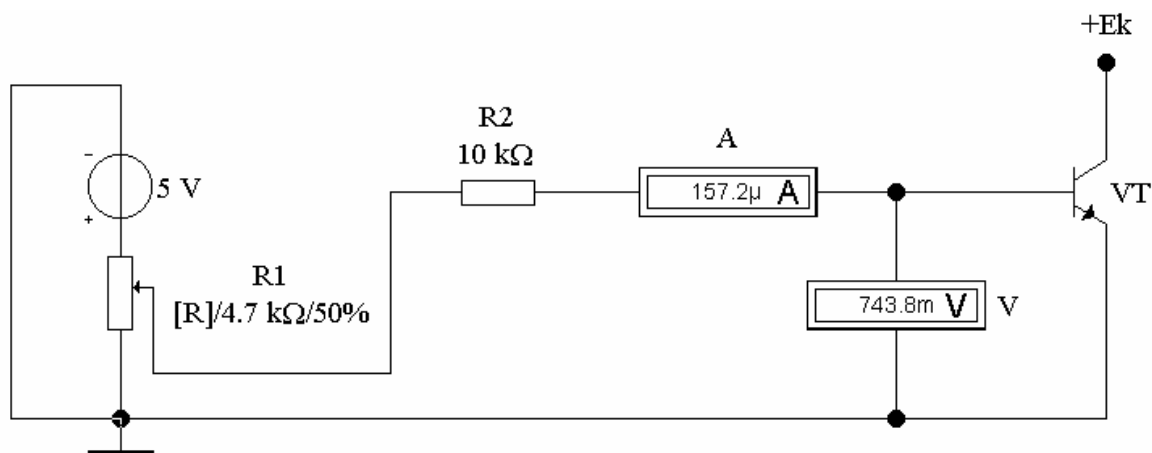


Рисунок 4.31 - Схема для визначення вхідної ВАХ (3E)

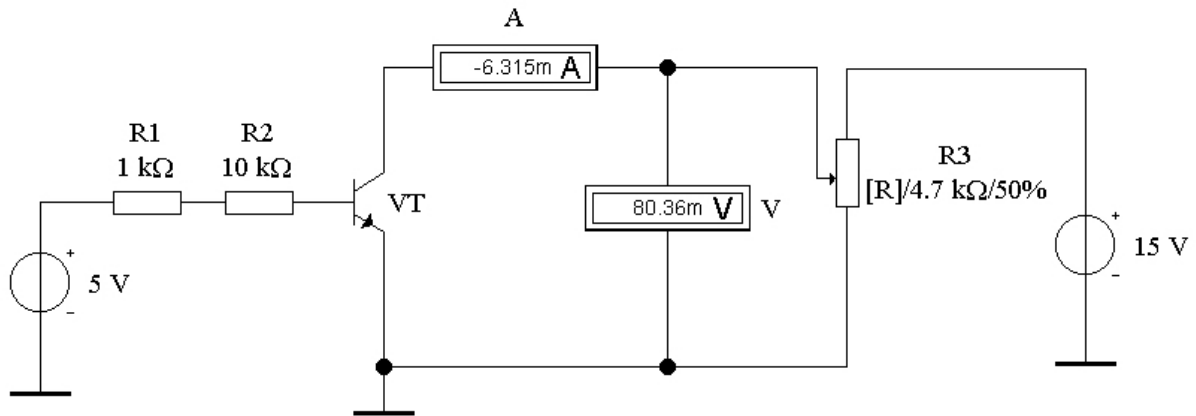


Рисунок 4.32 - Схема для визначення вихідної ВАХ (3Е)

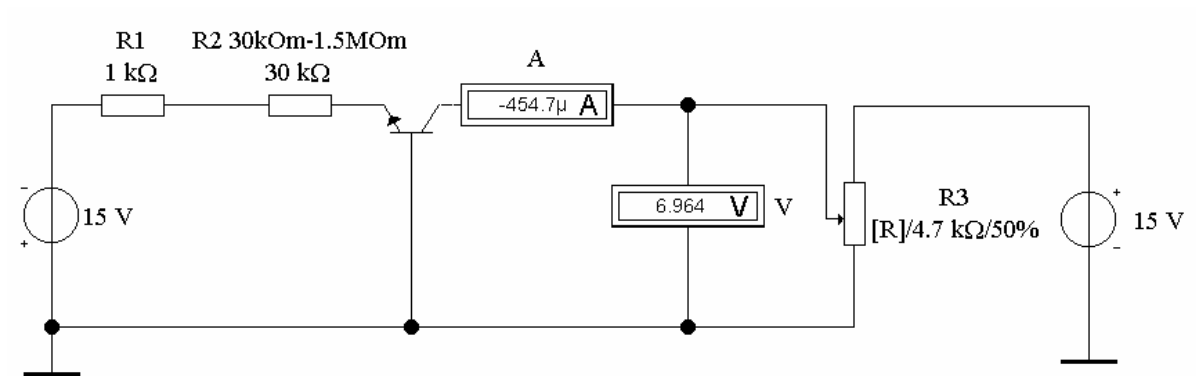


Рисунок 4.33 - Схема для визначення вихідної ВАХ (3Б)

Контрольні запитання

1. Опишіть принцип дії БТ, нарисуйте його схеми ввімкнення.
2. Проаналізуйте статичні входні та вихідні ВАХ.
3. Які три області (режими) роботи має БТ?
4. Чим визначаються частотні властивості БТ?

4.5 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Лабораторна робота №5.

Тема. Дослідження польових транзисторів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: вивчення принципу дії та властивостей, дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням польових транзисторів.

Теоретичні відомості

Початкова назва польових транзисторів - уніполярні транзистори - була пов'язана з тим, що в таких транзисторах використовуються основні носії тільки одного типу (електрони або дірки). Процеси інжекції і дифузії в таких транзисторах практично відсутні, у будь-якому разі, вони не грають принципової ролі. Основним способом руху носіїв є дрейф в електричному полі.

Для того щоб керувати струмом у напівпровіднику при постійному електричному полі потрібно змінювати питому провідність напівпровідникового шару або його площу. На практиці використовуються обидва способи і засновані вони на ефекті поля (керування напругою на затворі). Тому уніполярні транзистори, зазвичай, називають польовими транзисторами. Провідний шар, по якому протікає струм, називають каналом. Звідси ще одна назва такого класу транзисторів – каналні транзистори.

Канали можуть бути приповерхневими й об'ємними. Приповерхневі канали є або збагаченими шарами, обумовленими наявністю донорних домішок у діелектрику, або інверсійними шарами, що утворюються під дією зовнішнього поля. Об'ємні ж канали є ділянками однорідного напівпровідника, відділеними від поверхні збідненим шаром.

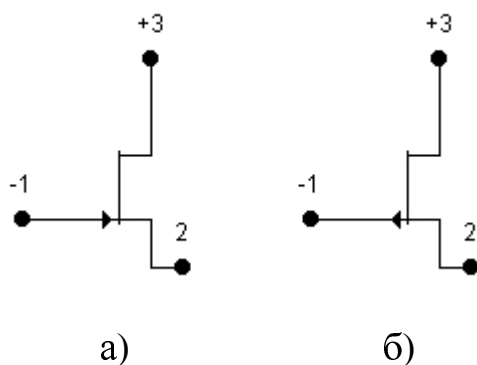


Рисунок 4.34 - Польові *n*-канальні (а) і *p*-канальні (б) транзистори з керувальним *p-n* переходом

Транзистори з об'ємним каналом відрізняються тим, що збіднений шар створюється за допомогою р-n переходу. Тому їх часто називають польовими транзисторами з р-n переходом або просто польовими транзисторами. Транзистори такого типу вперше описані Шоклі в 1952 р. У бібліотеці компонентів програми EWB 4.1 вони подані двома зразками: n-канальним і р-канальним і показані на рис. 4.28 а) і б) відповідно, де 1 — затвор (gate) - керувальний електрод; 2 - витік (source) — електрод, від якого починають рух основні носії (у першому типі — електрони, у другому — дірки); 3 — стік (drain) - електрод, що приймає ці носії.

Параметри моделей польових транзисторів, що задаються за допомогою діалогового вікна (рис. 4.35) перераховані нижче.

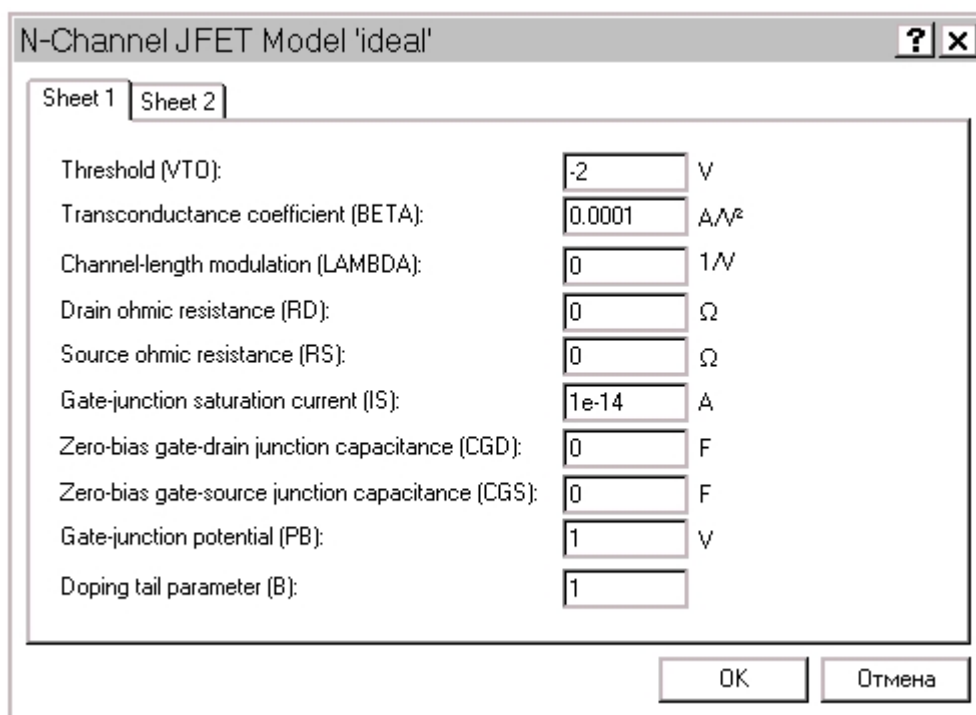


Рисунок 4.35 - Вікно встановлення параметрів польових транзисторів з керувальним р-n переходом

VTO - напруга відсічення, В - це напруга між затвором і витіком польового транзистора з р-n переходом чи з ізольованим затвором, що працюють у режимі збіднення, при якій струм стоку досягає заданого мінімального значення. Для транзисторів з ізольованим затвором, що працюють у режимі збагачення, цей параметр називається граничною напругою.

BETA - коефіцієнт пропорційності, A/V².

LAMBDA - параметр модуляції довжини каналу, 1/V.

RD - об'ємний опір області стоку, Ом.

R_S - об'ємний опір області витoku, Ом.

I_S - струм насичення р-п переходу, тільки для польових транзисторів з р-п переходом, А.

C_{GD} - ємність між затвором і стоком, при нульовому зсуві, Ф.

C_{GS} - ємність між затвором і витоком, при нульовому зсуві, Ф.

P_B - контактна різниця потенціалів р-п переходу, тільки для польових транзисторів з р-п переходом, В.

У програмі EWB 5.0 кількість параметрів для польових транзисторів збільшено.

Відзначимо, що в EWB для польових транзисторів використовуються моделі PSpice.

За аналогією з біполярними транзисторами розрізняють три схеми ввімкнення польових транзисторів із загальним затвором (ЗЗ), із загальним витоком (ЗВ), із загальним стоком (ЗС).

Для дослідження сімейства вихідних ВАХ польового транзистора в схемі ЗВ може бути використана схема, подана на рис. 4.36.

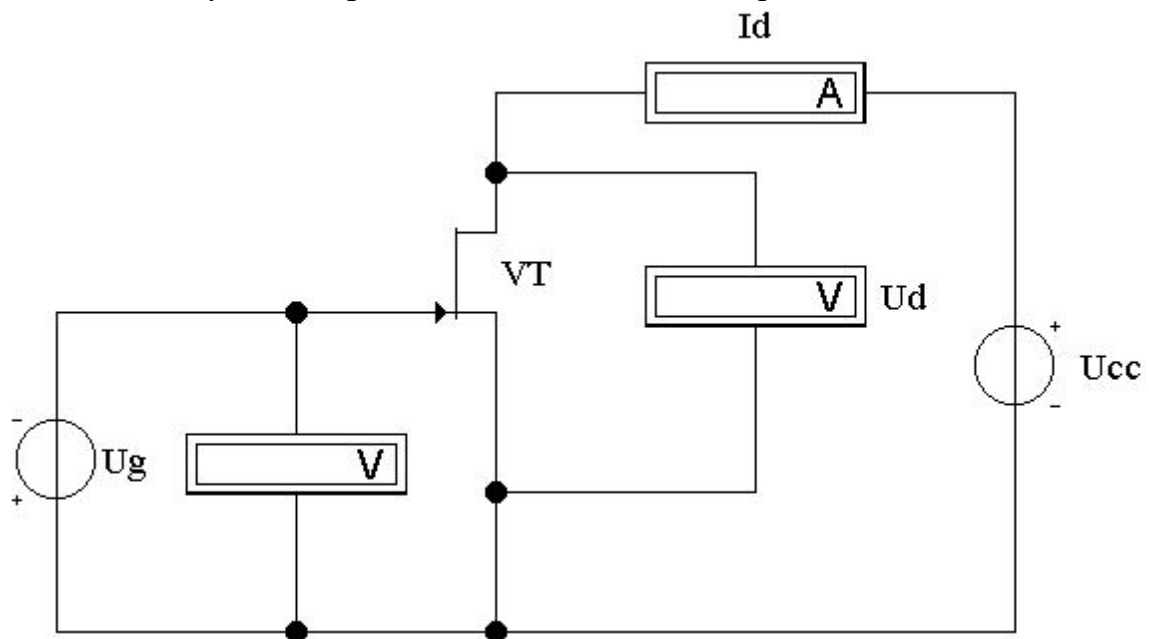


Рисунок 4.36 - Схема для дослідження ВАХ польового транзистора з керувальним р-п переходом

Вона містить джерело напруги затвор-витік U_g , досліджуваний транзистор VT , джерело живлення U_{cc} , вольтметр U_d для контролю напруги стік-джерело й амперметр I_d для вимірювання струму стоку. Вихідна ВАХ знімається при фіксованих значеннях U_g шляхом зміни напруги U_d і вимірювання струму стоку I_d . Напруга U_g , при якій струм I_d має близьке до нуля значення, називається напругою відсічення. Маючи

характеристики $I_d=f(U_d)$ можна визначити крутизну $S=dI_d/dU_d$, що є однією з найважливіших характеристик польового транзистора як підсилювального приладу.

Інший тип польових транзисторів - транзистори з приповерхневим каналом і структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори). В окремому випадку, якщо діелектриком є оксид (двоокис кремнію), то використовується назва МОН-транзистори.

МДН-транзистори бувають двох типів:

- транзистори з вбудованим каналом;
- з індукованим каналом (в останньому випадку канал наводиться під дією напруги, прикладеної до керувального електрода).

У бібліотеці компонентів програми EWB МДН-транзистори з вбудованим каналом подані двома зразками: n-канальним та р-канальним, попарно показаними на рис. 4.37,а, на якому цифрою 4 позначена підкладка, інші позначення аналогічні позначенням на рис. 4.34. Кожен тип МДН-транзисторів подано у двох варіантах: з окремим виводом підкладки, загальним виводом підкладки і витоку. Аналогічний вигляд мають позначення МДН-транзисторів з індукованим каналом (рис. 4.31,б).

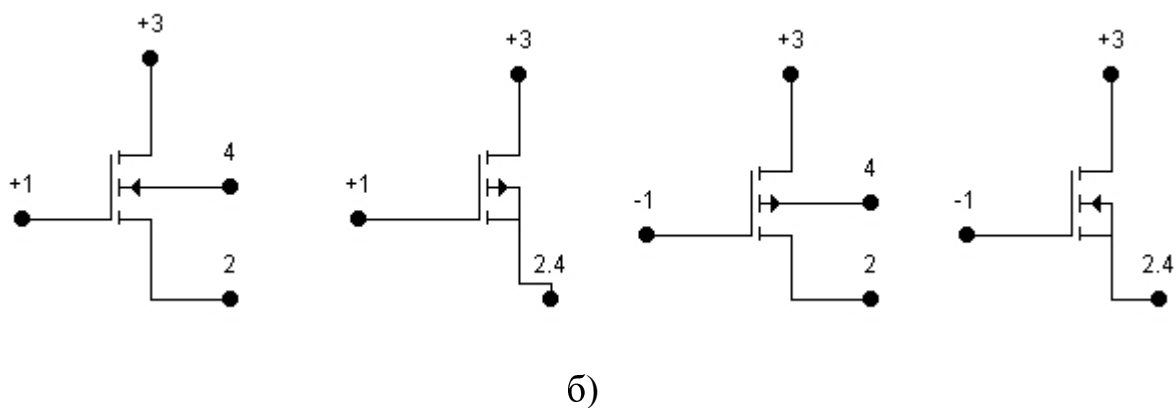
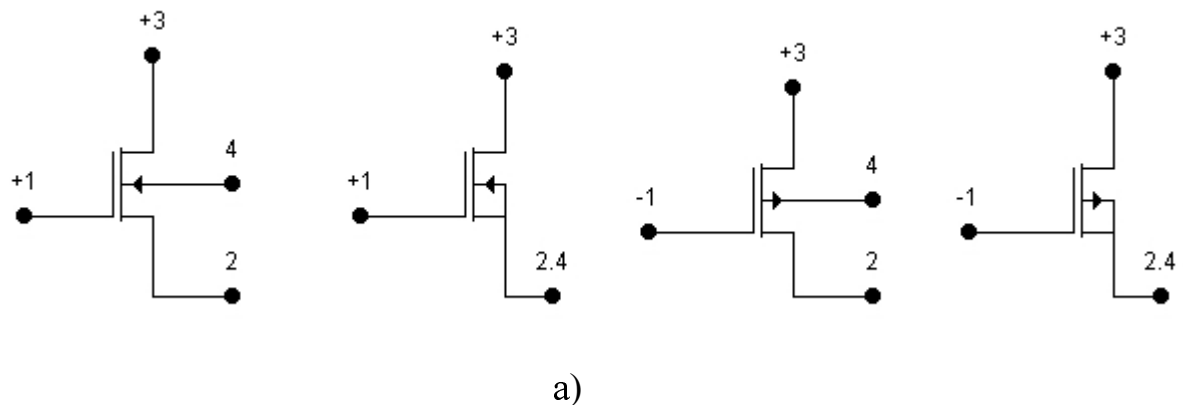


Рисунок 4.37 - МДН-транзистори з вбудованим а) і індукованим б) каналами

Діалогове вікно установки параметрів МДН-транзисторів показано на рис. 4.38 (а-в).

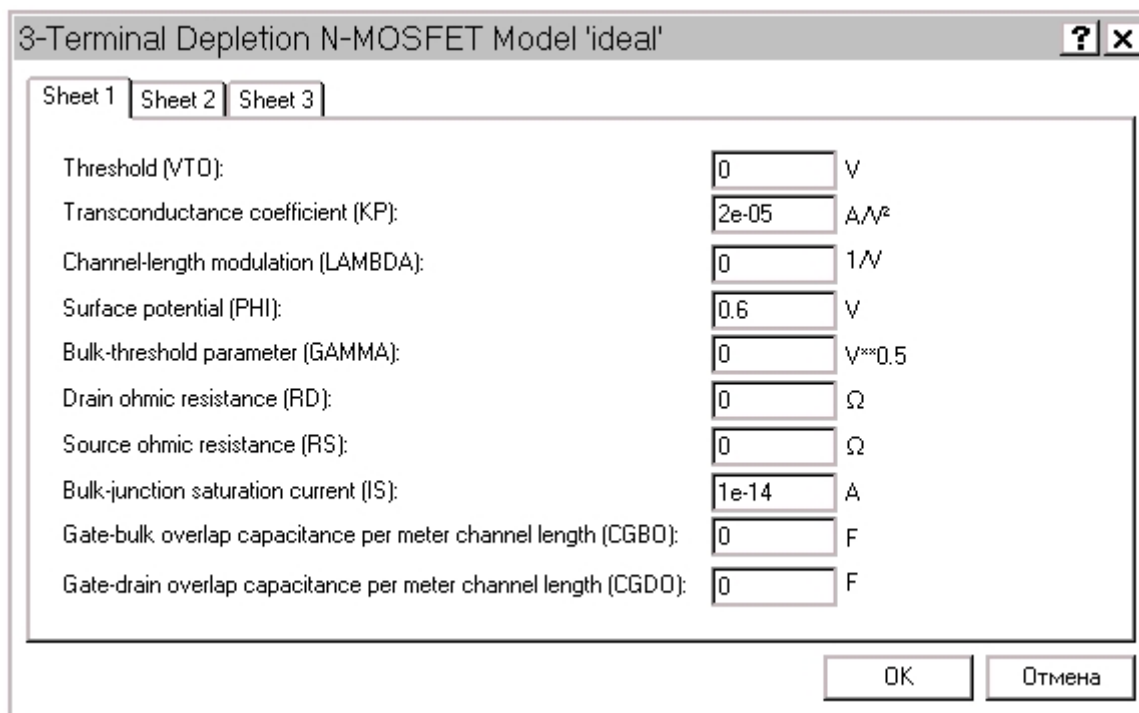


Рисунок 4.38, а) - Діалогове вікно установки параметрів МДН-транзисторів

VTO - напруга відсічення, В.

KP - коефіцієнт пропорційності, А/В².

LAMBDA - параметр модуляції довжини каналу, 1/В.

PHI - поверхневий потенціал, В.

GAMMA - коефіцієнт впливу потенціалу підкладки на граничну напругу, В^{1/2}.

RD - об'ємний опір області стоку, Ом.

RS - об'ємний опір області витoku, Ом.

IS - струм насичення р-п переходу (тільки для польових транзисторів з р-п переходом), А.

CGBO - питома ємність перекриття затвор-підкладка, виникає внаслідок виходу області затвора за межі каналу, Ф.

CGDO - питома ємність перекриття затвор-стік на довжину каналу, виникає за рахунок бічної дифузії, Ф.

CGSO - гранична ємність перекриття затвор, виникає за рахунок бічної дифузії, Ф.

CBD - ємність донної частини переходу стік-підкладка при нульовому зсуві, Ф.

CBS - ємність донної частини переходу джерело-підкладка при нульовому зсуві, Ф.

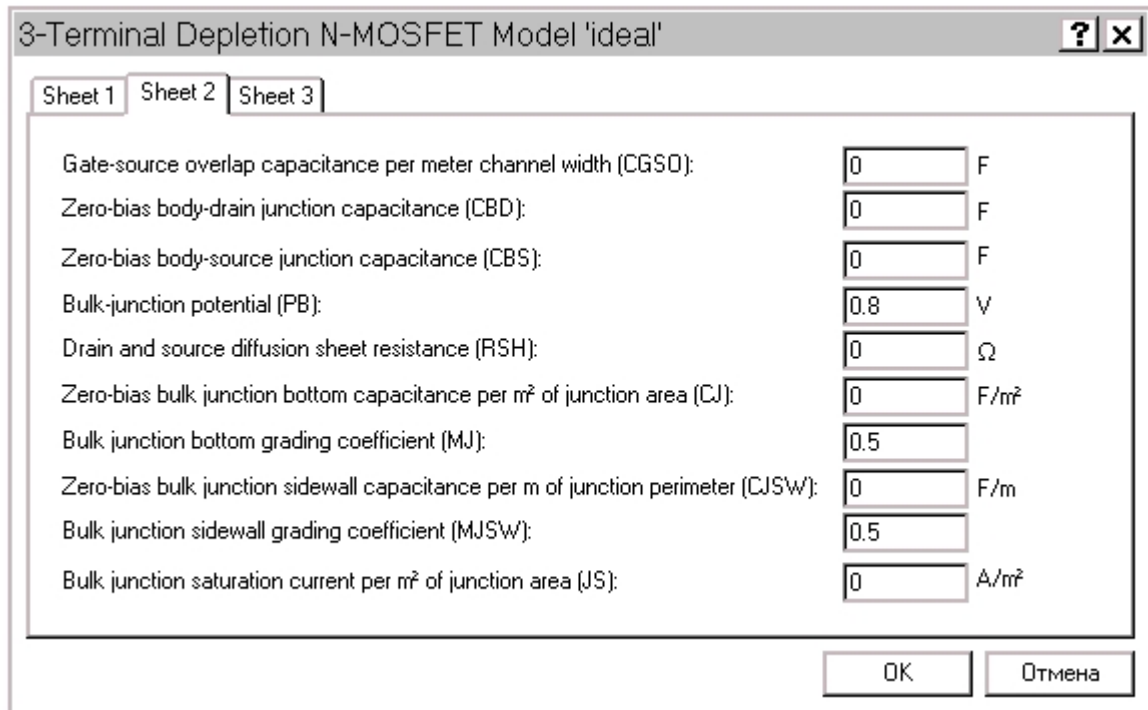


Рисунок 4.38, б) - Діалогове вікно установки параметрів МДН-транзисторів

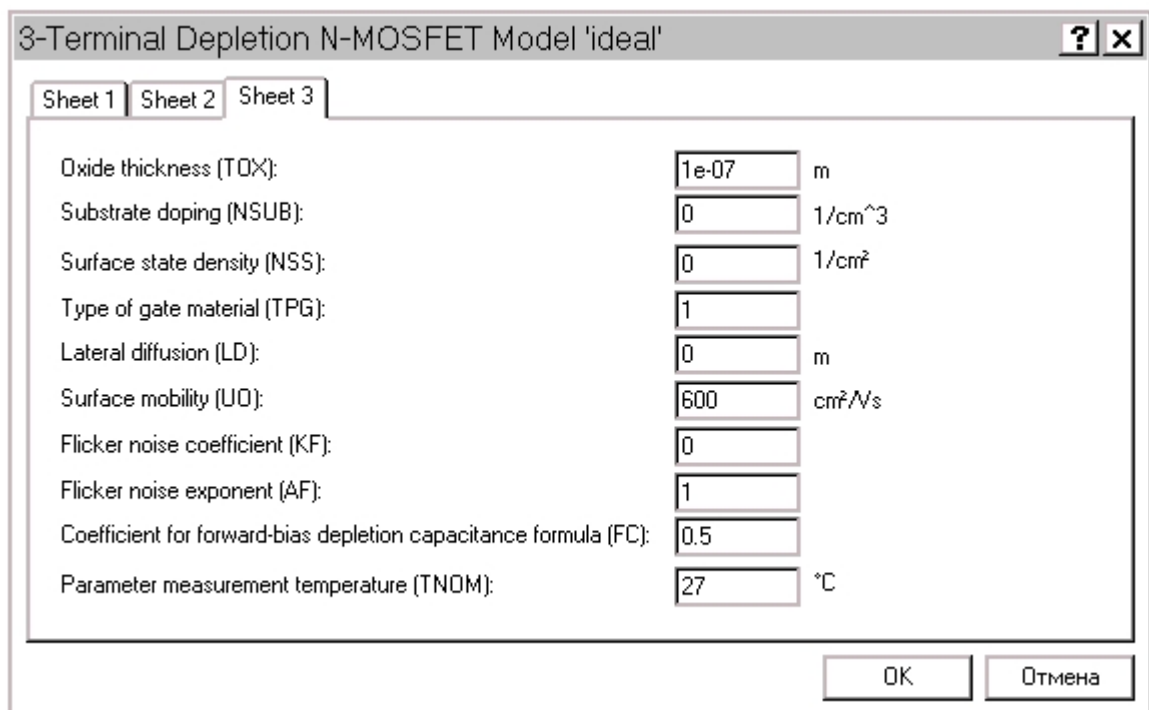


Рисунок 4.38, в) - Діалогове вікно установки параметрів МДН-транзисторів

V_B - напруга інверсії приповерхневого шару підкладки, В.
 R_{SH} - питомий опір дифузійних областей джерела і стоку, Ом.
 C_J - питома ємність донної частини р-п переходу стік-підкладка при нульовому зсуві, Φ/m^2 .
 MJ - коефіцієнт плавності переходу підкладка-стік.
 C_{JSW} - питома ємність бічної поверхні переходу стік-підкладка, Φ/m .
 J_S - щільність струму насичення переходу стік -підкладка, A/m^2 .
 TOX - товщина оксиду, м.
 $NSUB$ - рівень легування підкладки, $1/cm^3$.
 NSS - щільність повільних поверхневих станів на границі кремній-підзатворний оксид $1/cm^2$.
 TPG - легування затвора: (+1) - домішкою того ж типу, як і для підкладки; (-1) - домішкою протилежного типу; (0) - металом.
 LD - довжина області бічної дифузії, м.
 U_0 - рухливість носіїв струму в інверсному шарі каналу, $cm^2/V\cdot s$.
 KF - коефіцієнт флікер-шуму.
 AF - показник ступеня у формулі для флікер-шуму.
 FC - коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямозмщеного переходу підкладки.

Для дослідження характеристик МДН-транзисторів використовується схема, показана на рис.4.39.

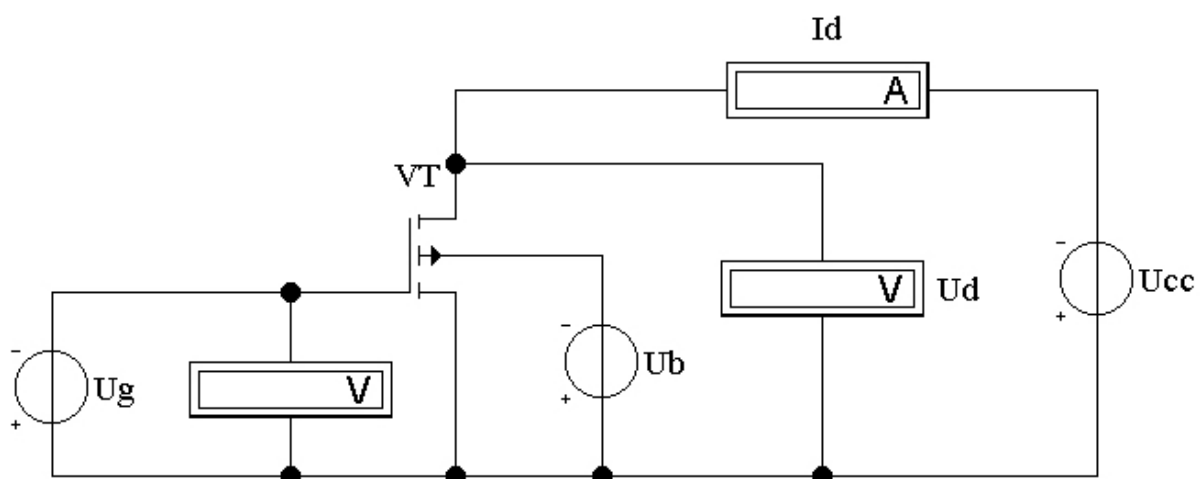


Рисунок 4.39 - Схема для дослідження характеристик МДН-транзисторів

З її допомогою можна отримати сімейство вихідних характеристик МДН-транзисторів при фіксованих значеннях напруги на затворі U_g і

підкладці U_b . Маючи такі характеристики можна визначити їх крутість S при керуванні з боку затвора, а також крутість при керуванні зі сторони підкладки S_b ; статичний коефіцієнт підсилювача $M=U_d/U_g$, вихідний диференціальний опір $R_d=dU_d/dI_d$ і інші параметри.

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.
3. Розгляньте схему на рис. 4.40 і виконайте її моделювання. Визначити стокову (вихідну) та стоко-затвірну ВАХ. Тип польового транзистора вибирається відповідно до варіантів завдання, запропонованого викладачем, табл.4.4.

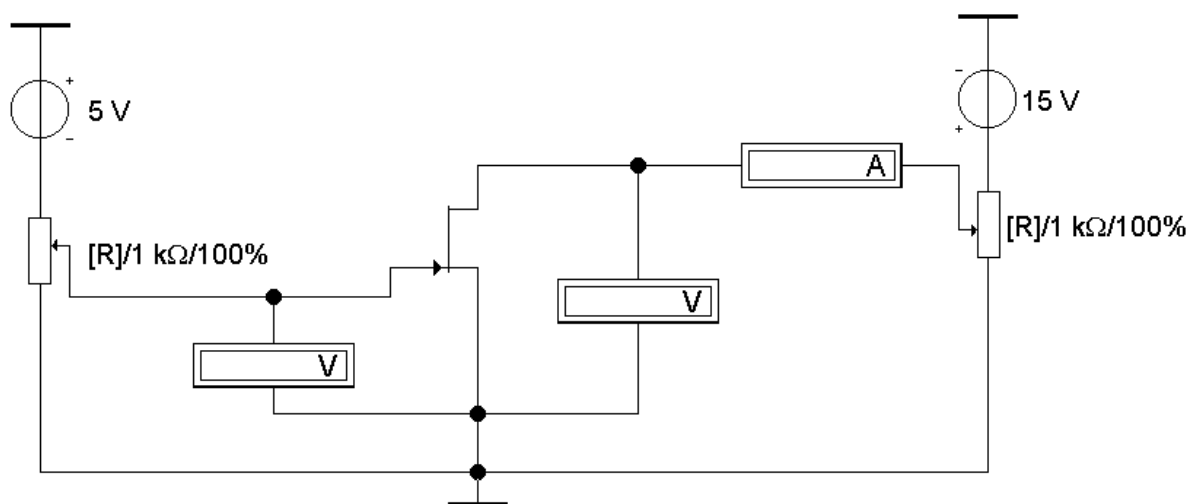


Рисунок 4.40 - Схема для дослідження польового транзистора

Таблиця 4.4

Номер варіанта	Тип транзистора
1	BF245B (n-канальний)
2	J2N5461 (p-канальний)
3	BF247A (n-канальний)
4	BF909 (n-канальний)
5	MTD2955 (p-канальний ізольований)

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольні-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Чим відрізняються уніполярні, польові і каналні транзистори?
2. Як влаштований транзистор із р-п переходом?
3. Чим відрізняються МДН- і МОН-транзистори?
4. Назвіть відмінні ознаки МДН-транзисторів із індукованим і вбудованим каналом.
5. Яку роль відіграє підложка в МДН-транзисторах?
6. Що таке порогова напруга і напруга відсічки?

4.6 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ

Лабораторна робота №6.

Тема. Дослідження підсилювальних каскадів за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: вивчення принципу дії та властивостей, дослідження характеристик підсилювальних каскадів.

Теоретичні відомості

Основні схеми побудови підсилювачів на біполярних транзисторах обумовлюються можливими способами їхнього ввімкнення — ЗБ, ЗЕ і ЗК. На рис. 4.41 показано базові схеми підсилювачів з допоміжними елементами. Розглянемо їх.

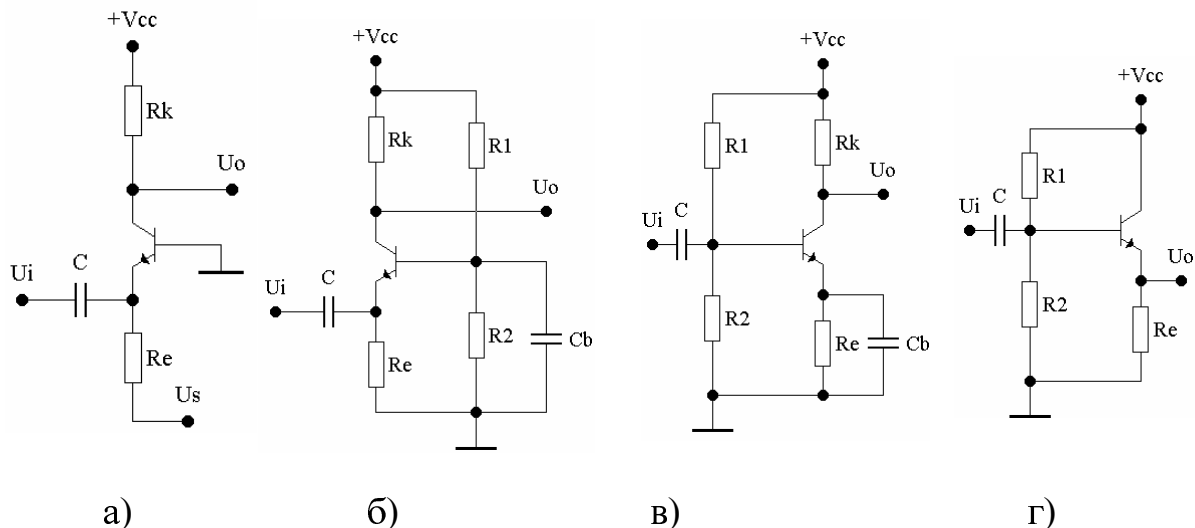


Рисунок 4.41 - Базові підсилювальні каскади а), б) - з ЗБ; в) - з ЗЕ; г) – ЗК.

На рис. 4.41 позначено: U_{cc} – напруга живлення; U_i – вхідна напруга; U_o – вихідна напруга; R_k – опір колекторного навантаження; C – розділовий конденсатор; R_e — емітерний опір; R_1, R_2 — резистори подільника, що задає режим каскаду за постійним струмом.

Особливістю класичної схеми каскаду з ЗБ (рис. 4.41, а) є наявність окремого джерела зсуву U_s , за допомогою якого задаємо режим транзистора за постійним струмом, що досить незручно. Тому на практиці використовується каскад ЗБ за схемою рис. 4.41,б, у якому режим за постійним струмом задаємо подільником на резисторах R_1, R_2 , а за змінним струмом база з'єднана із “землею” через блокувальний конденсатор C_b .

Базові каскади характеризуються вхідним $R_{вх}$, і вихідним $R_{вих}$ опором, коефіцієнтом підсилення струму K_i і напруги K_u . Нижче в якості довідкової інформації наведено наближені вирази для розрахунку цих характеристик.

Для каскаду з ЗБ:

$$R_{\text{вх}}=R_e\parallel R_{e0}; \quad R_{\text{вих}}=R_k; \quad K_i=\alpha; \quad K_u=\alpha R_k/(R_e+R_{e0}). \quad (4.10)$$

Для каскаду з ЗЕ:

$$R_{\text{вх}}=\beta(R_e+R_{e0}); \quad R_{\text{вих}}=R_k/\beta+(R_e+R_{e0})(R_k+R_i)/(R_e+R_{e0}+R_i); \quad (4.11) \\ K_i=\beta; \quad K_u=-R_k\beta/(R_e+R_{e0}).$$

Для каскаду з ЗК:

$$R_{\text{вх}}=\beta(R_e+R_{e0}); \quad R_{\text{вих}}=R_e+R_{e0}; \quad K_i=\beta; \quad K_u=1. \quad (4.12)$$

В даних формулах використовуються: R_{e0} - об'ємний опір емітерного переходу; R_i - внутрішній опір джерела вхідного сигналу з урахуванням опорів паралельно ввімкнених резисторів R_1, R_2 ; \parallel - значок паралельного з'єднання резисторів; α - коефіцієнт підсилення струму транзистора в схемі з ЗБ; β - коефіцієнт підсилення струму транзистора в схемі ЗЕ. Відмітимо, що каскад ЗЕ сигнал інвертує, а каскади ЗБ і ЗК не інвертують.

Проектування підсилювача починається з визначення режиму транзистора за постійним струмом, що називають статичним режимом.

У залежності від струму колектора транзистора і величини спаду напруги на електродах транзистора підсилювального каскаду, а також від амплітуди вхідного сигналу розрізняють такі режими підсилення: режим А; режим В; режим С; режим D і проміжні режими, наприклад, АВ.

У режимі А струм у вихідному колі підсилювача протікає протягом усього періоду сигналу. Для ілюстрації звернемося до рис. 4.42, на якому показаний каскад за схемою з ЗЕ. У схемі використані індикаторні вольтметри для контролю напруги на електродах транзистора в статичному режимі, а також функціональний генератор і осцилограф для моделювання режиму підсилення. У програмному комплексі EWB в розглянутій схемі не можна вимкнути функціональний генератор, тому при моделюванні статичного режиму встановимо мінімальну амплітуду сигналу (у нашому випадку 1 мкВ).

Для підсилювального каскаду класу А розрахунок статичного режиму полягає у виборі такого колекторного струму I_{k0} (його називають струмом спокою або струмом у робочій точці), при якому спад напруги на колекторному навантаженні R_k , по-перше, дорівнює спаду напруги на транзисторі (напруга колектор-емітер U_{ke}) і, по-друге, його значення повинно бути більшим амплітудного значення вихідного сигналу при максимальному вхідному сигналі. Перша умова стосовно схеми на рис. 4.42 запишеться в такий спосіб:

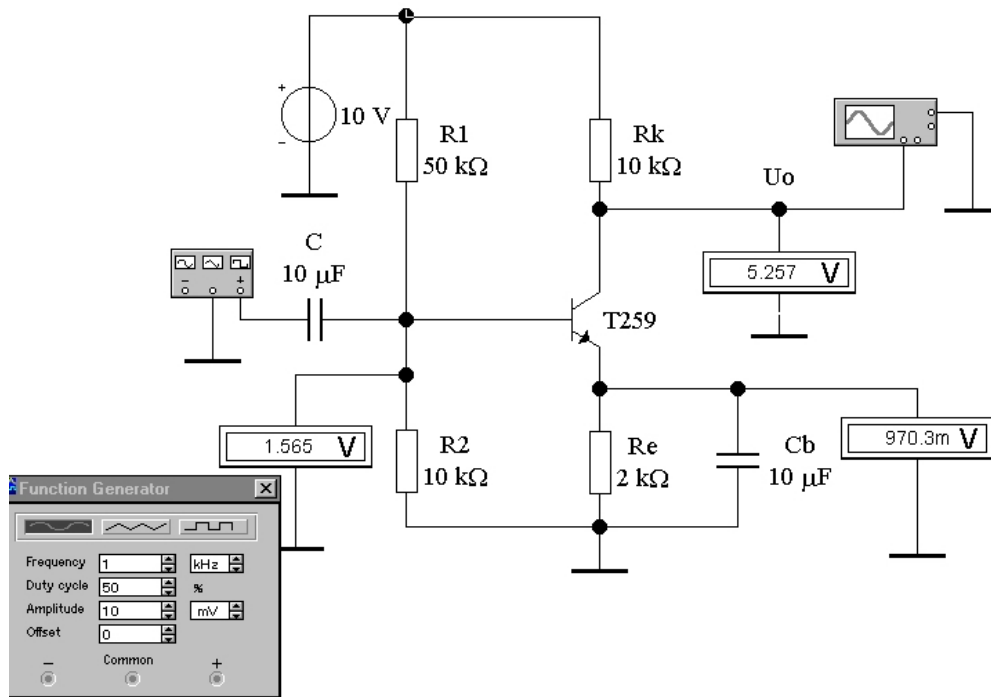


Рисунок 4.42 - Підсилювальний каскад за схемою з ЗЕ

$$I_{k0}R_k + U_{ke} + I_e R_e = U_{cc}, \quad (4.13)$$

де $I_e = \beta I_{k0} / (\beta - 1)$ — струм спокою емітера,
 β – коефіцієнт підсилення струму транзистора в схемі з ЗЕ.

Оскільки $\beta \gg 1$ (у розглянутому прикладі $\beta = 100$), то $I_e \approx I_{k0}$. У такому випадку вираз (4.13) записується у вигляді: $2I_{k0}R_k + I_{k0}R_e = U_{cc}$, звідки знаходимо струм спокою

$$I_{k0} = U_{cc} / (2R_k + R_e). \quad (4.14)$$

Розглянемо тепер коло бази транзистора. Напруга на базі щодо спільної шини (з урахування того, що $I_e \approx I_{k0}$).

$$U_{bo} = U_{beo} + I_{k0} R_e, \quad (4.15)$$

де U_{beo} – напруга база-емітер (для кремнієвих транзисторів вона знаходиться в межах 0,7...0,9 В).

Оскільки U_{bo} дорівнює спаду напруги на резисторі R_2 , струм через нього дорівнює $I_2 = U_{bo} / R_2 = (U_{beo} + I_{k0} R_e) / R_2$.

Через резистор R_1 протікає струм, який визначається сумою струму бази, рівного I_{k0} / β і струму I_2 . Спад напруги на резисторах R_1 , R_2 дорівнює напрузі живлення U_{cc} . Тому для кола бази:

$$R1(I_{k0}/\beta + U_{bo}/R2) + U_{bo} = U_{cc}. \quad (4.16)$$

Якщо керуватися вимогами високої термостабільності каскаду, то необхідно вибрати:

$$R1 \gg R2, \quad I_{k0}/\beta \ll I_2. \quad (4.17)$$

У такому випадку із урахуванням (4.14) і (4.15) з (4.16) отримуємо вираз для орієнтовного розрахунку опорів резисторів схеми із ЗЕ:

$$R1/R2 = Rk/Re. \quad (4.18)$$

Підставляючи у формулу (4.18) значення опорів резисторів, використуваних у схемі на рис. 4.42, переконаємося в справедливості цього співвідношення. При цьому, як впливає з показань вольтметрів, спад напруги на колекторному опорі складає $10 - 5,25 = 4,75$ В і близький до значення спаду напруги на транзисторі $5,25 - 0,97 = 4,28$ В, що відповідає першій умові забезпечення режиму А.

Коефіцієнт підсилення каскаду з ЗЕ розраховується за наближеною формулою $K_u = Rk/Re$ (якщо резистор Re не зашунтований ємністю). У розглянутому прикладі він дорівнює 5. Отже, при амплітуді вихідної напруги 4,5 В (друга умова забезпечення режиму А) на вхід підсилювача можна подати сигнал з амплітудою $4,5/5 = 0,9$ В.

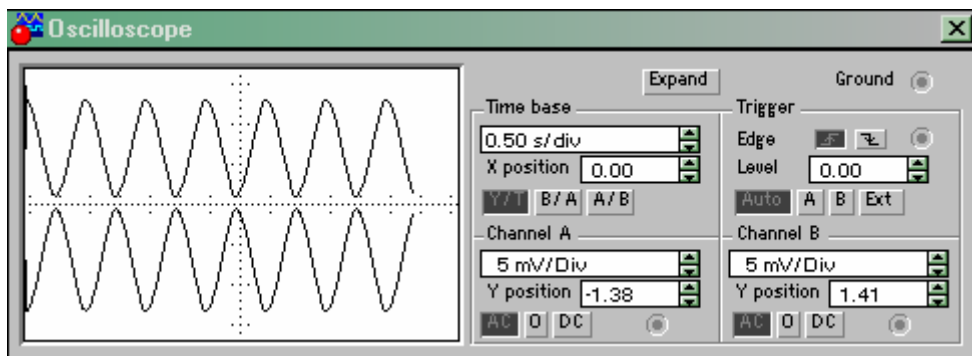


Рисунок 4.43 - Осцилограма вхідного (В) і вихідного (А) сигналів

Осцилограми вхідного і вихідного сигналів показані на рис. 4.43. Звертаємо увагу на те, що обидва канали працюють у режимі АС і осцилограми рознесені на екрані за допомогою зсуву по вертикалі (Y POS). З осцилограм видно, що вихідний сигнал (осцилограма А) за формою повторює вхідний сигнал (осцилограма В). Таким чином, достоїнством режиму класу А є мінімум нелінійних спотворень. Його недоліком є низький ККД, менший 0.5, тому цей режим використовується найчастіше в каскадах попереднього підсилення, а також у малопотужних вихідних каскадах.

У режимі В струм через транзистор протікає протягом приблизно половини періоду вхідного сигналу (180°). Половину цього кута, що відповідає моменту припинення струму через активний елемент,

називають кутом відсічки. В ідеалі цей кут дорівнює 90° . Через нелінійність початкових ділянок характеристик транзисторів форма вихідного струму при його малих значеннях істотно відрізняється від форми струму в лінійному режимі. Це викликає значні нелінійні спотворення вихідного сигналу.

Режим В, зазвичай, використовують у двотактних вихідних каскадах, що мають високий ККД, в інших каскадах його застосовують порівняно рідко. Частіше вибирають проміжний режим АВ, при якому кут відсічки трохи більше 90° і за відсутності вхідного сигналу через активний елемент протікає струм, рівний 5...15% від максимального струму при заданому рівні вхідного сигналу. Такий вибір дозволяє зменшити нелінійні спотворення.

У режимі С струм через транзистор протікає протягом проміжку часу, що менший половини періоду вхідного сигналу, тобто при куті відсічки менше 90° . Струм спокою в режимі С дорівнює нулю, його використовують у потужних підсилювачах, у яких навантаженням є резонансний контур (наприклад, у вихідних каскадах радіопередавачів).

Режим D (або ключовий) — режим, при якому транзистор знаходиться тільки в двох станах: цілком закритий або цілком відкритий. Такий режим використовується в ключових схемах.

При виборі параметрів робочої точки транзистора необхідно враховувати розкид його параметрів від екземпляра до екземпляра і їхню залежність від температури (зворотний струм переходів, коефіцієнт передачі за струмом), а також їхню схильність до зміни в часі (за рахунок старіння). Усе це вимагає вживання спеціальних заходів для стабілізації коефіцієнта підсилення й інших параметрів підсилювачів.

Зміни параметрів особливо небезпечні в перших каскадах підсилювачів постійного струму, тому що при гальванічному міжкаскадному зв'язку і великому коефіцієнті підсилення це може призвести до істотної зміни нульового рівня на виході. Тому в більшості транзисторних підсилювачів для стабілізації положення робочої точки вводять стабілізуючий зворотний зв'язок або використовують методи температурної компенсації (зокрема, введенням термозалежних опорів).

Для оцінювання впливу температури на параметри підсилювальних каскадів використовується коефіцієнт температурної нестабільності $S_t = \beta / [1 + \beta Y_b]$, де $Y_b = R_e / (R_e + R_b)$, R_b - опір базового подільника (для схеми на рис. 4.42 він дорівнює опору паралельно ввімкннутих резисторів R_1, R_2). Максимальна температурна стабільність статичного режиму забезпечується при $Y_b = 1$. Отже, для підвищення температурної стабільності бажано виконання умови $R_e \gg R_b$, тобто вона буде тим кращою, чим більший опір у колі емітера і чим менший еквівалентний опір подільника R_1, R_2 , що задає режим за постійним струмом.

Для підвищення температурної стабільності підсилювальних каскадів використовують також різні способи термостабілізації.

Перший спосіб термостабілізації – параметричний – заснований на застосуванні термочутливих елементів, зокрема, напівпровідникових діодів (у схемі на рис. 4.42 це може бути діод, ввімкнений послідовно з резистором R2). При зміні температури навколишнього середовища опір термозалежного елемента змінюється так, що зміна струму бази чи напруги між емітером і базою компенсує зміну струму колектора. Очевидно, що характеристика такого термоелемента повинна мати відповідну температурну залежність. А оскільки це зробити важко, то для забезпечення потрібних характеристик у ряді випадків паралельно термоелементу і послідовно з ним включають спеціальним чином підібрані активні опори. Це ускладнює схему, і, крім того, з часом така компенсація порушується.

Другий спосіб термостабілізації — застосування негативного зворотного зв'язку за постійним струмом, причому використовують як місцеві, так і загальні зворотні зв'язки. При місцевому зворотному зв'язку найчастіше застосовують зворотний зв'язок за струмом і трохи рідше — зворотний зв'язок за напругою. У схемі на рис. 4.42 застосований зворотний зв'язок за струмом, сутність якого полягає в тому, що подільник на резисторах R1, R2 задає потенціал бази і тим самим жорстко фіксує потенціал емітера. Оскільки цей потенціал обумовлений спадом напруги на резисторі Re, то тим самим задається струм емітера. При цьому зміни параметрів транзистора, що змінюють струм колектора, змінюють відповідним чином струм емітера і спад напруги на резисторі Re. Це приводить до зміни різниці потенціалів між базою і емітером. Струм бази при цьому змінюється таким чином, що зміна струму колектора буде тією чи іншою мірою компенсованою.

Чим менший еквівалентний опір базового діляника, тим у меншому ступені потенціал бази залежить від змін базового струму і тим краща стабілізація. Але при малих опорах R1, R2 різко зростає потужність, споживана від джерела живлення, і зменшується вхідний опір каскаду.

Якщо необхідно мати стабільний режим за постійним струмом і максимальне підсилення за змінним струмом, то вводять досить глибокий зворотний зв'язок за рахунок збільшення опору резистора Re, паралельно якому вмикається конденсатор великої ємності (конденсатор Cb на рис. 4.42), що визначається з умови: $2\pi F_{\min} C_b R_e \gg 1$, де F_{\min} – мінімальна частота сигналу.

У багатокаскадних підсилювачах для стабілізації статичного режиму перевага віддається загальному негативному зворотному зв'язку за постійним струмом, що охоплює цілком весь підсилювач. При цьому місцеві зворотні зв'язки застосовувати недоцільно, тому що вони завжди зменшують коефіцієнти підсилення окремих каскадів і знижують ефективність загального зворотного зв'язку.

Підсилювальні каскади на польових транзисторах, на відміну від біполярних, керуються напругою, прикладеною до закритого p–n–переходу

(у транзисторах з керувальним р–п–переходом) або між електрично ізольованим затвором і підкладкою, що часто з'єднується з одним із електродів транзистора (у МДН-транзисторах). Струм затвора в підсилювальних каскадах на польових транзисторах досить малий і для кремнієвих структур з керувальним р–п–переходом не перевищує 10 нА. Для МДН-транзисторів цей струм на кілька порядків менший. Для транзисторів із р–п–переходом вхідний опір на низьких частотах складає десятки мегаом, а для МДН-транзисторів досягає десятків і сотень тераом. З підвищенням частоти вхідний опір транзисторів істотно зменшується через наявність ємностей затвор-стік і затвор-витік.

Серед базових каскадів на польових транзисторах найбільше використовуються каскади із загальним витоком (аналог ЗЕ) і витокові повторювачі (аналог ЗК), показані в двох модифікаціях на рис. 4.44. Вони відрізняються способом реалізації статичного режиму; початкове зміщення забезпечується за рахунок спаду напруги на резисторі R_s , який ввімкненому в коло витоку (рис. 4.44, а, в); початкове зміщення забезпечується за рахунок спаду напруги на R_s і за рахунок спаду напруги на резисторі R_2 (рис. 4.44 б, г).

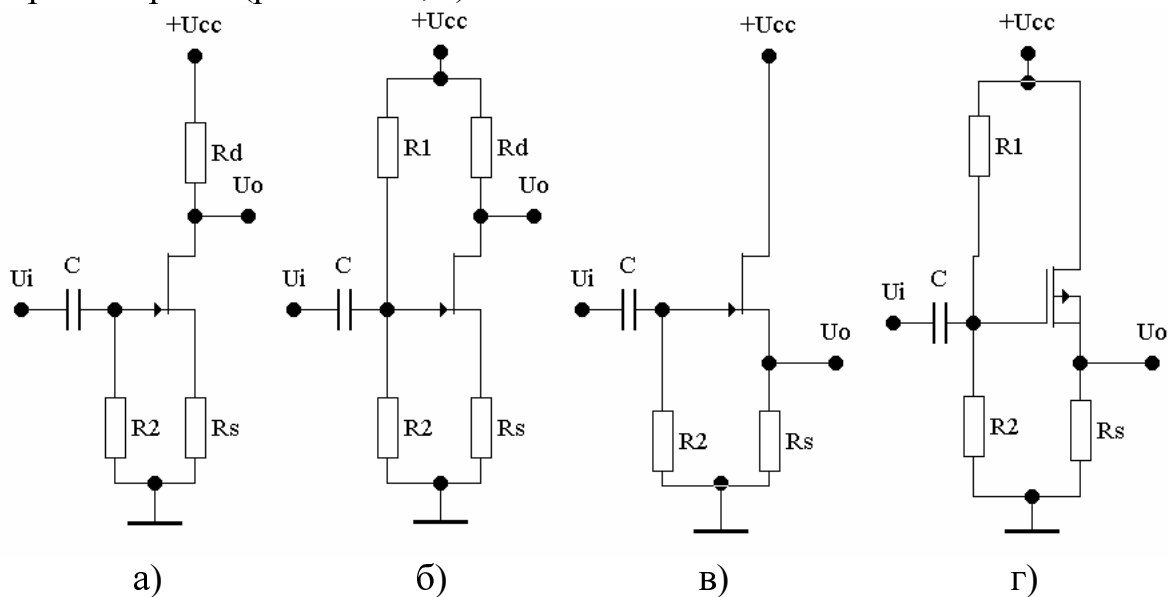


Рисунок 4.44 - Базові підсилювальні каскади на польових транзисторах із загальним витоком а), б) і загальним стоком в), г)

Для польового транзистора з керувальним р–п–переходом, що працює в широкому діапазоні температур, положення робочої точки може змінюватися через додатковий спад напруги на резисторі R_2 , опір якого вибирається досить великим. Це пов'язано зі зміною зворотного струму р–п–переходу, що виконує роль затвора, зміною контактної різниці потенціалів затвор-канал і рухливості носіїв заряду в каналі. Зміна струму стоку при фіксованій напрузі зсуву визначається наближеним співвідношенням $\Delta I_d = I_{d0} [(T_0/T)^{0,66} - 1]$, де I_{d0} – струм стоку при температурі

T_0 ; T — температура, для якої визначається ΔI_d .

Аналіз дестабілізуючих факторів, що викликають зміну струму стоку, показує, що при зміні температури вони мають різні знаки і, отже, можлива їхня взаємна компенсація. Точку, у якій при змінах температури зміна струму стоку мінімальна, називають температурно-стабільною точкою. Однак ефективна компенсація можлива тільки в невеликому діапазоні температур. При цьому для польових транзисторів з ізольованим затвором температурно-стабільна робоча точка відсутня взагалі.

Основним прийомом підвищення температурної стабільності є збільшення глибини послідовного зворотного зв'язку за струмом, що здійснюється за рахунок збільшення опору R_s і, як наслідок, супроводжується збільшенням напруги зсуву. У підсумку, вже при порівняно невеликих напругах між затвором і витком, польові транзистори працюють поблизу режиму відсічки, де крутість характеристики мала. Для усунення цього недоліку на затвор подають додаткову напругу, що утворюється подільником напруги на резисторах R_1 , R_2 (рис. 4.44, в, г), це забезпечує роботу транзистора на ділянці з більшою крутістю.

У польових транзисторів з індукованим каналом подача напруги зсуву від зовнішнього джерела обов'язкова, тому що за її відсутності транзистор закритий. Температурна стабілізація здійснюється за рахунок послідовного зворотного зв'язку, що вводиться за допомогою резистора R_s .

Слід зазначити, що температурні зміни струму стоку в польових транзисторах у багато разів менші змін колекторного струму біполярних транзисторів. Тому, як правило, забезпечення необхідної температурної стабільності не викликає великих ускладнень. Зворотний зв'язок за змінним струмом, що при цьому виникає, нейтралізується шунтуванням резистора R_s блокувальним конденсатором.

При аналізі підсилювальних каскадів на польових транзисторах оперують крутістю характеристики S_0 і струмом стоку I_{d0} , що відповідають нульовій напрузі затвор-витік. При цьому використовують такі наближені співвідношення, що описують характеристики польових транзисторів: $I_c = I_{co}(1 - U_{gs}/U_{gso})^2$; $S = S_0(1 - U_{gs}/U_{gso})$; $S_0 = 2I_{co}U_{gso}$. У цих формулах I_c - поточне значення струму стоку; I_{co} , S_0 - початковий струм стоку і крутість характеристики при напрузі відсічки U_{gso} ; U_{gs} , S - поточні значення напруги затвор-витік і крутості.

Вхідний опір підсилювальних каскадів, показаних на рис. 4.44, в області середніх частот дорівнює опору резистора R_2 або $R_1||R_2$, вихідний опір каскаду з загальним витком дорівнює $R_d||R_{dsd}$, де R_{dsd} - диференціальний опір каналу стік-витік; як правило, він істотно більший R_d , тому вихідний опір практично дорівнює R_d . Для каскаду із загальним стоком при припущеннях $SR_s \gg 1$ і $SR_{dsd} \gg 1$ вихідний опір рівний $1/S$. Коефіцієнти підсилення за напругою каскадів із загальним витком і стоком визначаються, відповідно, формулами:

$$K_{uCB} = S(R_d)^2 / (R_d + R_s); \quad (4.19)$$

$$K_{uCC} = SR_s / (1 + SR_s). \quad (4.20)$$

Схема для моделювання каскаду з загальним витоком наведена на рис. 4.45.

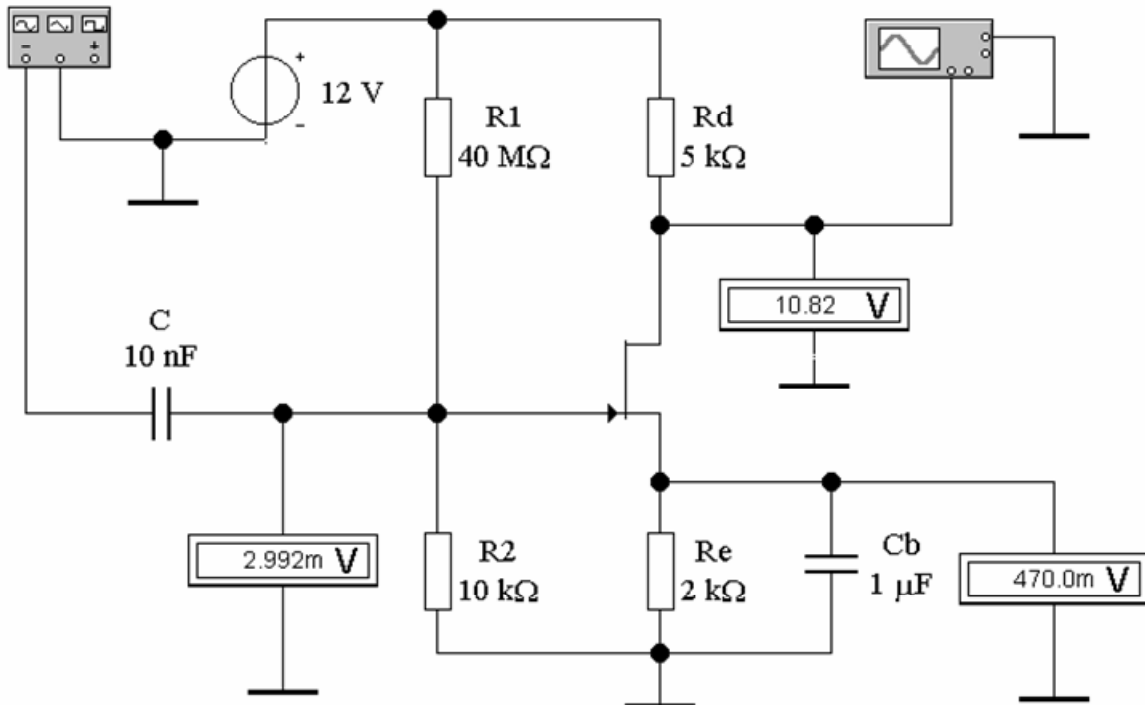


Рисунок 4.45 – Підсилювальний каскад з ЗВ

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.

2. Зберіть схему, запропоновану викладачем (рис. 4.46–4.48).

Перелічіть параметри елементів кола зміщення вказаної схеми та виконайте моделювання підсилювального каскаду в режимах класів А, В, С (тип класу задається викладачем індивідуально для кожного студента). Визначіть параметри режиму спокою, вхідний та вихідний опори. Побудуйте амплітудну та амплітудно-частотну характеристики. За вказівкою викладача змініть номінали розділових ємностей, виконайте моделювання та визначіть вплив цих змін на АЧХ підсилювача.

3. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous,

Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

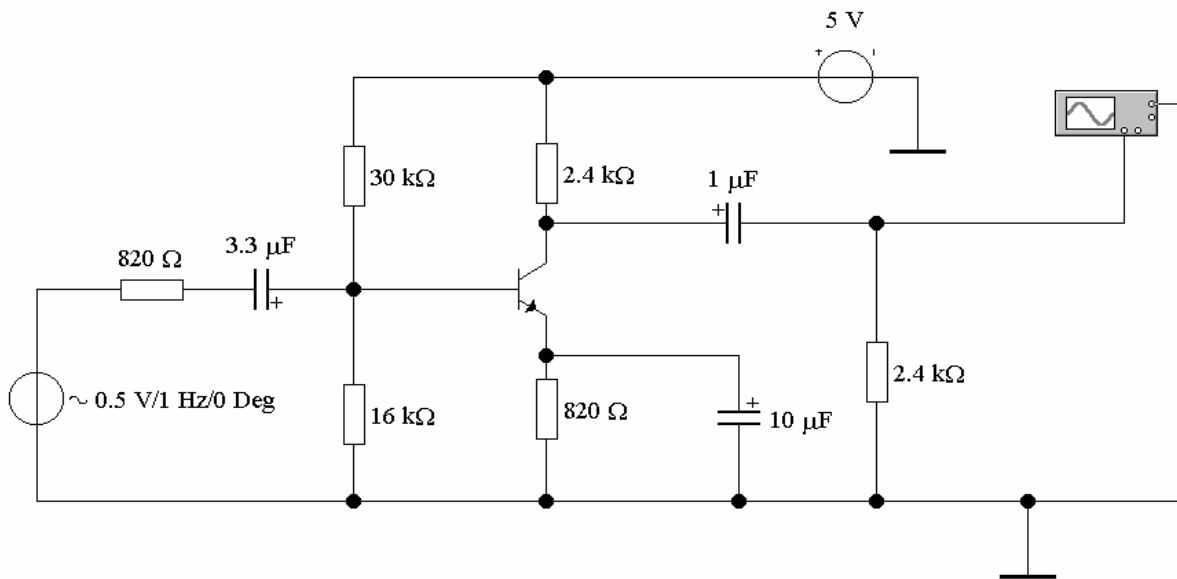


Рисунок 4.46 - Схема дослідження підсилювального каскаду на БТ з ЗЕ

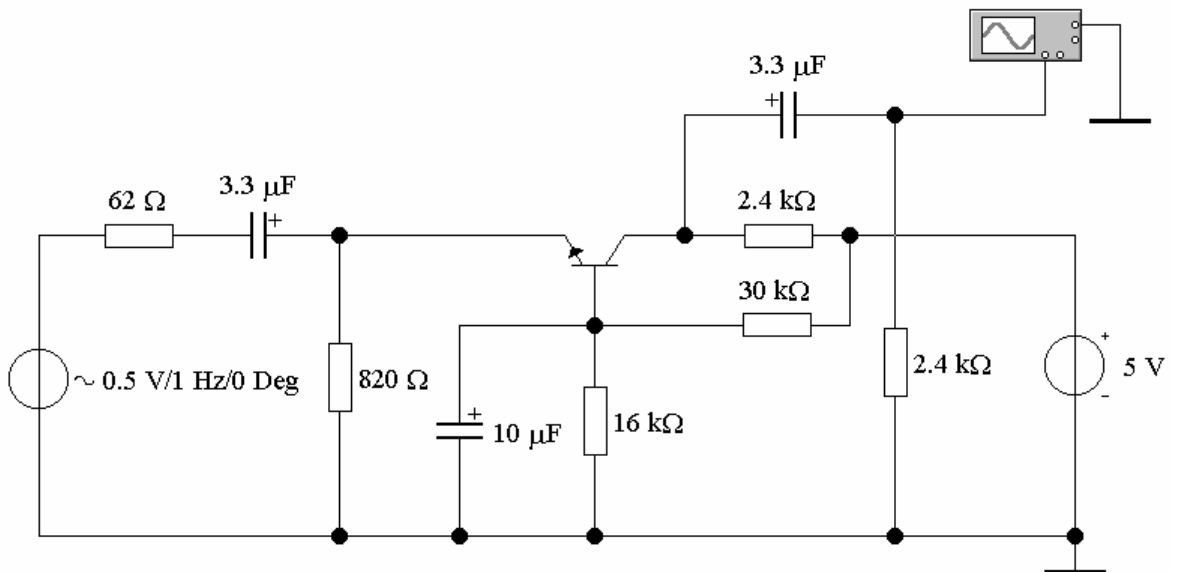


Рисунок 4.47 - Схема дослідження підсилювального каскаду на БТ з ЗБ

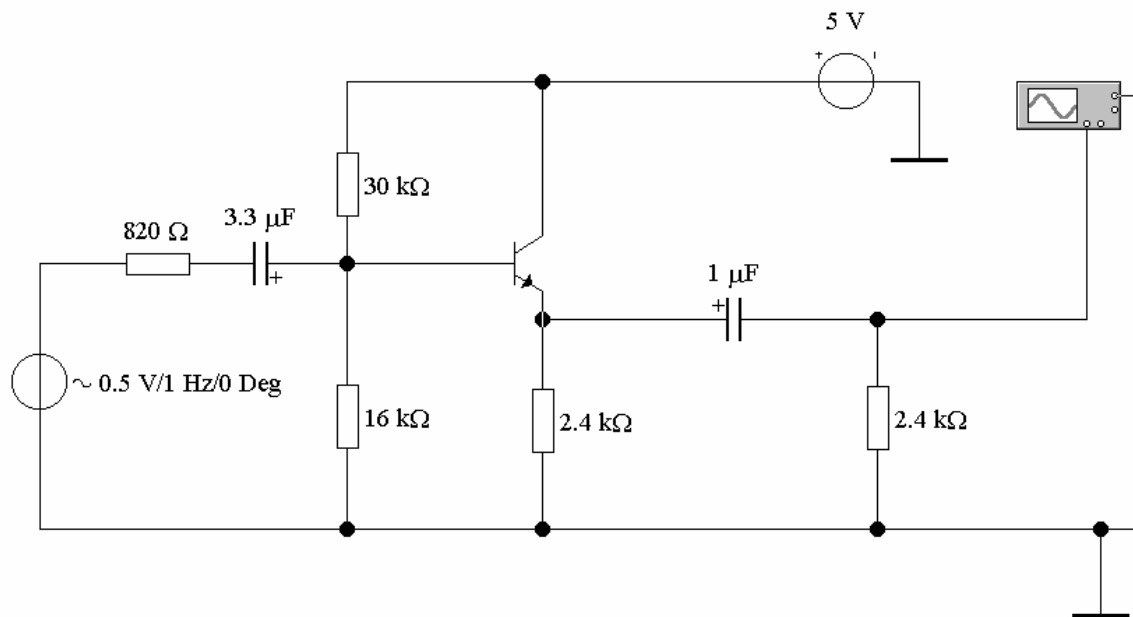


Рисунок 4.48 - Схема дослідження підсилювального каскаду на БТ з ЗК

6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольно-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Які базові схеми ввімкнення біполярних і польових транзисторів ви знаєте?

2. Поясніть, яким чином забезпечується стабілізація режиму спокою каскаду.

3. Поясніть відмінність параметрів $R_{вх}$, $R_{вих}$, K_u , K_i для різних схем ввімкнення біполярних та польових транзисторів.

4. Наведіть приклади та поясніть вигляд АЧХ транзисторних каскадів.

5. Від яких елементів схем залежить f_H ?

6. Від яких параметрів залежить спад АЧХ на верхніх частотах?

4.7 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ З ЗВОРОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Лабораторна робота №7

Тема. Дослідження підсилювачів зі зворотними зв'язками за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: дослідження впливу негативного зворотного зв'язку на характеристики і параметри підсилювачів.

Теоретичні відомості

Під зворотним зв'язком (ЗЗ) розуміють введення сигналу з виходу пристрою на його вхід, де він додається до вхідного сигналу або віднімається від нього (рис. 4.49, а). Як правило, для ланцюгів ЗЗ використовують кола пасивних елементів, коефіцієнт передачі і частотні характеристики яких суттєво впливають на властивості підсилювача. Спільний сигнал на вході пристрою, який охоплений ЗЗ, визначається із співвідношень

$$U_{\Sigma} = U_{вх} \pm U_{ЗЗ}; \quad I_{\Sigma} = I_{вх} \pm I_{ЗЗ}, \quad (4.21)$$

де знак „плюс” використовується при позитивному зворотному зв'язку (ПЗЗ), а „мінус” - при негативному зворотному зв'язку (НИЗ). Замкнений контур, який містить коло ЗЗ і частину підсилювача між точками підключення ЗЗ, називається петлею ЗЗ. Розрізняють місцевий і загальний ЗЗ. Місцевий охоплює окремі каскади або частини підсилювача. Загальний - весь підсилювач. Існують ЗЗ за постійним і за змінним струмом. Якщо сигнал ЗЗ визначається змінною складовою вихідного сигналу, то це буде ЗЗ за змінним струмом. Якщо сигнал ЗЗ пропорційний всьому вихідному сигналу, то такий ЗЗ буде і за постійним, і за змінним струмом.

Залежно від способу отримання сигналу зворотного зв'язку розрізняють ЗЗ за напругою, за струмом і комбінований. В схемі з ЗЗ за напругою (рис. 4.49, б) сигнал ЗЗ пропорційний вихідній напрузі:

$$U_{ЗЗ} = \frac{U_{вих} \cdot R_2}{(R_1 + R_2)}. \quad (4.22)$$

В підсилювачі з ЗЗ за струмом (рис. 4.49, в) сигнал ЗЗ пропорційний вихідному струму $U_{ЗЗ} = I_{вих} \cdot R$.

В підсилювачі з комбінованим ЗЗ (рис. 4.49, г) сигнал ЗЗ пропорційний і вихідній напрузі, і вихідному струму:

$$U_{зз} = \frac{U_{вих} \cdot R_2}{(R_1 + R_2)} + I_{вих} \cdot R_3. \quad (4.23)$$

Залежно від способу введення сигналу у вхідне коло розрізняють: послідовний, паралельний і змішаний НЗЗ.

В підсилювачі з послідовним НЗЗ напруга ЗЗ віднімається від вхідної напруги $U_{вх}$ (рис. 4.49, д), а в підсилювачі з паралельним НЗЗ у вхідному колі віднімаються струми $I_{\Sigma} = I_{вх} - I_{зз}$, (рис. 4.49, е).

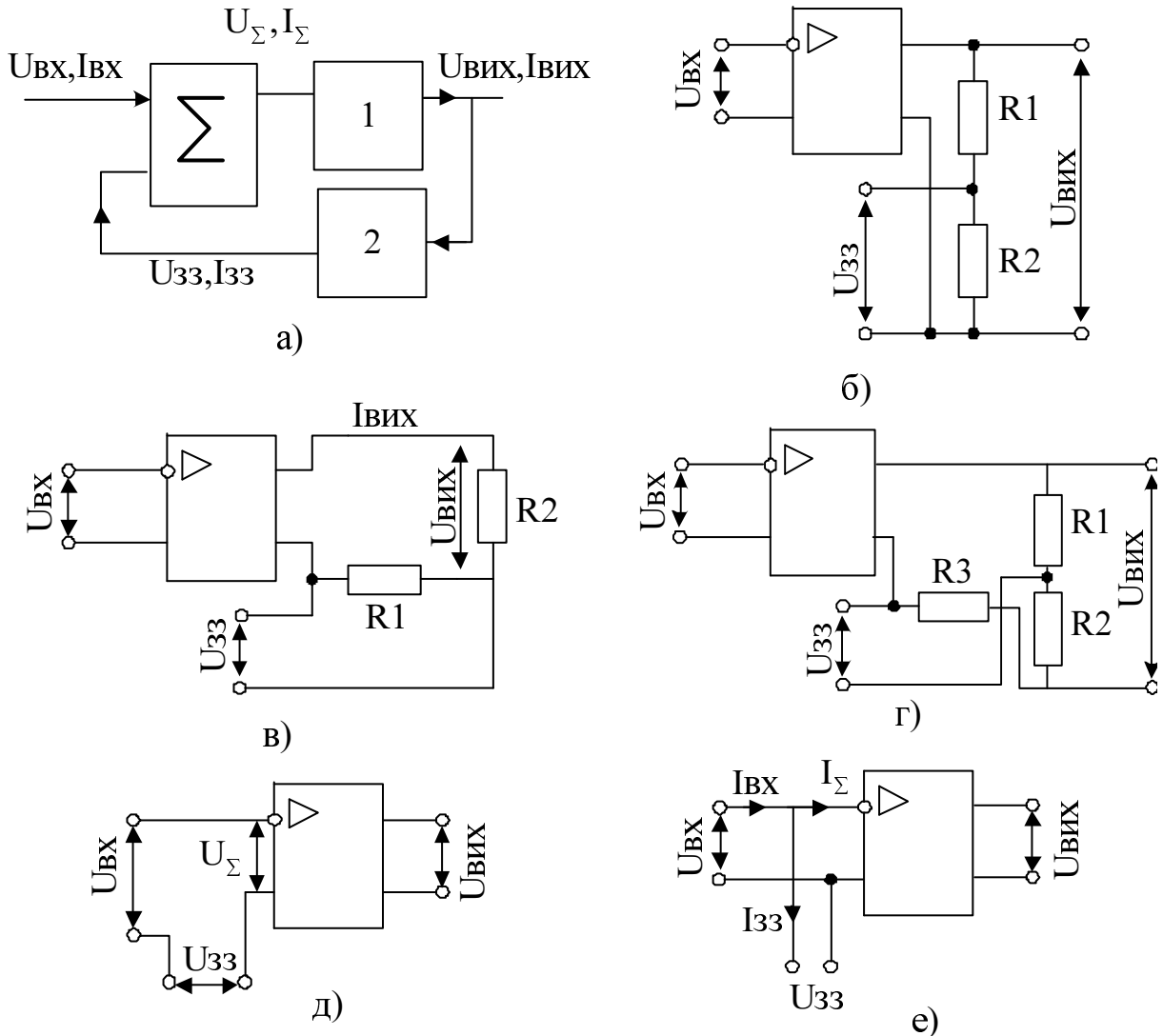


Рисунок 4.49 - Види зворотних зв'язків

Для підсилювачів зі змішаним НЗЗ справедливо: $I_{\Sigma} = I_{вх} - I_{зз}$,
 $U_{\Sigma} = U_{вх} - U_{зз}$.

Кількісна оцінка впливу ЗЗ визначається коефіцієнтом ЗЗ $\beta_{зз}$, який показує, яка частина вихідного сигналу надходить на вхід підсилювача:

$$\beta_{ззu} = \frac{U_{зз}}{U_{вих}}; \beta_{ззи} = \frac{I_{зз}}{I_{вих}}. \quad (4.24)$$

Зворотний зв'язок впливає практично на всі характеристики підсилювача. Введення НЗЗ в підсилювач дозволяє підвищити стабільність його основних характеристик.

Відносна нестабільність коефіцієнта підсилення підсилювача без НЗЗ $\delta K_u = \Delta K_u / K_u$.

Відносна нестабільність коефіцієнта підсилення підсилювача з НЗЗ

$$\delta K_{33u} = \frac{\Delta K_{33u}}{K_{33u}} = \frac{\delta K_u}{1 + K_u \beta_{33}}. \quad (4.25)$$

Отже, нестабільність коефіцієнта підсилення зменшиться в $(1 + K_u \beta_{33})$ раз.

НЗЗ впливає на вхідний і вихідний опори підсилювача.

Послідовний НЗЗ збільшує вхідний опір підсилювача

$$R_{вх33} = R_{вх} (1 + \beta_{33} K_u), \quad (4.26)$$

де $R_{вх33}$, $R_{вх}$ - вхідні опори підсилювача зі ЗЗ і без нього.

Паралельний НЗЗ зменшує вхідний опір підсилювача

$$R_{вх33} = R_{вх} / (1 + \beta_{33} K_u). \quad (4.27)$$

Введення НЗЗ за напругою зменшує вихідний опір підсилювача

$$R_{вих33} = R_{вих} / (1 + \beta_{33} K_u), \quad (4.28)$$

а НЗЗ за струмом збільшує $R_{вих}$.

Коефіцієнт підсилення підсилювача, охопленого НЗЗ зменшується

$$K_{у33} = K_u / (1 + \beta_{33} K_u). \quad (4.29)$$

Ступінь зміни коефіцієнта підсилення підсилювача, охопленого НЗЗ, визначається добутком $K_u \beta_{33}$, який називається глибиною ЗЗ. Якщо $K_u \beta_{33} \gg 1$, то коефіцієнт підсилення такого підсилювача

$$K_{у33} \approx \frac{1}{\beta_{33}}, \quad (4.30)$$

тобто $K_{у33}$ практично не залежить від коефіцієнта підсилення самого підсилювача і визначається тільки параметрами кола ЗЗ.

Таким чином, введення негативного ЗЗ дозволяє покращити характеристики підсилювача: підвищити стабільність коефіцієнта підсилення, зменшити нелінійні і частотні спотворення, збільшити вхідний і зменшити вихідний опір /послідовний НЗЗ за напругою/, зменшити вхідний і збільшити вихідний опір /паралельний НЗЗ за струмом/, розширити смугу пропускання підсилювача. Зменшення коефіцієнта

підсилення підсилювача з НЗЗ можна компенсувати введенням додаткового підсилювального каскаду.

Крім НЗЗ в підсилювачах можуть виникати паразитні позитивні зворотні зв'язки, які погіршують характеристики підсилювача, а в деяких випадках можуть призводити до його самозбудження.

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.

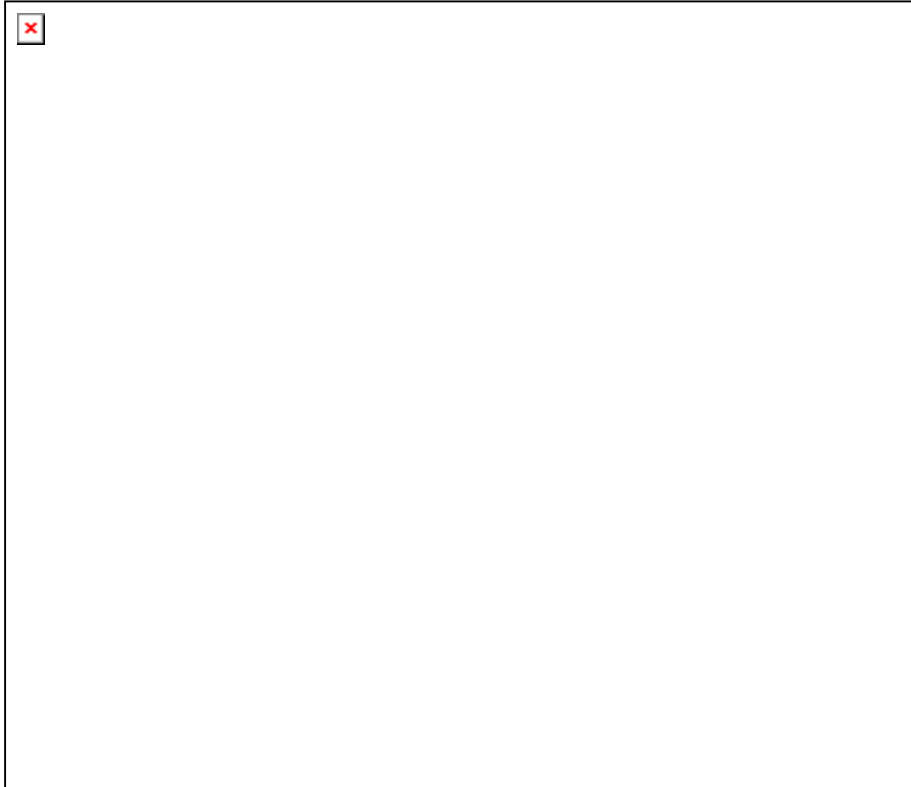


Рисунок 4.50 - Схема для дослідження підсилювального каскаду з зворотними зв'язками

2. Для вказаного типу зворотного зв'язку (тип зворотного зв'язку задається викладачем індивідуально для кожного студента, наприклад: підсилювач без НЗЗ, з послідовним НЗЗ за струмом, з паралельним НЗЗ за напругою) визначити основні параметри каскаду ($R_{вх}$, $R_{вих}$, K_u , K_i , K_p), побудувати амплітудні та амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) однокаскадного підсилювача. Виконати аналіз впливу зворотного зв'язку на основні параметри каскаду, на амплітудні та АЧХ. Для виконання завдання внести зміни в базову схему, наведену на рис. 4.50.

3. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі

інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

6. Проставте вказані нижче номінали. Для цього потрібно двічі натиснути лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента: $R1=1,2\text{кОм}$; $R2=22\text{кОм}$; $R3=4,7\text{кОм}$; $R4=2\text{кОм}$; $R5,R6=200\text{Ом}$; $R7=15\text{кОм}$; $R8=33\text{кОм}$; $C1,C4=20\text{мкФ}$; $C2,C3,C5=50\text{мкФ}$; $E_k=16\text{В}$; $VT1=KT312\text{Б}$.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольні-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Як впливає НЗЗ на частотні характеристики підсилювача?
2. Поясніть призначення всіх компонентів досліджуваної схеми.
3. Поясніть вплив НЗЗ на коефіцієнт шуму підсилювача.
4. Як впливає НЗЗ на смугу пропускання підсилювача?
5. Нарисуйте схеми підсилювачів з основними видами НЗЗ.
6. Як залежить коефіцієнт нестабільності підсилювача від виду і глибини зворотного зв'язку?

4.8 МОДЕЛЮВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

Лабораторна робота №8

Тема. Дослідження операційного підсилювача за допомогою програмного комплексу Electronics Workbench.

Мета роботи: вивчення принципів роботи, основних параметрів та характеристик операційного підсилювача ОП, дослідження ОП у схемах масштабного підсилювача, суматора, диференціатора та інтегратора в середовищі Electronics Workbench.

Теоретичні відомості

Досліджуваний підсилювач називається операційним тому, що він може використовуватись для виконання різних математичних операцій над сигналами: алгебраїчного додавання, віднімання, множення на постійний коефіцієнт, інтегрування, диференціювання, логарифмування і т.д. Операційним часто називають підсилювач напруги з великим коефіцієнтом підсилення, охоплений колом від'ємного зворотного зв'язку, який визначає основні якісні показники та характер виконуваних підсилювачем операцій. Сучасні ОП виконуються на базі інтегральних мікросхем операційних підсилювачів (ІМС ОП), до виводів яких, крім кола від'ємного зворотного зв'язку, підключаються джерело живлення, джерело вхідних сигналів, опір навантаження, кола корекції частотних характеристик та інші кола.

ОП – це підсилювач постійного струму (ППС), його амплітудно-частотна характеристика не має завалу в області низьких частот, оскільки ОП не містить роз'єднувальних конденсаторів. Для того, щоб за відсутності вхідних сигналів потенціал виходу можна було звести до нуля (потенціалу землі), живлення ОП роблять двополярним та, зазвичай, симетричним (наприклад, $\pm 12,6$ В).

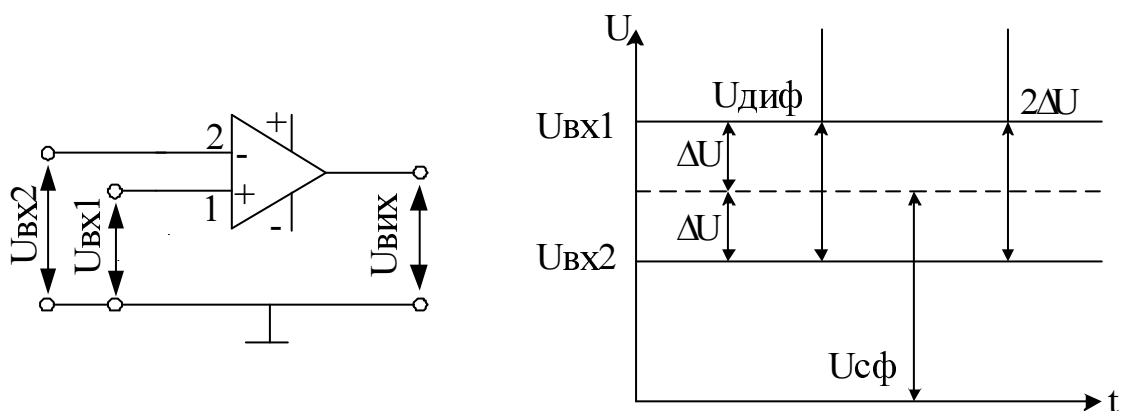


Рисунок 4.51 - Умовне позначення ОП. Види вхідних напруг

На рис. 4.51, а) показано умовне позначення ОП з одним виходом та двома входами: прямим та інверсним. Інверсний вхід 2 позначають знаком інверсії (колом) або знаком “-“. Прямий вхід 1 не має знака інверсії, його позначають знаком “+”. В загальному випадку на виводи ОП 1 та 2 надходять напруги $U_{вх1}$ та $U_{вх2}$, які називають напругами загального виду. З них виділяють синфазний $U_{сф}=(U_{вх1}+U_{вх2})/2$ та диференціальний $U_{диф}=U_{вх1}-U_{вх2}$ сигнали (рис. 4.51, б). Відносно $U_{сф}$ потенціал вхідного виводу 1 вищий, а виводу 2 – нижчий на значення ΔU , тоді диференціальний (різницевий) сигнал $U_{диф} = 2\Delta U$. Операційний підсилювач призначений для підсилення невеликого (диференційного) сигналу. Синфазний сигнал схемою ОП повинен бути максимально ослаблений. Вихідна напруга $U_{вих}$ знаходиться у фазі (синфазно) з напругою на вході 1 - $U_{вх1}$, та протифазно напрузі на вході 2 – $U_{вх2}$.

На рис. 4.52 зображено амплітудні характеристики ОП для випадків: а - вхідний сигнал подається на інверсний вхід 2, а неінверсний вхід 1 заземлений ($U_{вих}$ протифазно $U_{вх1}$); б – вхідний сигнал подається на неінверсний вхід 1, а інверсний вхід 2 заземлений ($U_{вих}$ синфазно $U_{вх1}$). Вихідну напругу $U_{вих}$ визначають відносно середньої точки джерела живлення. Якщо $U_{вх}=0$, то $U_{вих}=0$, що відображає умови балансу ОП. За відсутності зовнішнього кола зворотного зв'язку нахил амплітудних характеристик (рис. 4.52) визначається коефіцієнтом підсилення напруги ОП $K_{UОП}=\Delta U_{вих}/U_{диф}$. Характерним для амплітудних характеристик ОП є наявність двох областей насичення ($+U_{вихнас}$) та ($-U_{вихнас}$), при досягненні яких вихідна напруга залишається незмінною і не залежить від змін вхідної напруги. ОП в інтегральному виконанні характеризується великим коефіцієнтом підсилення напруги, високим вхідним та низьким вихідним опорами.

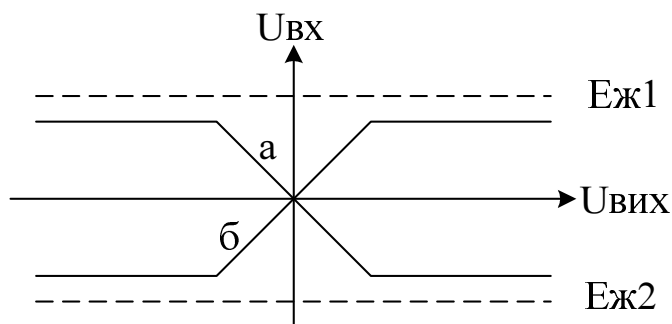


Рисунок 4.52 – Амплітудна характеристика операційного підсилювача

Залежно від того, на які входи ОП діють вхідні сигнали, розрізняють три схеми підключення ОП в інтегральному виконанні: інвертувальні, неінвертувальні та диференціальні (рис. 4.53 - 4.55). Ці схеми мають ряд загальних особливостей: 1 - наявність елементів негативного зворотного зв'язку НЗЗ; 2 – при виводі аналітичних виразів

для оцінки основних параметрів ОП приймають значення $U_{\text{диф}} \approx U_{\text{вих}}/K_{\text{УОП}} \approx 0$, так як ІМС ОП мають дуже високий коефіцієнт підсилення напруги ($K_{\text{УОП}} \rightarrow \infty$); 3 – вхідний струм вважають рівним нулю, так як ІМС ОП має високий вхідний опір ($R_{\text{вх.оп}} \rightarrow \infty$).

Інвертувальний операційний підсилювач (рис. 4.53 а). В цій схемі вхідний сигнал подається на інвертувальний (інверсний) вхід ІМС ОП, а його неінвертувальний (прямий) вхід заземлений. Підсилювач називається інвертувальним, так як вихідна напруга $U_{\text{вих}}$ інвертувальна (протифазна) відносно вхідної напруги $U_{\text{вх}}$. Від’ємний зворотний зв’язок відтворюється при допомозі опорів R_2, R_1 (паралельний НЗЗ за напругою).

Так як вхідний струм ІМС ОП $I_{\text{вх.оп}} = I_{\Sigma} \approx 0$, то

$$I_{\text{вх}} \approx I_{\text{зз}}. \quad (4.31)$$

Оскільки диференціальна вхідна напруга ОП $U_{\text{диф}} \approx 0$, $K_{\text{УОП}} \rightarrow \infty$, $R_{\text{вх.оп}} \rightarrow 0$, то $I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/R_1$, а :

$$I_{\text{зз}} = -U_{\text{вих}}/R_2 \quad (4.32)$$

Вихідна напруга в останньому виразі входить із знаком мінус, так як вона знаходиться у протифазі до вхідної напруги.

На основі співвідношень (4.31, 4.32) отримаємо вираз для визначення коефіцієнта підсилення напруг схемою інвертувального ОП:

$$K_U = -R_2/R_1. \quad (4.33)$$

Якщо ввести позначення глибини НЗЗ $\beta_{\text{НЗЗ}} = R_1/(R_1+R_2)$ яка за виконання умови $R_2 \gg R_1$ дорівнює $\beta_{\text{НЗЗ}} = R_1/R_2$, то $K_U \approx -1/\beta_{\text{НЗЗ}}$, якщо $R_1 = R_2$, то $K_{\text{УОП}} = -1$, ОП стає інвертувальним повторювачем напруги, у якого $U_{\text{вих}} = -U_{\text{вх}}$. Вхідний опір інвертувального ОП $R_{\text{вх.оп}} = R_1$, а вихідний опір $R_{\text{вих.оп}} = R_{\text{вих.оп}}/(1+\beta_{\text{НЗЗ}} K_U)$.

Неінвертувальний вхід ІМС ОП через опір R_3 з’єднаний з землею, тому його потенціал дорівнює нулю, відповідно, дорівнює нулю і потенціал інвертувального входу, оскільки $U_{\text{диф}} \approx 0$. Тому на входах цієї ІМС ОП синфазний сигнал відсутній. Оскільки $R_{\text{вх}}$ реальної мікросхеми ОП не є нескінченним, то через її входи протікають незначні вхідні струми, які при $U_{\text{вх}} \approx 0$ можуть сприяти появі помилкових змін вихідного сигналу. Для їх компенсації необхідно забезпечити рівність опорів входів ІМС ОП. Тому в схему вводиться опір $R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$.

Інвертувальний ОП (рис. 4.53, а) може використовуватись для зміни масштабу вхідної напруги множенням її на постійний коефіцієнт ($-R_2/R_1$), а також для алгебраїчного додавання вхідних сигналів (як аналоговий суматор, рис. 4.53, б). Напруга на виході такої схеми

$$U_{\text{вих}} = (R_2/R_1)(U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n), \quad (4.34)$$

якщо $R_1 = R_2 = R$, то $U_{\text{вих}} = (U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n)$.

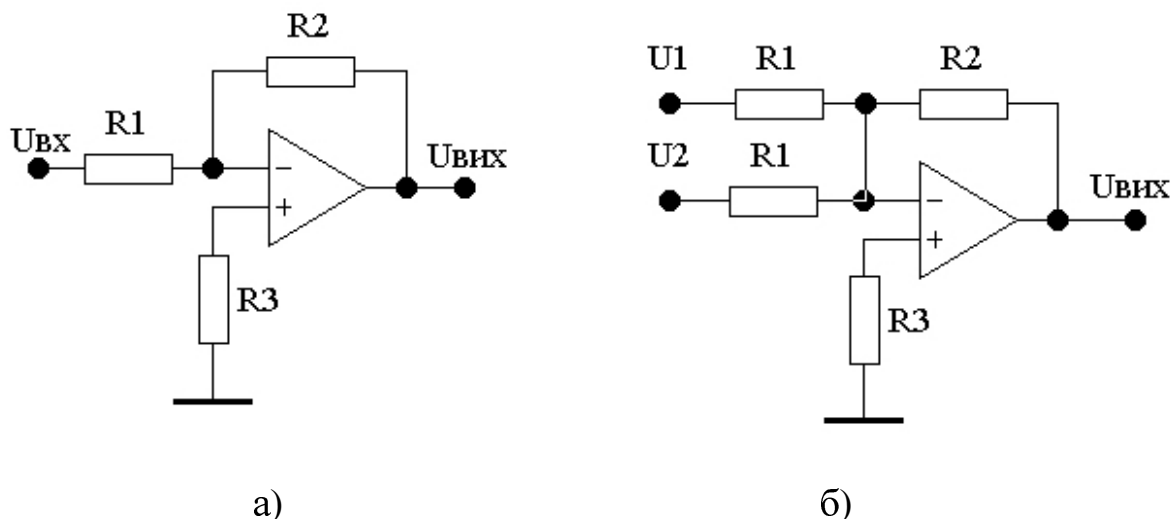


Рисунок 4.53 – а) інвертувальна схема ввімкнення ОП,
б) аналоговий суматор

Неінвертувальний операційний підсилювач (рис. 4.54). У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертувальний вхід ІМС ОП. На його інвертувальний вхід за допомогою подільника вихідної напруги, виконаного на опорах $R1$ і $R2$, подається напруга НЗЗ $U_{НЗЗ} = U_{вих}R2/(R1+R2)$. У схемі діє послідовний НЗЗ за напругою, глибина якого

$$\beta = \frac{R2}{R1 + R2}, \quad (4.35)$$

а диференційна напруга, прикладена до ІМС ОП $U_{диф} = U_{вх} - U_{НЗЗ}$.

Оскільки коефіцієнт підсилення напруги ОП $K_U \approx \infty$, то $U_{диф} \approx 0$ та

$$U_{вх} \approx U_{НЗЗ} = (U_{вих}R2)/(R1+R2). \quad (4.36)$$

Із цього співвідношення витікає, що коефіцієнт підсилення напруги схемою неінвертувального ОП

$$K_{UОП} = (R1+R2)/R2 = 1 + (R1/R2) = 1/\beta_{НЗЗ}. \quad (4.37)$$

вхідний опір неінвертувального ОП $R'_{вх.оп} = R_{вх.оп}/(1+\beta_{НЗЗ}K_U)$, а вихідний опір $R'_{вих.оп} = R_{вих.оп}/(1+\beta_{НЗЗ}K_U)$

У цьому ввімкненні ІМС ОП потенціали його входів залишаються приблизно однаковими, оскільки $U_{диф} \approx 0$, і дорівнюють значенню $U_{вх}$, тобто на входах ІМС ОП діє синфазний сигнал, значення якого близьке до $U_{вх}$. За виконання умов $R1 = 0$, $R2 \approx \infty$ вираз (4.37) прийме вигляд $K_{UОП} = 1$, тобто операційний підсилювач буде виконувати функцію неінвертувального повторювача напруги, у якого $U_{вих} = U_{вх}$ (рис. 4.54, б).

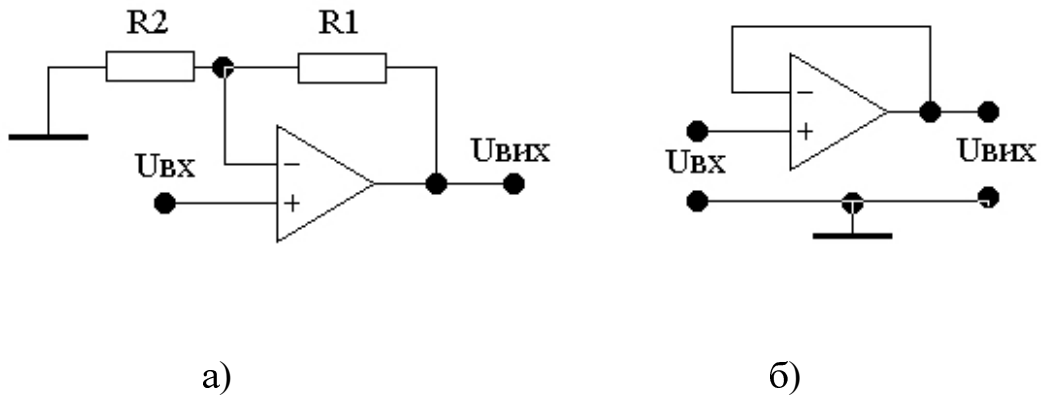


Рисунок 4.54 – а) неінвертувальний операційний підсилювач,
б) неінвертувальний повторювач напруги

Диференційний операційний підсилювач (рис. 4.55). У цій схемі на обидва входи ІМС ОП подається вхідна напруга $U_{вх1}$, та $U_{вх2}$. Підсилювач працює у лінійному режимі та є поєднанням інвертувального та неінвертувального ввімкнення ІМС ОП.

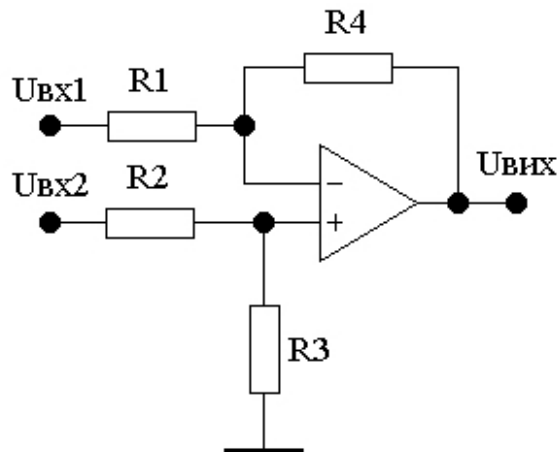


Рисунок 4.55 - Диференційний операційний підсилювач

Вихідна напруга дорівнює алгебраїчній сумі напруг, які є результатом дії сигналів на відповідних входах ІМС ОП

$$U_{вих} = ((U_{вх1} \cdot R_3) / (R_2 + R_3)) (1 + (R_4 / R_1)) - U_{вх2} (R_4 / R_1). \quad (4.38)$$

Якщо виконуються умови $R_2 = R_3$, $R_1 = R_4$, то $U_{вих} = U_{вх1} - U_{вх2}$, тобто дана схема виконує математичну дію – віднімання.

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Electronics Workbench.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні

операції Save as необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.

3. Зібрати та виконати моделювання запропонованої викладачем схеми, наведеної на рис. 4.56 – 4.60.

4. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Electronics Workbench. Для цього необхідно вибрати розділ на панелі інструментів (Sources, Basic, Diodes, Transistors, Analog Ics, Mixed Ics, Digital Ics, Logic Gates, Digital, Indicators, Controls, Miscellaneous, Instruments), в якому знаходиться потрібний елемент, потім перенести його на робочу область.

5. З'єднайте контакти елементів і розташуйте елементи в робочій області для отримання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно навести курсор на один з контактів та натиснути ліву кнопку миші і, не відпускаючи її, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження). Навівши курсор на елемент і натиснувши праву кнопку миші можна отримати швидкий доступ до найпростіших операцій над положенням елемента, такими як обертання (rotate), розвертання (flip), копіювання/вирізання (copy/cut), вставка (paste).

6. Виконайте подвійне натискання лівою кнопкою миші на вибраному елементі схеми і отримаєте можливість редагувати номінали та властивості елемента.

7. Коли схема буде складена і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (короткого замикання, відсутність нульового потенціалу в схемі) на екрані монітора з'явиться відповідне попередження.

8. Виконайте дослідження схеми, використовуючи контрольні-вимірювальні прилади. Виклик повноформатного зображення лицьової панелі приладу здійснюється подвійним натисканням лівої клавіші миші на піктограмі приладу.

9. За необхідності виконайте доступні аналізи в розділі меню Analysis. У випадку потреби можна користуватися кнопкою Pause.

10. Занесіть пояснення щодо створення схем до звіту.

11. Зробіть висновки.

Дослідження інвертувальної схеми ввімкнення ОП

1. Зібрати схему підсилювача, наведену на рис. 4.56, де $R1 = 1\text{кОм}$, $R2 = 200\text{кОм}$, $R3 = 1\text{кОм}$, $R4 = 2\text{кОм}$.

2. Зняти дані при частоті $f=1\text{кГц}$ та побудувати амплітудну характеристику. Визначити $U_{вхmax}$, при якій з'являються нелінійні викривлення вихідного сигналу.

3. Визначити вхідний та вихідний опір ОП та коефіцієнт підсилення K_U на частоті $f=1\text{кГц}$ при $U_{вх} < U_{вхmax}$.

4. Зняти дані та побудувати АЧХ при $U_{вх} < U_{вхmax}$. Визначити частоту зрізу f_3 .

5. За допомогою перемичок скласти схему інвертувального повторювача напруги, у якого $R_1=20\text{кОм}$, $R_2=20\text{кОм}$, $R_3=1\text{кОм}$, $R_4=2\text{кОм}$, зняти дані та побудувати його амплітудну характеристику на $f = 1\text{кГц}$, зняти дані та побудувати АЧХ. Визначити частоту зрізу f_3 .

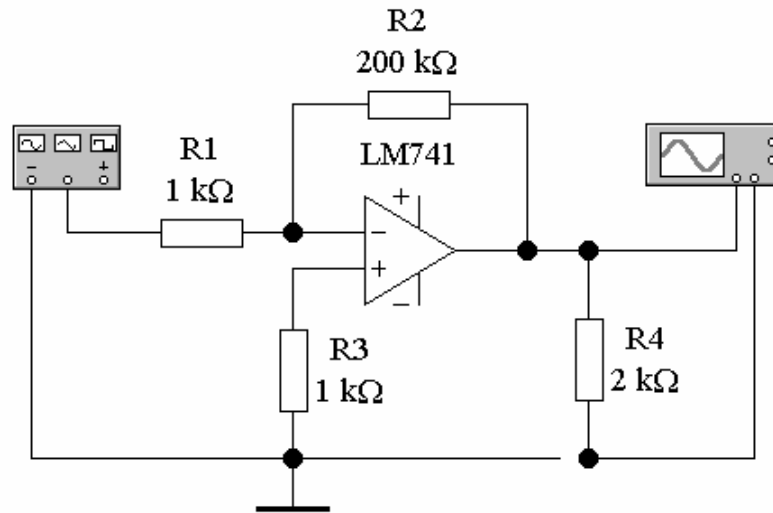


Рисунок 4.56 – Інвертувальна схема ввімкнення ОП

6. Скласти схему інвертувального суматора (рис. 4.57) для додавання двох вхідних сигналів $U_{вх1}$ та $U_{вх2}$.

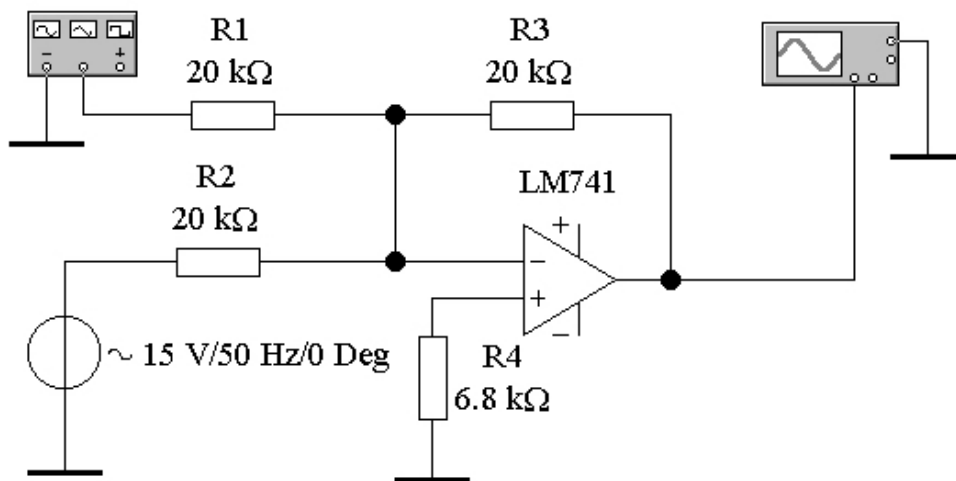


Рисунок 4.57 – Схема інвертувального суматора

В даній схемі $R_1 = R_2 = R_3 = 20\text{кОм}$. Резистор, необхідний для компенсації впливу струмів зміщення, повинен мати номінал близько $6,65\text{кОм}$. Впевнитись в тому, що $U_{вих} = -(U_{вх1} + U_{вх2})$. Як напругу $U_{вх1}$ використовувати напругу від генератора прямокутних імпульсів, як

$U_{вх2}$ - напруга від генератора синусоїдальної напруги, для наглядності необхідно виконати умову $T_1 \gg T_2$.

7. Навести вигляд осцилограм, отриманих на входах та виході суматора.

Дослідження неінвертувальної схеми ввімкнення ОП

1. Скласти схему підсилювача, наведену на рис. 4.58, де $R_1=1\text{кОм}$, $R_2=20\text{кОм}$, $R>2\text{кОм}$.

2. Виконати операції, ідентичні пунктам 2-4, які виконувались при дослідженні інвертувального ОП.

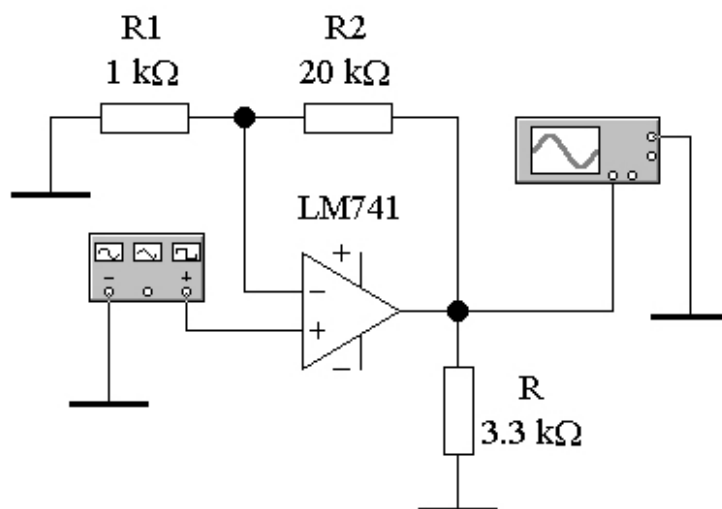


Рисунок 4.58 – Неінвертувальна схема ввімкнення ОП

3. Скласти схему неінвертувального повторювача напруги при $R > 2\text{кОм}$ (рис. 4.59) та впевнитись у правильності її функціонування.

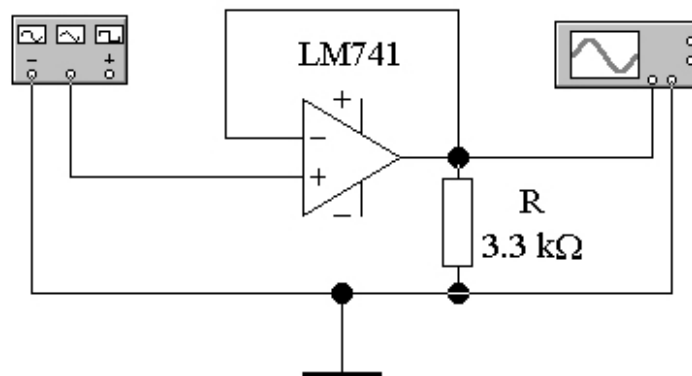


Рисунок 4.59 – Схема неінвертувального повторювача напруги

Дослідження схеми диференційного ввімкнення ОП

Скласти схему підсилювача (рис. 4.60), де $R_1 = R_4 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = R_3 = 20 \text{ кОм}$. Впевнитись в тому, що вихідна напруга $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}$. Як напругу $U_{\text{вх1}}$ використовувати синусоїдальну напругу від генератора з параметрами $U_{\text{вх1.MAX}} = 1,8 \text{ В}$, $T_1 = 12,4 \text{ мс}$, а як $U_{\text{вх2}}$ використовувати вихідний сигнал від генератора прямокутних імпульсів з параметрами $U_{\text{вх2.MAX}} = 0,6 \text{ В}$, $t_i = 700 \text{ мс}$, $f_{\text{ПОВТ}} = 200 \text{ Гц}$.

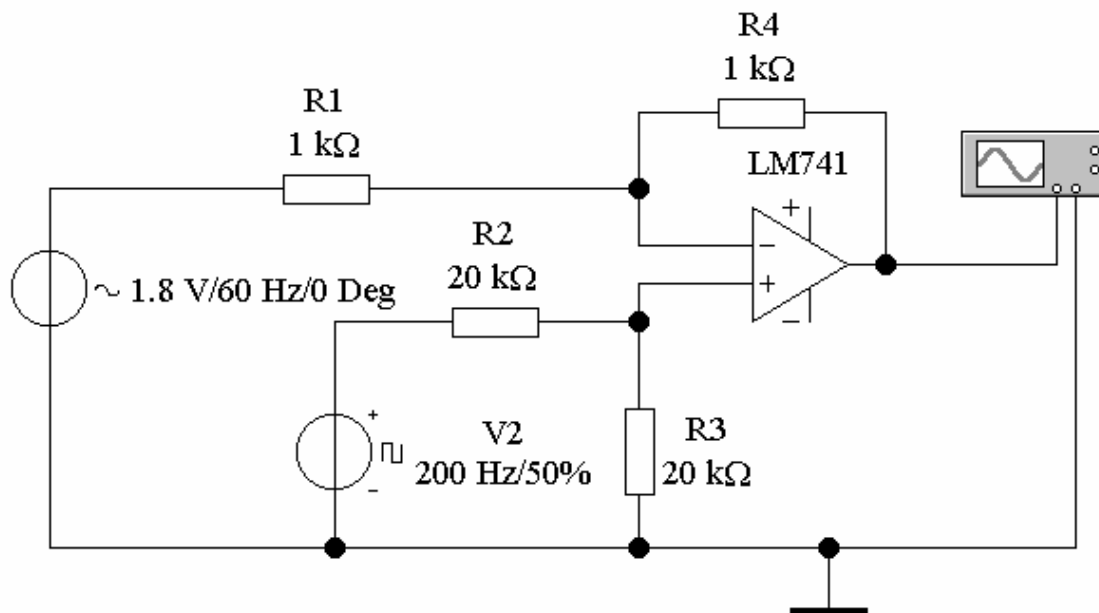


Рисунок 4.60 – Схема диференційного ввімкнення ОП

Контрольні запитання

1. Поясніть призначення, параметри, характеристики та особливості використання ОП.
2. Нарисуйте схеми інвертувального, неінвертувального та диференціального ввімкнення ОП, визначте їх основні параметри та дайте порівняльну характеристику.
3. Дайте характеристику неінвертувального та інвертувального повторювача напруги та нарисуйте їх схемну реалізацію.
4. Нарисуйте суматор напруг та дайте характеристику його особливостей.
5. Нарисуйте АЧХ ОП та операційного підсилювача, виконаного на ІМС ОП, який містить в собі елементи зворотного зв'язку. Порівняйте ці характеристики та зробіть висновки.
6. Як здійснюється та для чого необхідна корекція частотних характеристик ІМС ОП?