

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 1

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Державного університету
«Житомирська політехніка»
протокол від 12.06.2025 р.
№ 04

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ для проведення лабораторних робіт з навчальної дисципліни «ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА» (ЧАСТИНА 1)

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»
спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні
системи»

факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Рекомендовано на засіданні
кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій
«02» квітня 2025р., протокол № 4

Розробник: к.т.н., доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
ЧЕПЮК Ларіна, асистент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій
ВОРОНОВА Тетяна

Житомир
2025

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 2

Методичні рекомендації для проведення лабораторних робіт з дисципліни «ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА» для студентів спеціальності 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»/ Укладачі Л.О. Чепюк, Т.С.Воронова, – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2025. – 58 с.

Укладачі: Л.О. Чепюк, Т.С.Воронова

Рецензенти:

к.т.н., доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Громовий О.А.,

к.т.н., доцент, доцент кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Гуменюк А.А.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 58 / 3</i>

ЗМІСТ

Лабораторна робота 1

Дослідження електронних схем в середовищі програми Multisim 4

Лабораторна робота 2

Дослідження напівпровідникових діодів..... 29

Лабораторна робота 3

Дослідження біполярних транзисторів у режимі підсилення..... 38

Лабораторна робота 4

Дослідження схем на операційному підсилювачі..... 45

ДОДАТКИ 53

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 4

Лабораторна робота № 1

ОСВОЄННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ В СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМИ ELECTRONICS WORKBENCH (MULTISIM).

Мета роботи

- 1) ознайомлення з принципами роботи в середовищі програми Multisim, придбання навичок побудови електронних схем та їх дослідження за допомогою віртуальних вимірювальних приладів.
- 2) набуття навичок дослідження електронних схем в середовищі Multisim;
- 3) вивчення властивостей RC-схем та їх вплив на спотворення аналогових та імпульсних інформаційних сигналів;
- 4) набуття навиків дослідження амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик (АЧХ та ФЧХ) електричних схем за допомогою віртуальних моделей вимірювальної апаратури;
- 5) експериментальне визначення параметрів частотно-залежних RC-схем, за яких забезпечуються допустимі спотворення інформаційних сигналів.

1.1. Основні теоретичні відомості

Розробка будь-якого радіоелектронного пристрою супроводжується фізичним та математичним моделюванням. Фізичне моделювання пов'язано з великими матеріальними витратами, оскільки потрібно виготовляти макети. Математичне моделювання з використанням засобів та методів обчислювальної техніки спрощує процедуру проектування електронних схем й дозволяє вивчити та засвоїти основні властивості цих схем, виявити помилки, скорегувати ці схеми перед їх фізичною реалізацією.

Математичне моделювання проводиться за допомогою програми Multisim, яка розроблена провідною корпорацією, що спеціалізується у галузі розробки інформаційно-вимірювальних систем, в том у числі й електронних пристроїв, що входять до їх складу.

Особливістю програми Multisim є наявність контрольно-вимірювальних приладів, які за зовнішнім виглядом, органами керування і характеристиками максимально наближені до реальних аналогів. Це сприяє отриманню практичних навичок роботи з найбільш поширеними приладами: мультиметром, осцилографом, генератором сигналів та ін.

1.1.1. Структура вікна і система меню програми Multisim.

Вікно програми Multisim (рис.1.1) має зверху поле меню, панель інструментів та панель бібліотек компонентів, справа – панель контрольно-вимірювальних приладів, зліва – вікно розробки. Також є підказки до всіх елементів вікна програми, що з'являються при наведенні курсору миші на елемент. Розглянемо призначення основних елементів вікна Multisim.

Поле меню має компоненти, що зображені на рис. 1.2.

Меню «File» призначено для відкриття та збереження існуючих файлів, створення нових файлів та проектів, відправлення на друк різних компонентів створюваних проектів та закриття програми Multisim.

Меню «Edit» дозволяє виконувати команди редагування схем та задавати властивості листів схем.

Меню «View» дає можливість керувати зовнішнім виглядом програми та схем.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 5

Меню «Place» містить набір команд для створення схем.

Меню «MCU» містить команди, які дозволяють писати та відлагоджувати програми для мікроконтролерів.

Меню «Simulate» використовується при підготовці та визначенні параметрів моделювання, при виборі вимірювальних інструментів та для вмикання і припинення моделювання.

Меню «Transfer» дозволяє експортувати/імпортувати розроблені електричні схеми в інші програми.

Меню «Tools» дає можливість редагувати властивості електронних компонентів, що використовуються в програмі.

Меню «Reports» дозволяє виводи різні звіти по розробленій схемі.

Меню «Options» призначено для редагування глобальних опцій програми Multisim та електронних схем.

Меню «Windows» призначено для організації віконного інтерфейсу програми.

Меню «Help» дає доступ до довідки по програмі Multisim.

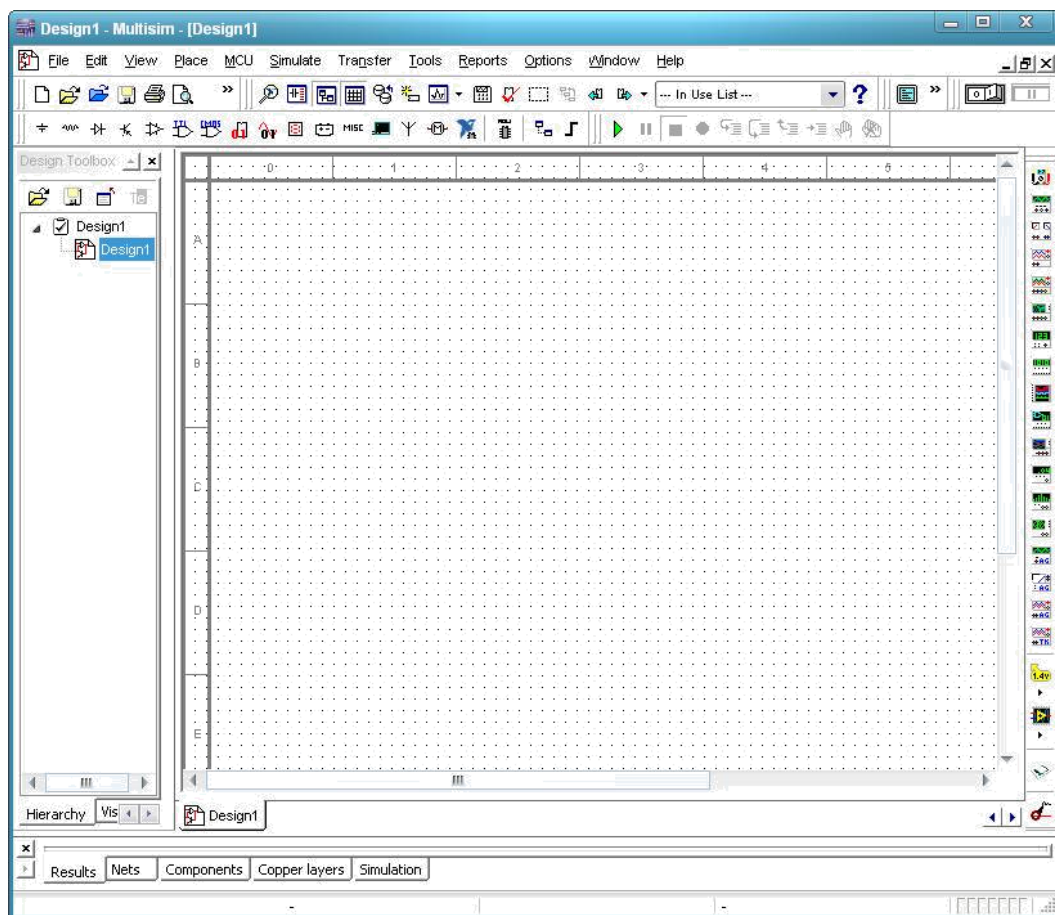


Рис. 1.1 Вікно програми Multisim

Елементи панелі інструментів (рис. 1.3) дублюють деякі команди різних меню.

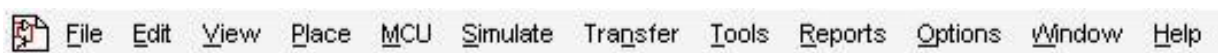


Рис. 1.2 Поле меню програми Multisim

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 6



Рис. 1.3 Панель інструментів Multisim

Панель компонентів та контрольно-вимірювальних приладів використовують при побудові та дослідженні електронних схем. Більш докладно вони будуть розглянуті в ході виконання наступних лабораторних робіт.

1.1.2. Процес створення схем.

Перш ніж створювати креслення принципової схеми засобами програми Multisim, необхідно на листі папера підготувати її ескіз із приблизним розташуванням компонентів і з урахуванням можливості оформлення окремих фрагментів у виді підсхем. Доцільно також ознайомитися з бібліотекою готових схем програми для вибору аналога (прототипу) або використання наявних рішень у якості підсхем.

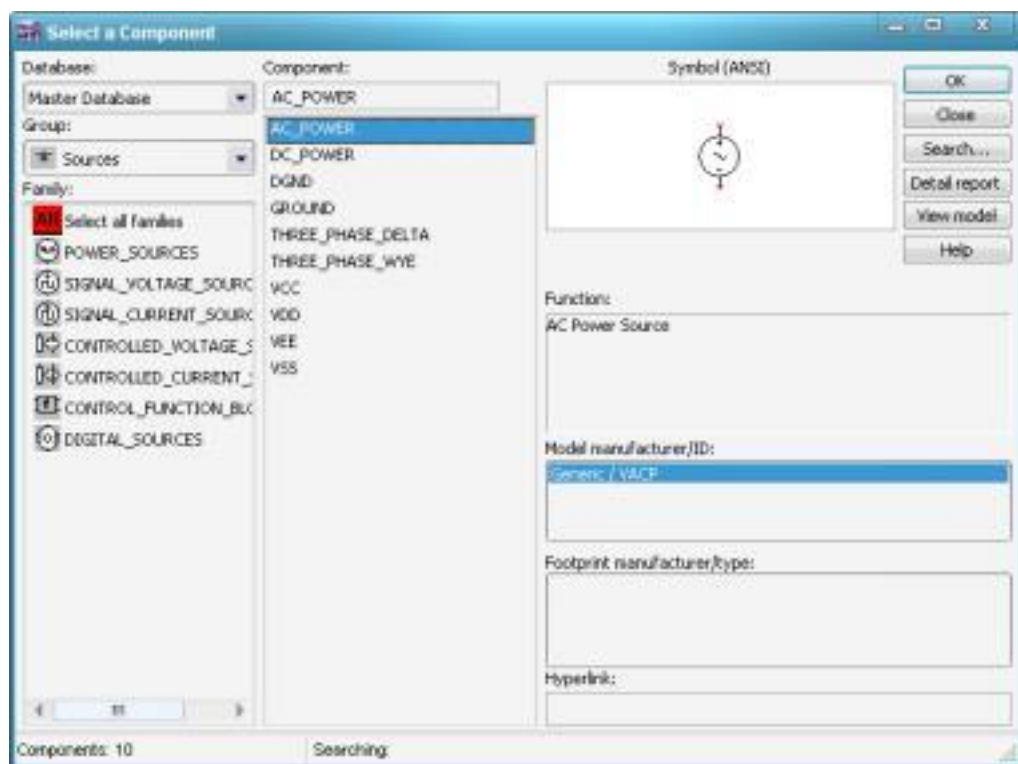


Рис. 1.4 Елементи, що знаходяться в підгрупі POWER_SOURCES бібліотеки Sources

В загальному випадку процес створення схеми починається з розміщення на робочому полі Multisim компонентів із бібліотек програми відповідно до підготовленого ескізу. Розділи бібліотеки програми Multisim по черзі можуть бути викликані за допомогою іконок, розташованих на панелі компонентів (див. рис. 1.1). Після відкриття обраної бібліотеки з'явиться вікно, схоже на те, що показано на рис. 1.4.

Спочатку необхідно вибрати підгрупу (Family), після чого з'явиться доступний в цій підгрупі перелік елементів (Component). Вибравши необхідний елемент натискають кнопку ОК, і на робочому полі програми з'являється контур обраного елементу. Він переноситься на заплановане місце, після чого знову натискається ліва кнопка миші (для фіксування символу). На цьому етапі необхідно передбачити місце для розміщення контрольних точок і іконок контрольно-вимірювальних приладів.

Після розміщення компонентів необхідно з'єднати їхні виводи провідниками (рис. 1.5). При цьому необхідно враховувати, що до виводу компонента можна підключити тільки один провідник. Для виконання підключення курсор підводиться до виводу компонента і після появи круглої площадки чорного кольору (див. рис. 1.5,б) натискається ліва кнопка і провідник, що з'являється при цьому (рис. 1.5,в), тягнеться до виводу іншого компонента до появи на ньому такої ж круглої площадки (рис. 1.5,г), після чого кнопка миші знову натискається, і з'єднання готове (рис. 1.5,д).

При необхідності підключення до цих виводів інших провідників у меню «Place» вибирається пункт «Junction (Ctrl+J)». Точка (символ з'єднання), що з'явилася, переноситься на раніше встановлений провідник. Якщо ця точка дійсно має електричне з'єднання з провідником, то вона стає такого ж кольору, що і провідник. Якщо на ній видно слід від провідника, що її перетинає, то електричного з'єднання немає і точку необхідно установити заново. Після вдалої установки до точки з'єднання можна підключити ще два провідники (всього 4 провідника на 1 точку з'єднання).

Якщо з'єднання потрібно розірвати, курсор підводиться до лінії провідника, яку потрібно знищити, і натискається ліва кнопка. Провідник при цьому виділяється. Потім треба натиснути клавішу Delete і провідник буде видалено.

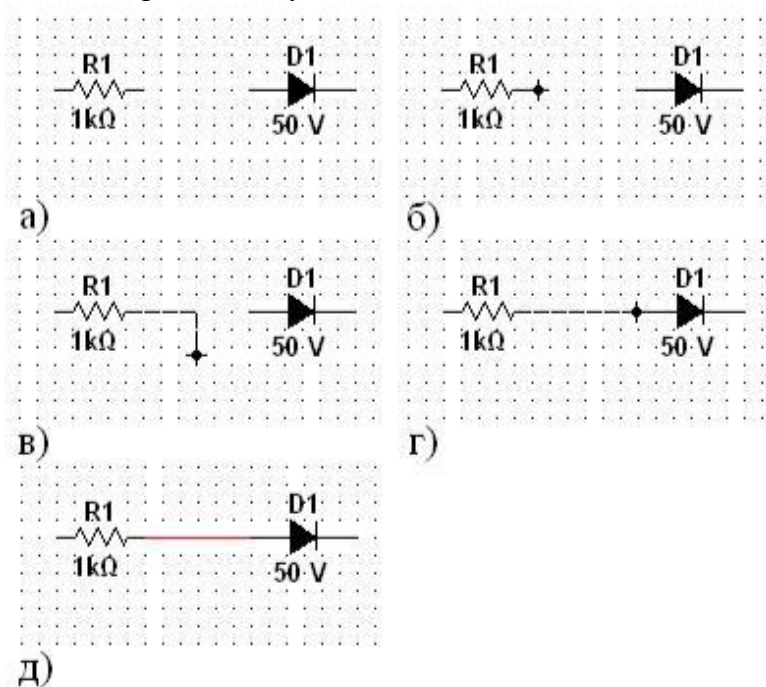


Рис. 1.5. З'єднання двох елементів схеми провідниками в програмі Multisim:

- а) два окремих компонента; б) виділено вивід першого компонента;
- в) ведеться з'єднувальний провід; г) провід підведено до другого компонента;
- д) з'єднання готове

Якщо необхідно змінити підключення наявних виводів (рис. 1.6), то спочатку курсор миші підводиться до виводу, який треба від'єднати. При цьому курсор змінює форму на стрілку (рис.1.6,б). Після одного натискання лівої кнопки миші курсор стає чорною круглою площадкою, а частина з'єднувального проводу стає переривчастою (рис. 1.6,в). Потім контакт ведеться до нового компонента (рис. 1.6,г). Старе з'єднання все ще залишається видимим. Після підведення контакту до виводу компоненту (рис. 1.6,д) треба ще раз натиснути ліву кнопку миші і нове з'єднання буде встановлено (рис. 1.6,е). Слід зазначити, що прокладка сполучних провідників проводиться автоматично, причому перешкоди – компоненти або інші провідники – огинаються за ортогональними напрямками (по горизонталі або вертикалі).

Якщо необхідно перемістити окремий сегмент провідника, до нього підводиться курсор, натискається ліва кнопка і, після появи у горизонтальній або вертикальній площині подвійного курсору ($\leftrightarrow$ або $\updownarrow$), роблять потрібні переміщення.

Додавання в схему контрольно-вимірювальних приладів проводиться аналогічно підключенню будь-якого іншого компоненту схеми. Причому для таких приладів, як осцилограф або логічний аналізатор, з'єднання доцільно проводити кольоровими провідниками, оскільки їхній колір визначає колір відповідної осцилограми. Кольорові провідники доцільні не тільки для позначення провідників однакового функціонального призначення, але і для провідників, що знаходяться в різних частинах схеми (наприклад, провідники шини даних до і після буферного елемента).

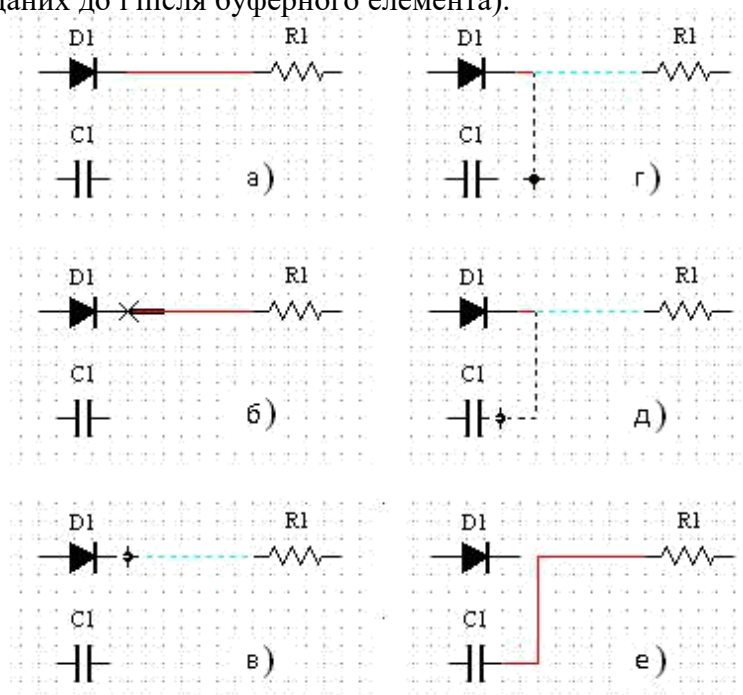


Рис. 1.6 Зміна наявних з'єднань: а) початковий стан; б) зміна форми курсору миші при виборі виводу; в) зміна форми курсору після натискання кнопки миші; г) прокладення нового з'єднання; д) приєднання нового компонента; е) нове з'єднання

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 9

1.1.3. Основні контрольно-вимірювальні прилади.

Панель контрольно-вимірювальних приладів знаходиться у правій частині вікна програми Multisim. До її складу входять: мультиметр (Multimeter), функціональний генератор (Function Generator), ватметр (Wattmeter), осцилограф (Oscilloscope), чотирьохканальний осцилограф (4 Channel Oscilloscope), вимірювач АЧХ та ФЧХ (Bode plotter), частотомір (Frequency Counter), генератор слова (Word Generator), логічний аналізатор (Logic Analyzer), логічний перетворювач (Logic Converter), вимірювач вольт-амперних характеристик діодів та транзисторів (IV Analysis), аналізатор нелінійних спотворень (Distortion Analyzer), спектроаналізатор (Spectrum Analyzer), аналізатор мережі для вимірювання S-параметрів схеми (Network Analyzer) та ін. Розглянемо ті прилади, які будуть використовуватись у лабораторних роботах.

1.1.3.1. Мультиметр

На лицьовій панелі мультиметра (рис. 1.7,в) розташовано дисплей для відображення результатів вимірювань, клеми для підключення до схеми і кнопки керування.

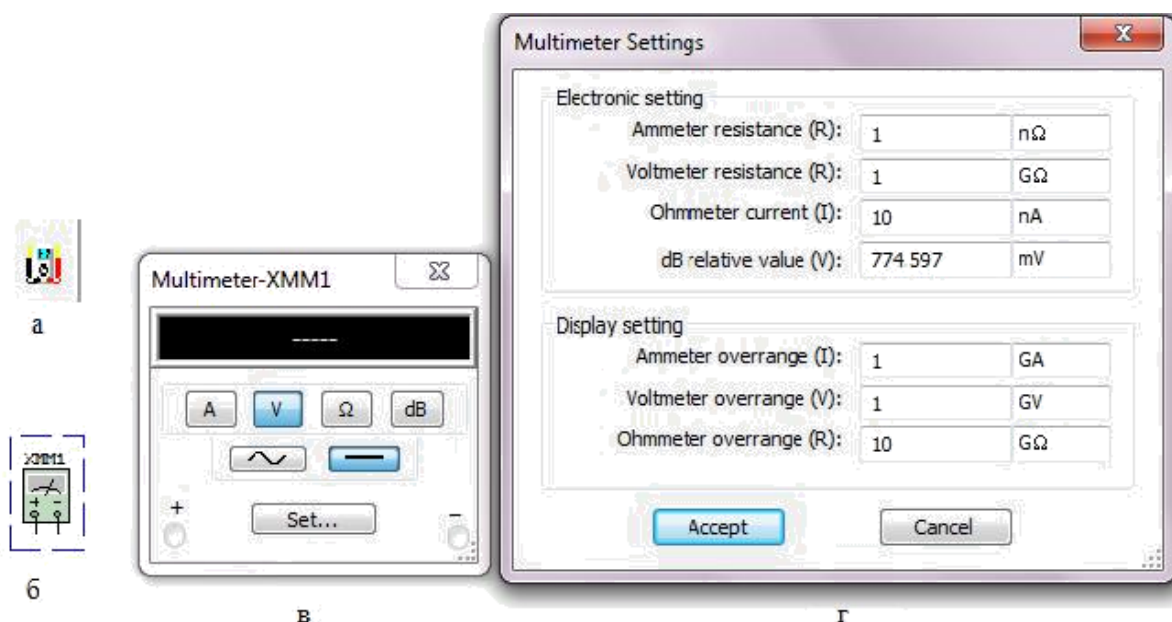


Рис. 1.7 Мультиметр: а) позначення на панелі контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі;

в) лицьова панель; г) вікно установок режимів роботи

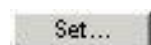
Розглянемо призначення кнопок керування:



- вибір режиму вимірювання струму, напруги, опору та послаблення (згасання);



- вибір режиму вимірювання змінного або постійного струму;



- режим установки параметрів мультиметра. Після натискання на цю кнопку відкривається діалогове вікно (рис. 1.7,г), на якому позначені:

Ammeter resistance - внутрішній опір амперметра;

Voltmeter resistance - вхідний опір вольтметра;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 10

Ohmmeter current - струм через контрольований об'єкт при вимірюванні опору.

Слід зазначити, що мультиметр вимірює ефективне (діюче) значення змінного струму.

1.1.3.2. Функціональний генератор

Функціональний генератор наведений на рис. 1.8.

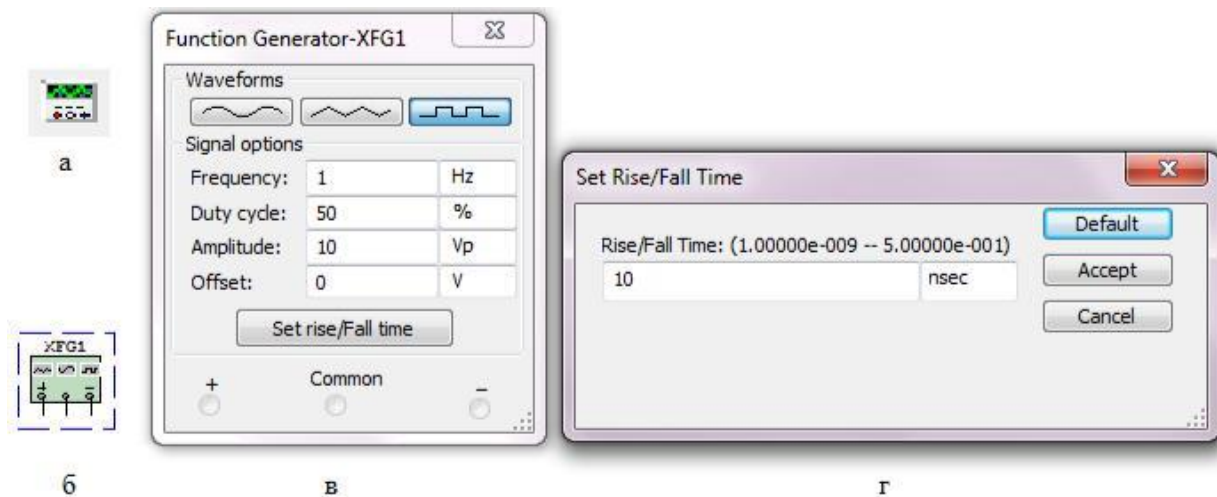
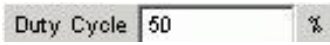
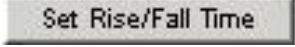
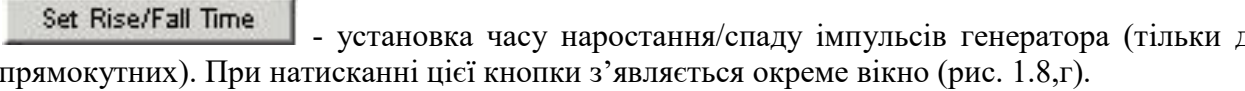


Рис. 1.8 Функціональний генератор: а) позначення на панелі контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі; в) лицьова панель; г) вікно встановлення часу наростання/спаду прямокутних імпульсів

Керування генератором здійснюється наступними органами керування:

-  - вибір форми вихідного сигналу: синусоїдальна (за умовчанням), трикутна і прямокутна;
-  - установка частоти вихідного сигналу;
-  - установка коефіцієнта заповнення в %: для синусоїдального сигналу не задається; для імпульсних сигналів це відношення тривалості імпульсу до періоду повторення - величина, зворотна шпаруватості; для трикутних сигналів - співвідношення між тривалостями переднього і заднього фронтів;
-  - установка амплітуди вихідного сигналу;
-  - установка зсуву (постійної складової) вихідного сигналу;
-  - установка часу наростання/спаду імпульсів генератора (тільки для прямокутних). При натисканні цієї кнопки з'являється окреме вікно (рис. 1.8,г).
-  - умовне позначення вихідних клем; при заземленні клеми Common (загальний) на клеммах «-» і «+» отримуємо парафазний сигнал.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 11

1.1.3.3. Ватметр

На лицьовій панелі ватметра (рис. 1.9,в) розташовано дисплей для відображення результатів вимірювань, дисплей для відображення коефіцієнта потужності та клем для підключення до схеми.

Коефіцієнт потужності дорівнює косинусу фазового кута між напругою та струмом на вимірюваній ділянці.

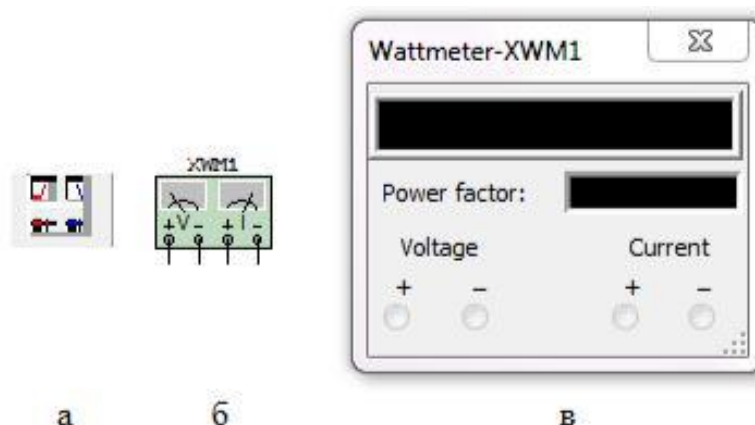


Рис. 1.9 Ватметр: а) позначення на лінійці контрольно-вимірювальних приладів; б) позначенні на схемі; в) лицьова панель

1.1.3.4. Осцилограф

Лицьова панель осцилографа показана на рис. 1.10,в. Осцилограф має канали (Channel) і В із роздільним регулюванням чутливості в діапазоні від 10 мкВ/поділлка ($\mu\text{V}/\text{Div}$) до 5 кВ/поділлка (kV/Div) і регулюванням зсуву по вертикалі (Y position).

Вибір режиму по входу здійснюється натисканням кнопок **AC**, **0**, **DC**. Режим AC призначений для спостереження тільки сигналів змінного струму (його ще називають режимом «закритого входу», оскільки в цьому режимі на вході підсилювача включається роздільний конденсатор, що не пропускає постійну складову). У режимі 0 вхідний вивід замикається на землю. У режимі DC (включений за замовчуванням) можна проводити осцилографічні вимірювання як постійного, так і змінного струму. Цей режим ще називають режимом «відкритого входу», оскільки вхідний сигнал надходить на вхід вертикального підсилювача безпосередньо. З правої сторони від кнопки DC розташовано умовне позначення вхідного виводу. Канал В має ще додатково кнопку **-**, при натисканні на яку інвертується сигнал каналу В.

Режим розгортки вибирається кнопками **Y/T**, **Add**, **B/A**, **A/B**. У режимі Y/T (звичайний режим, включений за замовчуванням) реалізуються наступні режими розгортки: по вертикалі - напруга сигналу, по горизонталі — час; в режимі B/A: по вертикалі - сигнал каналу В, по горизонталі - сигнал каналу А; в режимі A/B: по вертикалі сигнал каналу А, по горизонталі - сигнал каналу В; в режимі Add: по вертикалі - сума сигналів входів А та В, по горизонталі - час.

В режимі Y/T тривалість розгортки (Time base) може бути задана в діапазоні від 0,1 нс/поділлка (ns/div) до 1 с/поділлка (s/div) з можливістю установки зсуву в тих же одиницях по горизонталі, тобто по осі X (X position).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 12

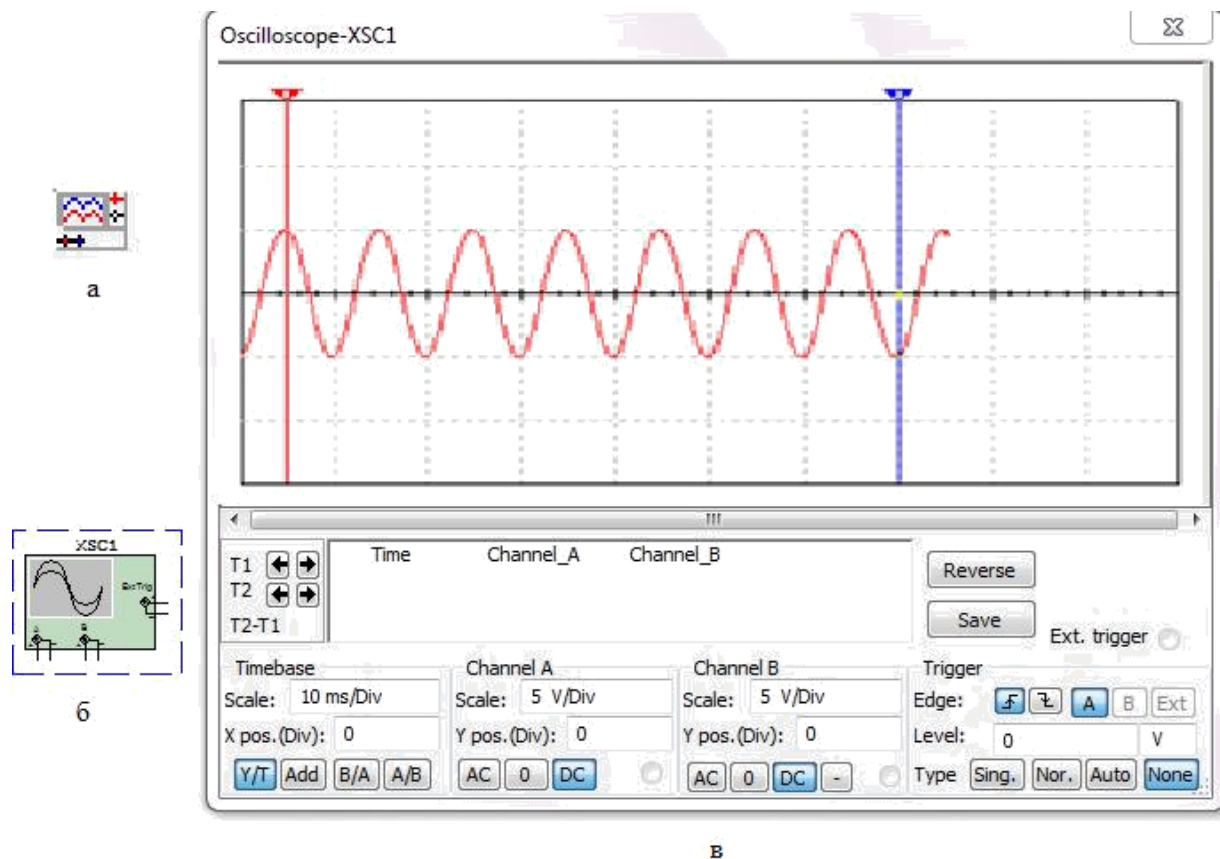


Рис.1.10 Осцилограф: а) позначення на лінійці контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі; в) лицьова панель

В режимі Y/T передбачений також режим очікування (Trigger) із запуском розгортки (Edge) по передньому або задньому фронту тригерного сигналу (вибирається натисканням кнопок) при регульованому рівні (Level) запуску. Тригерний сигнал може бути як внутрішнім (від каналу A або B), так і зовнішнім (Ext). Вибір виконується натисканням кнопок

. Кнопка Sing. використовується у випадку, коли запуск потрібно зробити одноразовим. В цьому випадку зображення на екрані осцилографа перестане змінюватися після того, як екран повністю заповниться. При натиснутій кнопці Nor екран осцилографа оновлюється кожен раз, як приходить тригерний сигнал.

Заземлення осцилографа здійснюється за допомогою клєми Ground у правому верхньому куті приладу.

У осцилографі є можливість прокручування зображення по горизонталі і його сканування за допомогою вертикальних візирних ліній (синій і червоний кольори), що за трикутні вушка (вони позначені цифрами 1 і 2) можуть бути курсором встановлені в будь-яке місце екрана. При цьому в індикаторних віконцях під екраном приводяться результати вимірювання напруги, часових інтервалів і їхніх різниць (між візирними лініями).

Зображення можна інвертувати натисканням кнопки Reverse і записати дані у файл натисканням кнопки Save.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 13

1.1.3.5. Вимірювач АЧХ та ФЧХ

Лицьова панель вимірювача показана на рис.11,в.

Вимірювач призначений для побудови і аналізу амплітудно-частотних (при натиснутій кнопці Magnitude, включено за замовчуванням) і фазо-частотних (при натиснутій кнопці Phase) характеристик при логарифмічній (кнопка Log, включено за замовчуванням) або лінійній (кнопка Lin) шкалі по осях Y (Vertical) і X (Horizontal). Налаштування вимірювача полягає у виборі меж вимірювання коефіцієнта передачі і варіації частоти за допомогою кнопок у віконцях F - максимальне і I - мінімальне значення. Значення частоти і відповідне їй значення коефіцієнта передачі або фази відображаються у віконцях у правому нижньому куті вимірювача. Значення зазначених величин в окремих точках АЧХ або ФЧХ можна одержати за допомогою вертикальної візирної лінійки, що знаходиться у вихідному стані на початку координат і переміщуваної за графіком мишею або кнопками ← і →. Результати вимірювань можна записати також у текстовий файл. Для цього необхідно натиснути кнопку Save і в діалоговому вікні вказати ім'я файлу (за замовчуванням пропонується ім'я схемного файлу). В отриманому в такий спосіб текстовому файлі з розширенням .bod АЧХ і ФЧХ представлено в табличному виді.

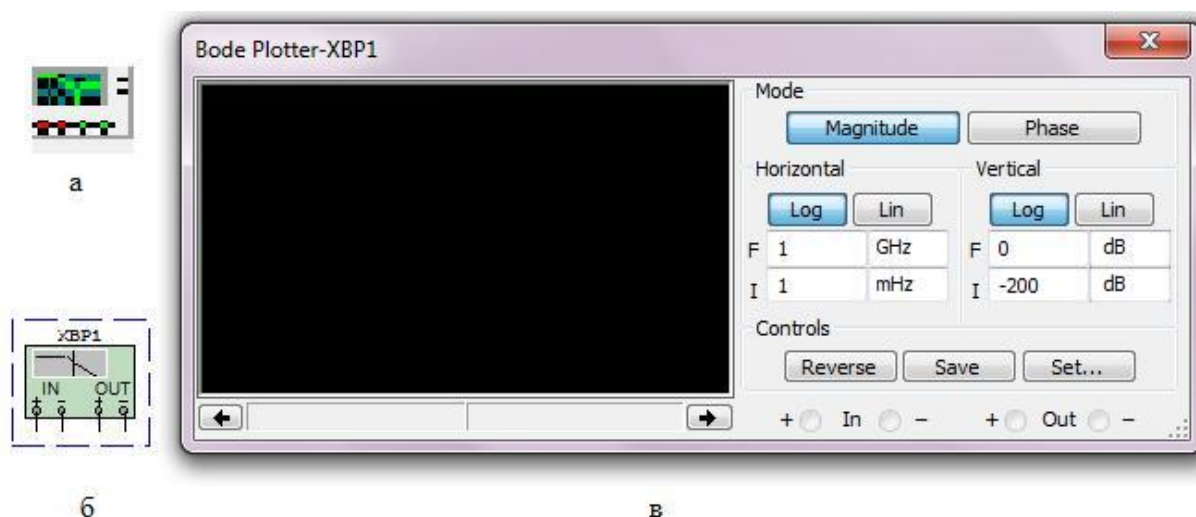


Рис. 1.11 Вимірювач АЧХ та ФЧХ: а) позначення на лінійці контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі; в) лицьова панель

Підключення приладу до досліджуваної схеми здійснюється за допомогою контактів In (вхід) і Out (вихід). Ліві клеми контактів підключаються відповідно до входу і виходу досліджуваного пристрою, а праві - до загальної шини. До входу пристрою необхідно підключити функціональний генератор або інше джерело змінної напруги, при цьому не треба робити ніяких налаштувань у цих пристроях

1.1.4. Робота з потенціометром.

Потенціометр – це регульований подільник електричної напруги, що являє собою, як правило, резистор з рухомим відвідним контактом. Однак зараз існують і цифрові потенціометри, що являють собою інтегральну схему, яка не має рухомих частин і дозволяє програмно виставляти опір.

В Multisim потенціометри знаходяться в бібліотеці Basic, вкладка POTENTIOMETR. Віртуальний потенціометр знаходиться у вкладці RATED_VIRTUAL. Робота з потенціометром потребує деяких пояснень, враховуючи, що в більшості лабораторних робіт вони використовуватимуться. Важливо пам'ятати, що загальний опір потенціометра в Multisim залежить від способу включення «рухомої» частини (позначена стрілкою, над якою стоїть величина у відсотках). Якщо потенціометр включено так, як показано на рис. 1.12, то загальний опір розраховуватиметься як:

$$R = \frac{x}{100} \cdot R_{\max},$$

де x – величина у %, що стоїть над стрілкою, $R_{\max}$ – максимальне значення опору.

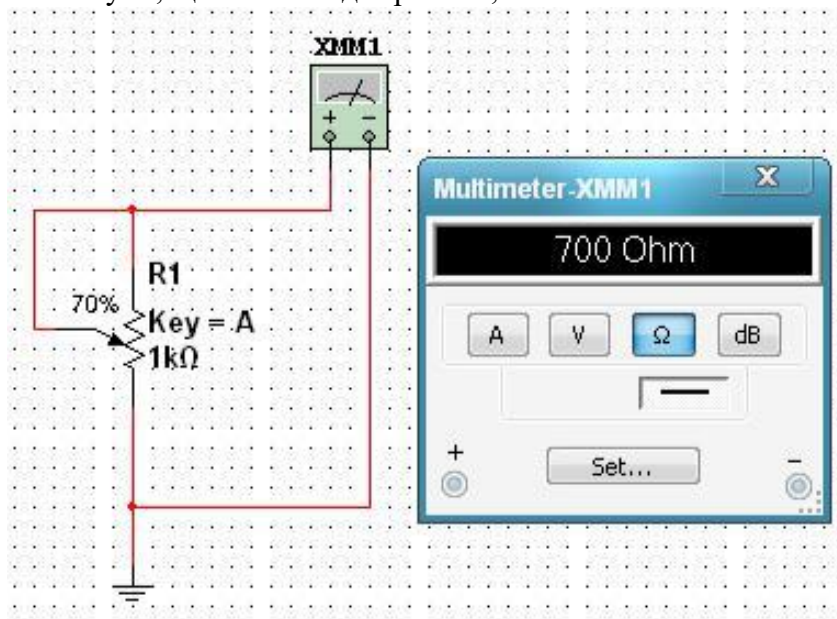


Рис. 1.12 Перший спосіб включення потенціометра

Якщо потенціометр включено так, як показано на рис. 1.13, то загальний опір розраховуватиметься як:

$$R = \frac{(100 - x)}{100} \cdot R_{\max}.$$

1.1.5. Аналіз схем у часовій та частотній областях.

В імпульсних та цифрових системах одним із важливих параметрів є швидкодія. Для визначення цього параметра використовують тестові сигнали. Порівнюючи реакцію на виході схеми із сигналом, що подається на вхід, визначають необхідні параметри та характеристики схеми. Так роблять не лише при теоретичних розрахунках, але і під час налаштування апаратури.

Для оцінки швидкодії як тестові використовують сигнали, що описуються східчастою функцією, або прямокутні імпульси. При цьому реакція та складні радіоелектронні схеми при їх аналізі зображають за допомогою еквівалентних схем, що містять в собі резистори, конденсатори, індуктивності, керовані генератори струму та напруги. У таких схемах інерційність, наявність часових та частотних спотворень моделюють за допомогою L - та C -елементів. Електричні кола з елементами, що накопичують енергію (C та L) суттєво відрізняються від кіл, що складаються виключно з резисторів. В останніх з вимкненням

незалежних джерел усі напруги і струми миттєво стають рівними нулю. Навпаки, в електричних колах з C - та L -елементами струми і напруги залишаються деякий час навіть після вимкнення незалежних джерел. Ці напруги та струми зменшуються за відповідним для даної схеми законом. Перехідний процес продовжується доти, доки вся накопичена енергія не розсіється на резисторах.

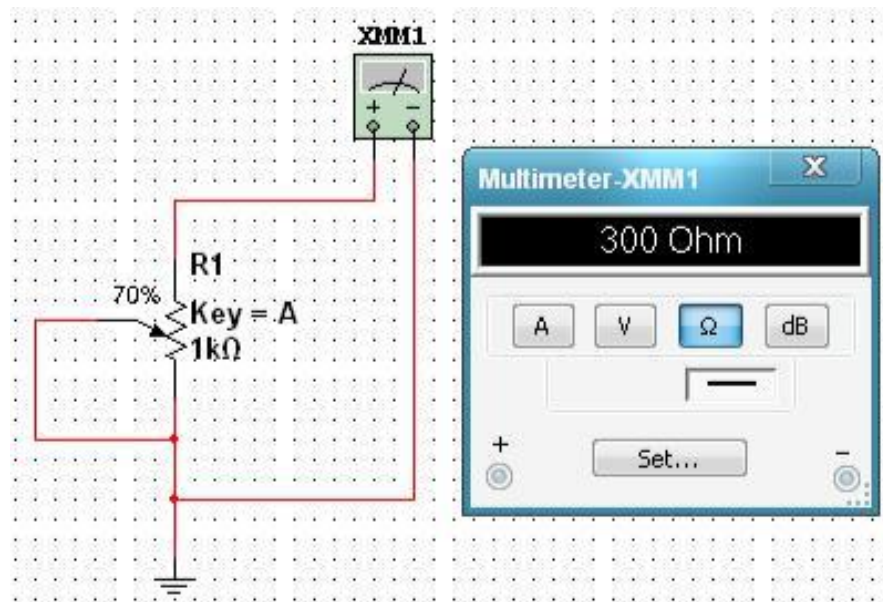


Рис. 1.13 Другий спосіб включення потенціометра

Параметри та можливості використання конкретної схеми можна оцінювати аналізуючи процеси в RC - та RL -колах. У лабораторній роботі досліджуються тільки RC -кола. У схемах можуть бути безліч комбінацій резисторів з конденсаторами.

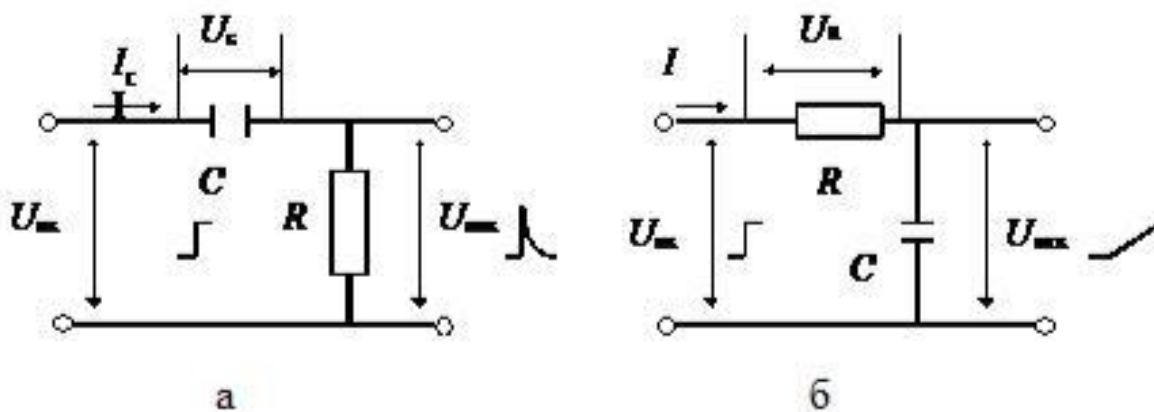


Рис.1.14 Прості RC -схеми: а - диференціююча; б - інтегруюча

Шляхом різних перетворювань згадані комбінації зводяться до двох типів RC -схем: диференціальна (рисунок 1.14, а) та інтегруючих (рисунок 1.14, б).

Перехідна характеристика схеми, що є реакцією на вхідний сигнал у вигляді одиничного скачка, являє собою характеристику, яка дозволяє визначити тривалість переходу схеми з одного стану в інший і дає можливість оцінити швидкодію. Таким чином схеми досліджують у часовій області, що дозволяє оцінити часові спотворення сигналів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідас ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 16

Для значного класу електричних та електронних схем важливим є оцінка їх спроможності передавати (підсилювати) сигнали у необхідному діапазоні частот, тобто мати необхідну смугу пропускання. Для цього використовують частотні параметри схем, а аналіз проводять у частотній області. У цьому випадку як тестові використовують гармонічні сигнали різної частоти.

Електричні кола, побудовані винятково на ідеальних резисторах, не змінюють співвідношення опорів зі змінюванням частоти вхідного сигналу, а тому мають сталий коефіцієнт передачі напруги. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) схеми, тобто залежність модуля коефіцієнта передачі по амплітуді від частоти $K_U(\omega)$, у цьому випадку являє собою горизонтальну лінію.

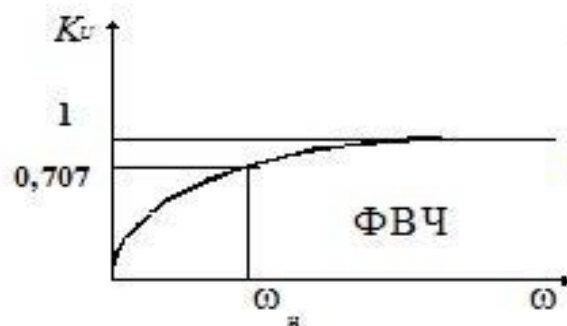


Рис. 1.15 Частотна характеристика диференційної схеми

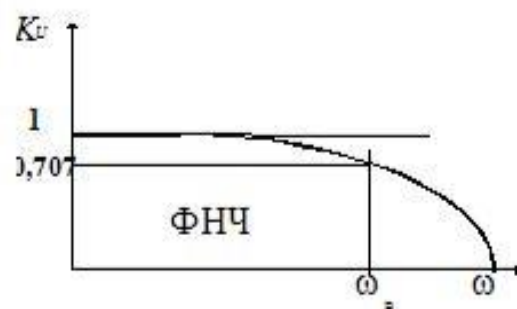


Рис. 1.16 Частотна характеристика інтегруючої схеми

Наявність передбачених та непередбачених (паразитних) ємностей та індуктивностей зумовлює значну залежність коефіцієнта передачі схеми від частоти (рис. 1.15, 1.16).

1.1.6. Перехідна характеристика диференціальних RC- схем.

Тобто перехідний процес залежить від процесу зарядження конденсатора.

При вмиканні конденсатора до джерела з напругою $U_{вх}$ (рис. 1.17,а) напруга на ньому (заряд конденсатора) змінюється за експонентою (рис. 1.17, б):

$$U_c = U_{вх} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1.1)$$

Напруга на виході:

$$U_{вих} = U_{вх} - U_c = U_{вх} \times e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1.2)$$

У початковий момент ($t = 0$) напруга на конденсаторі дорівнює нулю, а напруга на виході стрибком досягає максимального значення, яке дорівнює амплітуді вхідного сигналу

(рис. 1.17, в). Зразу ж починається зарядження конденсатора зі сталою часу $\tau = RC$. Це дуже важливий момент.

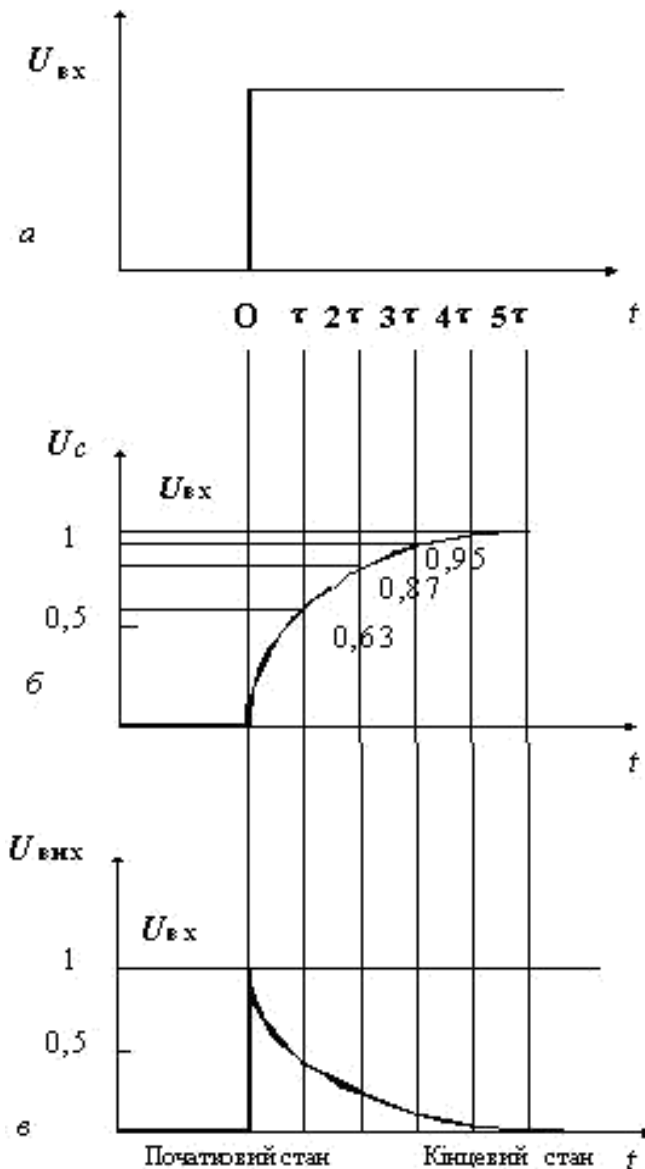


Рис. 1.17 Перехідні процеси в диференційній RC-схемі

Диференціюючі схеми – це схеми, в яких напруга на виході пропорційна похідній напрузі входу:

$$U_{\text{вих}} = a \cdot \left(\frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \right) \quad (1.3)$$

Розглянемо перехідний процес у такій схемі (див. рисунок 1.14) при подачі на вхід східчастого сигналу амплітудою $U_{\text{вх}}$. Сигнал на виході визначається рівнянням:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} - U_c$$

Через час τ напруга на виході дорівнюватиме:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \times e^{-1}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 18

Тобто напруга на виході зменшиться в «е» разів та досягне рівня:

$$U_{\text{вих}} = 0,37 \times U_{\text{вх}} .$$

Напруга на конденсаторі:

$$\begin{aligned} U_c &= U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}} \\ U_c &= 0,63 \times U_{\text{вх}} \end{aligned}$$

Через час $= 2\tau$ напруга на виході зменшиться до рівня:

$$\begin{aligned} U_{\text{вих}} &= U_{\text{вх}} \times e^{-\frac{2\tau}{\tau}} = U_{\text{вх}} \times e^{-2} = 0,13 \times U_{\text{вх}} \\ U_c &= 0,87 \times U_{\text{вх}} \end{aligned}$$

Через час $= 3\tau$ перехідні процеси практично закінчуються.

Тривалість перехідних процесів визначають як час зміни напруги $_{\text{вих}}$ від 0,05 до 0,95, або на рівнях 0,1 та 0,9, що відбувається приблизно за 3 , або відповідно за 2 .

Сигнал на виході диференційної схеми суттєво відрізняється за формою від вхідного. Це використовується для диференціювання сигналів будь-якої форми, у тому числі й гармонічних. При цьому розв'язують дві основні задачі перетворювання сигналів: – отримання імпульсів дуже малої тривалості (вкорочення імпульсів), які використовують для запуску керованих перетворювачів електроенергії, тригерів, одновібраторів та інших пристроїв; виконання математичної операції диференціювання (отримання похідної в часі) складних функцій, заданих у вигляді електричних сигналів, що часто зустрічається в обчислювальній техніці, апаратурі авторегулювання та ін.

Операція диференціювання відбувається лише тоді, коли тривалість імпульсу значно перевищує сталу часу $\gg$.

Такі ж RC - кола використовують у лінійних схемах, зокрема, у підсилювачах. Треба зауважити, що в цьому випадку вимоги до величини зовсім інші. Необхідно, щоб інформаційний сигнал при підсиленні зберігав форму, а це можливо коли за час дії імпульсу () заряд конденсатора суттєво не зміниться. Це відбувається за умови $\ll$. У даному випадку схему (рис. 1.14, а) використовують як елемент міжкаскадного зв'язку, що роз'єднує електричні кола за постійним струмом, але не вносить спотворень під час передачі інформаційних сигналів.

1.1.7. Перехідна характеристика інтегруючих RC -схем.

В інтегруючих колах вихідна напруга пропорційна інтегралу за часом від вхідної напруги:

$$U_{\text{вих}} = a \times \int U_{\text{вх}} dt. \quad (1.4)$$

Відмінності кіл, що інтегрують, від тих, що диференціюють, полягає в тому, що вихідна напруга знімається з конденсатора (рис. 1.14, б). Використовують ці кола для отримання лінійно змінюваних пилкоподібних напруг, а також для реалізації операцій інтегрування.

Для виконання такої операції необхідно, щоб стала часу кола τ була значно більшою від тривалості вхідного імпульсу $\tau \ll t_{\text{вх}}$, а для синусоїдального сигналу – $RC \gg 1/\omega$.

При подачі на вхід східчастої напруги (рис. 1.18, а) у початковий момент ($t = 0$) вся вхідна напруга прикладена до резистора, а напруга на конденсаторі дорівнює нулю. Конденсатор починає заряджатись зі сталою часу $\tau = RC$. Струм поступово зменшується, що

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 19

обумовлює зменшення спаду напруги на резисторі (рис. 1.18, б), а на виході ($U_{вих} = U_c$) напруга зростає до значення $U_{вих} = U_{вхх}$ (рис. 1.18, в).

Перехідний процес так само, як і у диференціальних ланцюгах оцінюють за 2τ при фіксації на рівні $(1 - 0,9) \times U_{вих}$, або за 3τ при фіксації на рівні $(0,05 - 0,95) \times U_{вих}$. Ці величини визначають протяжність перехідного процесу під час переключення схеми, а відтак – і швидкодію пристрою.

Коли на вхід інтегруючої схеми поступає періодична послідовність імпульсів прямокутної форми тривалістю t_i , то для їх передачі без суттєвого спотворення необхідно, щоб стала часу була мала ($\tau \ll t_i$). У цьому випадку вихідна напруга відтворює форму вхідних імпульсів, оскільки конденсатор встигає повністю зарядитись за час, який становить дуже малу частку тривалості імпульсу. При цьому тривалість переднього фронту імпульсу буде незначною.

У разі виконання умови інтегрування ($\tau \gg t_i$) у момент надходження імпульсу на вхід схеми вся вхідна напруга прикладена до резистора, а напруга на конденсаторі дорівнює нулю. За час дії імпульсу конденсатор повільно заряджається, а напруга на ньому повільно збільшується. Але за вказаної умови напруга на конденсаторі не встигає досягти напруги $U_{вих}$. По закінченні вхідного імпульсу конденсатор так само повільно розряджається. Таким чином, на ємнісному виході формуються розтягнуті імпульси, які мають форму експоненційної пилки. Такі спотворення вхідних імпульсів не завжди допустимі. У цьому випадку тривалість переднього фронту вихідного імпульсу може перевищувати тривалість інформаційного імпульсу.

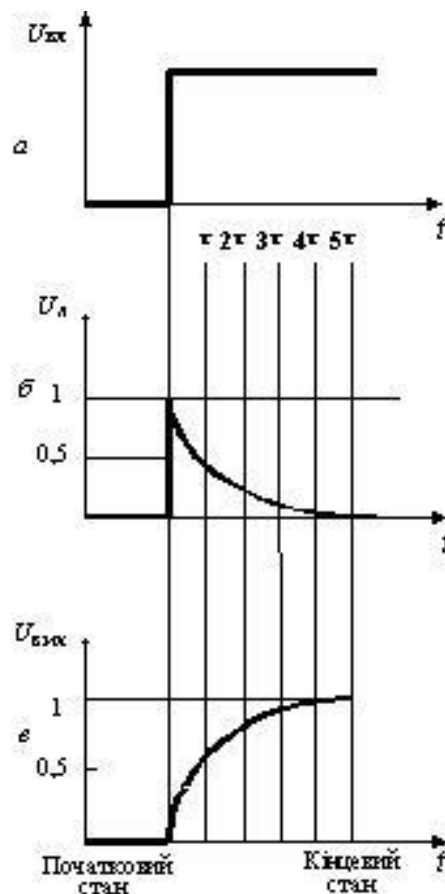


Рис. 1.18 Перехідні процеси в інтегруючій RC-схемі

Зрозуміло, що час заряду та розряду конденсатора визначає також мінімальний період вхідних імпульсів і швидкодію.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 20

Схему, показану на рисунку 1.14, б, умовно називають інтегруючим колом. Операція інтегрування відбувається лише за умови $\gg$ $t_{\text{вх}}$. При цьому форма вихідного імпульсу дуже відрізняється від форми вхідного (на вході прямокутний імпульс – на виході експоненційна пилка). Якщо така ж схема має співвідношення $\ll$ $t_{\text{вх}}$, то відбувається лише невелике спотворення вихідного імпульсу (збільшується тривалість переднього та заднього фронтів).

1.1.8. Частотні характеристики диференціюючих RC-схем.

Залежність коефіцієнта передачі RC- та LC-схем від частоти вхідного сигналу зумовлена зміною опорів конденсаторів та індуктивностей. У диференціюючих схемах (рис. 1.14, а) зі збільшенням частоти напруга на виході збільшується, коефіцієнт передачі зростає.

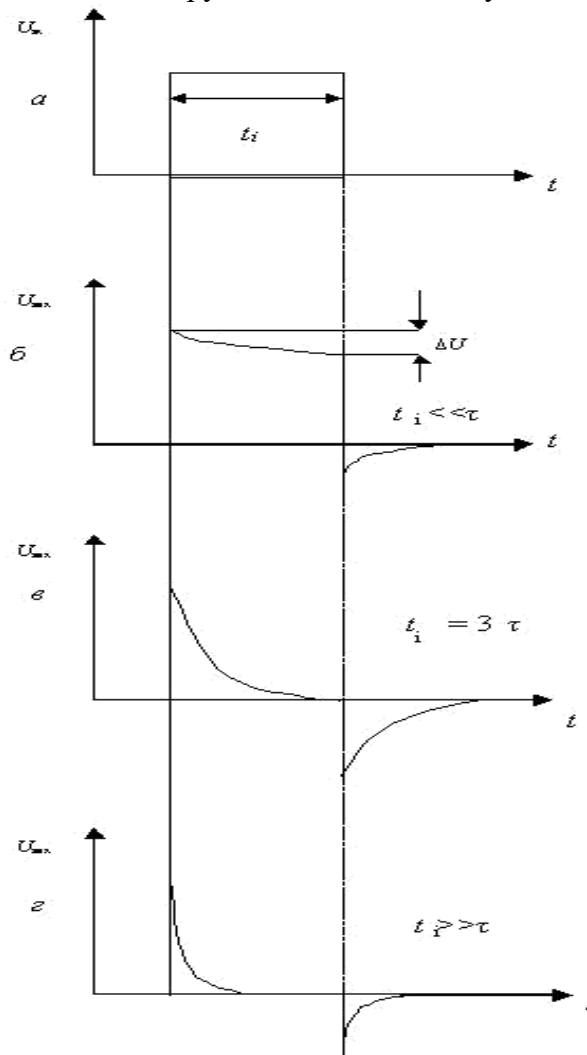


Рис. 1.19 Залежність форми вихідних імпульсів диференційних RC-схем від співвідношення t_i та τ :
а) вхідний сигнал; б) $t_i \ll \tau$; в) $t_i = 3\tau$; г) $t_i \gg \tau$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 21

Властивості схеми оцінюють за допомогою АЧХ, яка відображає залежність модуля коефіцієнта передачі від частоти.

Модуль коефіцієнта передачі визначають за формулою:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega RC}}} \quad (1.5)$$

Смуго пропускання схеми оцінюють на рівні, коли модуль коефіцієнта передачі зменшується в $\sqrt{2}$ рази. У диференційних RC-схемах це відбувається у разі зменшення частоти до

$$\omega = 1/RC = 1/\tau.$$

Таким чином, диференційні RC-схеми пропускають сигнали і частотою $\omega \geq \omega_n$, тобто є фільтрами верхніх частот (ФВЧ) (рис. 1.15).

1.1.9. Частотні характеристики інтегруючих RC-схем.

Інтегруючі схеми зі збільшенням частоти зменшують амплітуду вихідного сигналу, коефіцієнт передачі падає.

Модуль коефіцієнта передачі дорівнює:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega RC}} \quad (1.6)$$

Якщо частота вхідного сигналу досягає величини $\omega = 1/RC$, то модуль коефіцієнта передачі зменшується у $\sqrt{2}$ рази. Таки чином, інтегруючі ланцюжки пропускають сигнали із частотою від $\omega = 0$ і до $\omega = \omega_n$, тобто є фільтрами нижніх частот (ФНЧ) (рис. 1.16).

Передача сигналів в області нижніх частот може регулюватись. Ємність розділового конденсатора в підсилювачах беруть достатньої величини, щоб забезпечити необхідний спектр нижніх частот. У спеціальних підсилювачах постійного струму такі конденсатори відсутні.

Складнішу задачу розв'язують, щоб забезпечити розширення частотного діапазону в бік високих частот. У схемах завжди є паразитні ємності монтажу, активних та пасивних елементів. Вони зумовлюють обмеження діапазону частот інформаційних сигналів, що передаються на вихід схеми.

Частотні і перехідні характеристики пов'язані між собою. Розширення частотного діапазону в області верхніх частот обумовлює зменшення тривалості перехідних процесів, збільшення швидкодії схеми, зменшення тривалості переднього фронту імпульсу на виході.

Розширення частотного діапазону в області нижніх частот обумовлює зменшення спаду вершин імпульсів; зменшує спотворення форми імпульсів (рис. 1.19 та 1.20).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 22

1.2. Порядок виконання роботи

1.2.1. Дослідження схеми подільника напруги

- Принципова електрична схема подільника напруги зображена на рис. 1.14.
- Запустити програму Multisim й побудувати схему (рис. 1.21). Для цього:
 - виберіть елементи, необхідні для побудови схеми;
 - пасивні компоненти (резистори) знаходяться у групі Basic; джерела постійної та змінної напруг, заземлення – група Sources; мультиметр – лінійка інструментів.
 - розмістіть знайдені компоненти на робочому полі програми. Використовуйте віртуальні моделі резисторів.
 - з'єднайте всі компоненти. В разі необхідності використовуйте додаткові вузли.

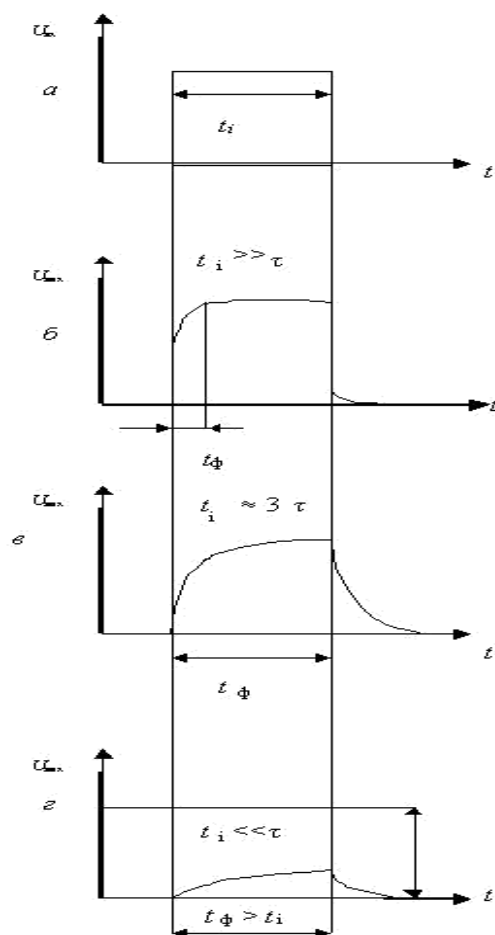


Рис. 1.20 Залежність форми вихідних імпульсів диференційних RC-схем від співвідношення t_i та τ :

а) вхідний сигнал; б) $t_i \gg \tau$; в) $t_i = 3\tau$; г) $t_i \ll \tau$.

- Дослідіть отриману схему. Для цього:
 - встановіть наступні початкові значення: $V1=12V$, $R1=1k\Omega$, $R2=1k\Omega$;
 - увімкніть моделювання;
 - відкрийте мультиметр та запишіть значення вихідної напруги;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 23

- змінюючи значення опору резистора R1 з кроком 1кОм до 10кОм, запишіть значення вихідних напруг.
- розрахуйте експериментальні коефіцієнти ділення даної схеми при кожному значенні опору R1 за формулою $K_d = U_{вх} / U_{вих}$;
- порівняйте отримані значення коефіцієнтів ділення з теоретичними, що розраховуються за формулою $K_d = (R1 + R2) / R2$;
- результати занесіть у протокол.

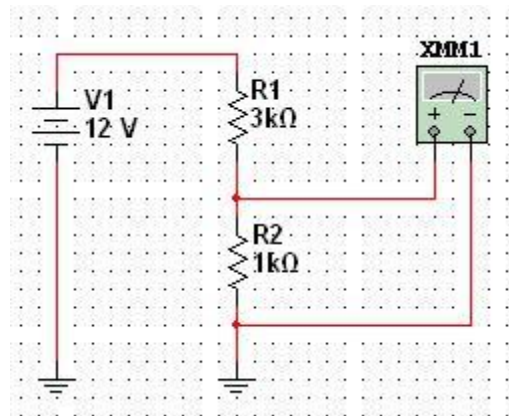


Рис. 1.21 Схема для моделювання подільника напруги

1.2.2. Дослідження диференціюючої RC-схеми.

1. Відкрити вікно програми *Multisim* і побудувати схему диференційної RC-схеми (рис.1.22).
2. Дослідити диференційну RC-схему в частотній області.
3. Встановити у функціональному генераторі режим генерації гармонічних сигналів. Встановити такі параметри сигналу: частота 10 кГц, амплітуда 10 В.
4. Дослідити частотні характеристики диференційної схеми допомогою вимірювача АЧХ та ФЧХ (*Bode Plotter*). У відповідних віконцях встановити: мінімальне послаблення вихідного сигналу = 0 дБ (максимальний коефіцієнт передачі), максимальне послаблення = -40 дБ (мінімальний коефіцієнт передачі), максимальна частота = 5 МГц, мінімальна частота = 100Гц .
5. Увімкнути моделювання За допомогою візирної лінійки визначити нижню граничну частоту f_n диференційної RC-схеми (частоту, на якій коефіцієнт передачі зменшується до 3 дБ). Вимкнути моделювання.
6. Перевести *Bode Plotter* в режим дослідження ФЧХ. На передній панелі натиснути кнопку «*Phase*». Виставити значення параметрів: $F = 135^\circ$, $I = -45^\circ$. Увімкнути моделювання.
7. Проаналізувати одержану ФЧХ та занести її в протокол. Вимкнути моделювання.
8. Повторити експерименти при одночасному збільшенні опору потенціометра і ємності конденсатора до 50%, а потім до 75% від номінального значення.
9. Результати занести в протокол. Сформулювати висновки.
10. Дослідити диференціюючу RC-схему в часовій області. Встановити такі параметри імпульсів генератора: частота 10 кГц (період 100 мкс), заповнення (*Duty cycle*) 50% (тривалість імпульсів 50 мкс), амплітуда 10 В.
11. Виставити мінімальні значення опору потенціометра та ємності конденсатора.

12. Виставити режими осцилографа: тривалість розгортки (*Time base*) 20 мкс/поділка, тип функціональної залежності *Y/ T*, чутливість каналу «A» – 20 В/поділка, зміщення по вертикалі осцилограми сигналу каналу «A» (*Y position*) 2 под, тип входу каналу A «DC» (закритий вхід, за змінним струмом), чутливість каналу «B» – 10 В/под., зміщення по вертикалі осцилограми сигналу каналу «B» (*Y position*) – 1.2 под. Режим синхронізації – запуск вхідними сигналами, тобто сигналами каналу «A».

13. Увімкнути моделювання. Зафіксувати та проаналізувати вихідні осцилограми. Користуючись курсорами 1 та 2 визначити величину вихідної напруги на початку і в кінці дії вхідних інформаційних сигналів. Розрахувати у відсотках спад вершини імпульсів.

14. Повторити експерименти при одночасному збільшенні опору потенціометра та ємності конденсатора до 50%, а потім до 75% від номінального значення. Результати занести в протокол.

15. Сформулювати висновки.

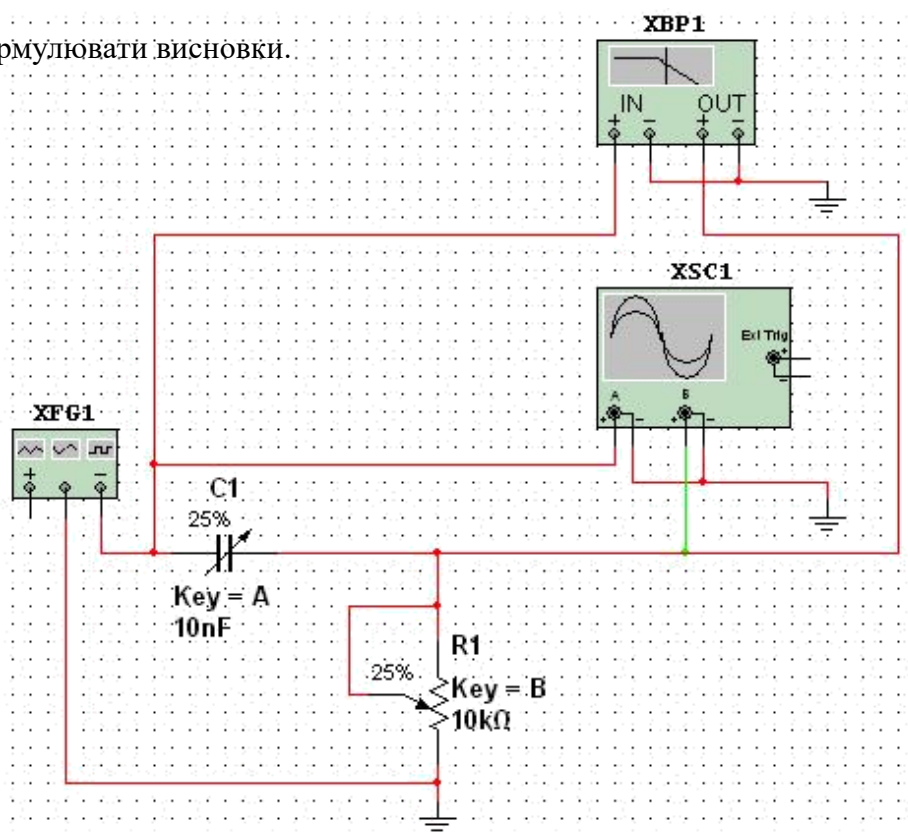


Рис. 1.22 Схема для дослідження диференціюючої RC-схеми

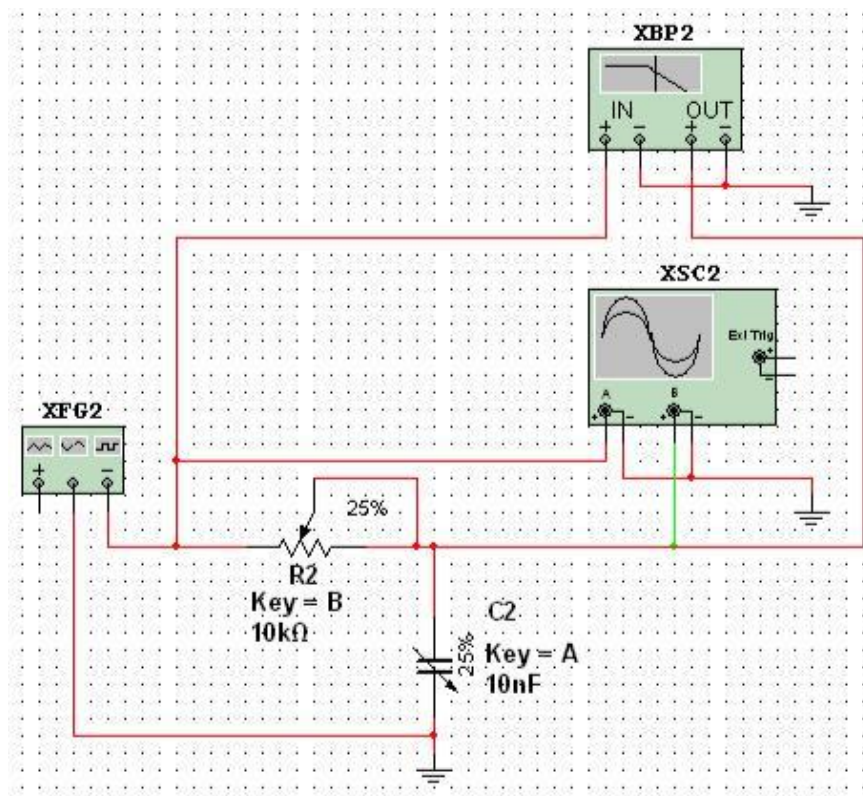


Рис. 1.23 Схема для дослідження інтегруючої RC- схеми

1.2.3. Дослідження інтегруючої RC–схеми.

1. Побудувати схему інтегруючої RC-схеми (рисунок 1.23). Виставити номінальну ємність конденсатора 10 нФ, та величину зміни ємності (25%). Значення опору потенціометра та встановлені відсотки залишити без змін.

Дослідити частотні характеристики інтегруючої RC – схеми. Перевести генератор в режим формування гармонічного сигналу. Виставити амплітуду 10 В. Одержати АЧХ та ФЧХ інтегруючої RC– схеми для значень R і C (25, 50 та 100%). Визначити за допомогою *Bode Plotter* та розрахувати значення верхніх граничних частот.

3. Одержані АЧХ та ФЧХ і значення граничних частот занести в протокол. Проаналізувати одержані результати. Зробити висновки.

4. Дослідити перехідні процеси в інтегруючій RC–схемі. Перевести функціональний генератор в режим формування прямокутних імпульсів («»), виставити такі параметри імпульсів: частота 10 кГц, відсотки заповнення 50% (тобто тривалість імпульсів 5 мкс), амплітуда 10 В.

5. Відкрити передню панель осцилографа, та встановити тривалість розгортки 20мкс/под. Решту показників залишити без змін.

6. Увімкнути моделювання. Спостерігати осцилограми вхідних та вихідних імпульсів.

7. Повторити експерименти ще для двох значень опору потенціометра та ємностей конденсатора – 50% та 100% номінального значення.

1.2.4. Дослідження подвійного Т-подібного мосту.

1. Побудувати схему подвійного Т-подібного мосту (рис. 1.24).
2. Використовуючи таблицю 1.1 виставити значення опорів в резисторах так, щоб $1 = 2 = 2$ 3 , і величину ємності конденсаторів із співвідношенням $1 = 2 = 0,5$ 3 . Розрахувати квазірезонансну частоту за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3}.$$

Таблиця 1.1

Позначення	№ варіанта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R , кОм	10	10	11	11	13	13	15	15	18	20
C , нФ	9,1	8,2	7,5	6,8	6,2	5,6	5,1	4,7	4,3	3,9
F ₁ , кГц	0,5	0,2	0,3	0,8	0,4	0,7	0,9	0,6	0,8	0,4
F ₂ , кГц	10	20	30	40	50	60	70	80	90	15
Позначення	№ варіанта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
R , кОм	22	22	24	24	27	27	30	30	33	33
C , нФ	3,6	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,5
F ₁ , кГц	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,1
F ₂ , кГц	25	35	45	55	65	75	85	95	10	20
Позначення	№ варіанта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
R , кОм	36	36	39	39	43	43	47	47	51	51
C , нФ	9,1	8,2	7,5	6,8	6,2	5,6	5,1	4,7	4,3	3,9
F ₁ , кГц	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,1	0,2
F ₂ , кГц	30	40	50	60	70	80	90	15	25	35
Позначення	№ варіанта									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
R , кОм	56	56	62	62	68	68	75	75	82	82
C , нФ	3,6	3,3	3,0	2,7	2,4	2,2	2,0	1,8	1,6	1,5
F ₁ , кГц	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,1	0,2	0,3
F ₂ , кГц	45	55	65	75	85	95	10	20	30	40

3. Перевести функціональний генератор в режим формування тестового гармонічного сигналу (). Встановити амплітуду коливання - напруга повинна відповідати номеру варіанта. Частоти – F1, F2 (табл.1.1) та F3 = f₀.

4. Визначити значення струмів у всіх ланцюгах (включаючи вхідний), напруги на всіх елементах при двох зазначених частоти вхідного сигналу, а також на частоті квазірезонансу. При вимірюванні струмів і напруг повинні бути використані як амперметри і вольтметри, так і мультиметр. В якості джерела вхідного сигналу повинні бути використані як генератор синусоїдного сигналу, так і функціональний генератор. Амплітуда сигналу чи його діюче значення вибирається студентом самостійно, виходячи із зручності вимірювання.

5. Визначити періоди та зсуви фаз між вхідним і вихідним сигналом на трьох частотах, вказаних в табл 1.1. Розрахувати фазовий зсув та експериментальне значення частот в усіх випадках.

6. Визначити коефіцієнти передачі мосту (відношення вихідної напруги до вхідної) на цих частотах.

7. Висвітлити передню панель *Bode Plotter*. Виставити діапазон затухань $F = 0$ дБ до $I = -60$ дБ, смугу частот $F = 10$ кГц, $I = 10$ Гц.

8. Дослідити АЧХ, результати вимірювань та АЧХ занести в протокол.

9. Перевести *Bode Plotter* в режим дослідження фазочастотної характеристики.

Дослідити ФЧХ.

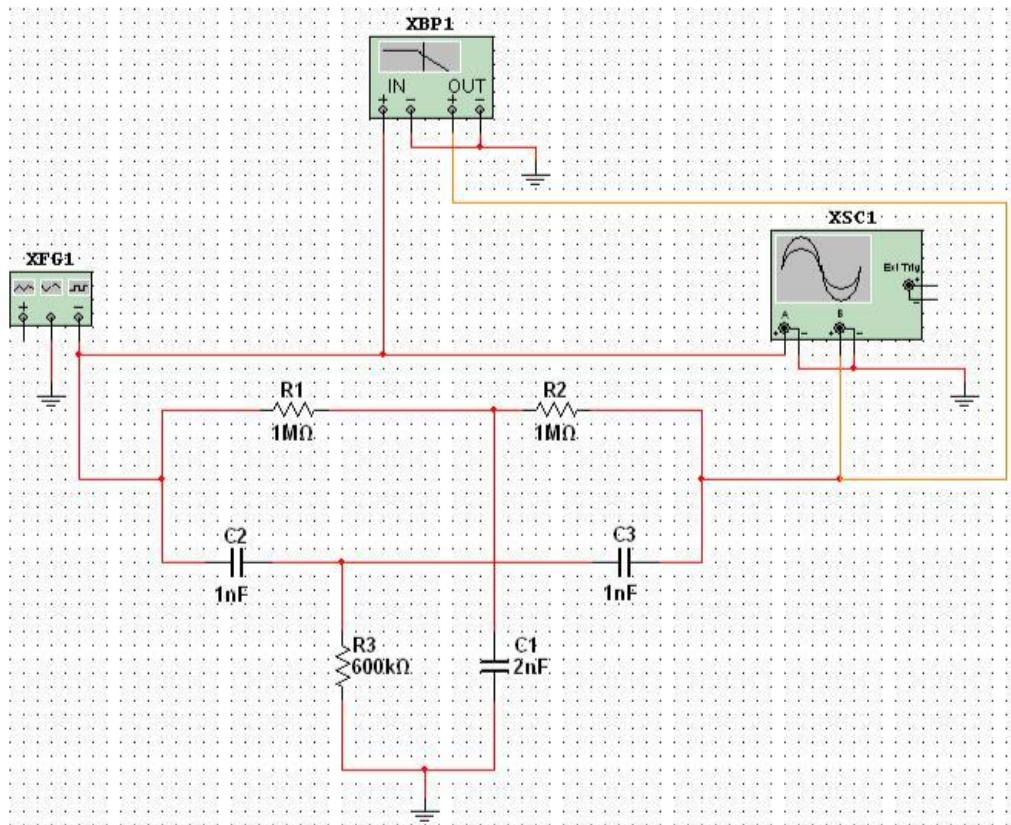


Рис. 1.24 Схема для дослідження подвійного Т-подібного мосту

1.3. Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- мету лабораторної роботи;
- досліджувану принципову електричну схему;
- результати досліджень у вигляді таблиці зі значеннями опор $R1$, виміряною вихідною напругою, експериментальними та теоретичними коефіцієнтами ділення;
- принципові електричні схеми віртуальних лабораторних стендів для
- дослідження RC -схем;
- результати розрахунків сталих часу, значень граничних частот та тривалості перехідних процесів для RC -схем;
- амплітудно-частотні характеристики досліджуваних RC -схем;
- перехідні характеристики досліджуваних RC -схем;
- осцилограми імпульсів, одержаних за експериментами ;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 28

- визначення тривалості перехідних процесів та смуги частот; висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.
- висновки.

1.4. Контрольні запитання

1. Для чого використовують програму Multisim?
2. Як в програмі Multisim будуються схеми?
3. Як в програмі Multisim з'єднати в один вузол більше двох компонентів?
4. Як в програмі Multisim користуватись контрольно-вимірювальними приладами?
5. Накресліть та поясніть принципові електричні схеми інтегруючого та диференціюючого RC-кола.
6. Поясніть формування вихідного сигналу диференціюючим RC-колом.
7. Поясніть формування вихідного сигналу інтегруючим RC-колом.
8. Чому диференціюючі RC-схеми є фільтрами верхніх частот?
5. Які елементи електронних схем обмежують частотні властивості пристроїв обробки електричних сигналів
9. Як змінюється перехідна характеристика диференціюючої RC-схеми зі збільшенням ємності конденсатора та зміною опору резистора?
10. Як змінюється перехідна характеристика інтегруючої RC-схеми зі зменшенням ємності конденсатора та зі збільшенням опору резистора?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 29

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ

2.1. Мета роботи

- 1) поглиблення і закріплення знань про основні процеси, що протікають у напівпровідникових діодах (НД), особливостях їх як елементів електронних ланцюгів, про граничні експлуатаційні дані, про особливості роботи таких приладів у динамічному режимі,
- 2) придбання навичок проведення експериментальних досліджень роботи діодів в різноманітних схемах.

2.1. Основні теоретичні відомості

2.1.1. Властивості діодів.

Комбінація двох напівпровідникових шарів з різним типом провідності (р – діркова і n – електронна) має випрямляючі властивості: вона набагато краще пропускає струм в одному напрямку, ніж в протилежному. Полярність напруги, яка відповідає великим струмам, називається прямою, а малим струмам – зворотною. Звичайно використовують терміни пряма і зворотна напруга, прямий і зворотній струм. Поверхня, по якій контактують р- та n-шари, називаються металургійною межею, а область об'ємного заряду, яка до неї прилягає, - електронно-дірковим переходом.

Крім ефекту випрямлення, р-n - перехід має й інші властивості: нелінійність вольт-амперної характеристики (ВАХ), бар'єрна ємність, явище ударної іонізації атомів напівпровідника при досить великих для даного переходу напругах, явище тунелювання носіїв крізь потенціальний бар'єр переходу як при зворотній, так, в окремих випадках, і при прямій напрузі. Ці властивості переходу використовуються для створення різних видів НД: випрямних, змішувальних, лавинопролітних, варикапів, фотодіодів, світлодіодів.

Вольт-амперна характеристика р-n – переходу описується виразом:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{U}{U_t}\right) - 1 \right], \quad (2.1)$$

де I – струм через перехід при напрузі U , I_0 – зворотній струм, U_t – температурний потенціал, котрий при кімнатній температурі дорівнює 26мВ.

У разі швидкої зміни напруги діода порівняно з часом накопичення і розсмоктування незрівноваженого заряду в базі і некомпенсованого об'ємного заряду в електронно-дірковому переході, реалізується динамічний режим. В даному режимі необхідно враховувати ємнісні властивості діодів, тобто їхню здатність накопичувати і відповідно віддавати заряд при збільшенні чи зменшенні прикладеної напруги. Накопичення заряду відбувається в р-n -переході й у базі діода. Відповідно до цього розрізняють дві складові ємності діода C_d : бар'єрну C_b і дифузійну C_{df} . При цьому $C_d = C_b + C_{df}$. Такий поділ багато в чому умовний, але він зручний на практиці, бо співвідношення цих ємностей залежить від полярності прикладеної напруги. За прямої напруги головну роль грають надлишкові заряди в базі і, відповідно, дифузійна ємність. За зворотної напруги кількість надлишкових зарядів в базі мала і головну роль відіграє бар'єрна ємність. Обидві ємності нелінійні: дифузійна залежить від прямого струму, а бар'єрна – від зворотної напруги.

2.1.2. Моделювання діодів.

В програмі Multisim діоди представлено в каталозі Diodes бібліотеки компонентів. Після натискання кнопки DIODE з'явиться діалогове вікно вибору конкретного діода (рис.2.1). Якщо ви просто бажаєте перевірити роботу якоїсь електронної схеми, то доцільно використовувати віртуальний діод (Diode_Virtual), який має найбільш загальні параметри. Після вибору діода ви побачите контур елементу, який можете розмістити у потрібному вам місці схеми.

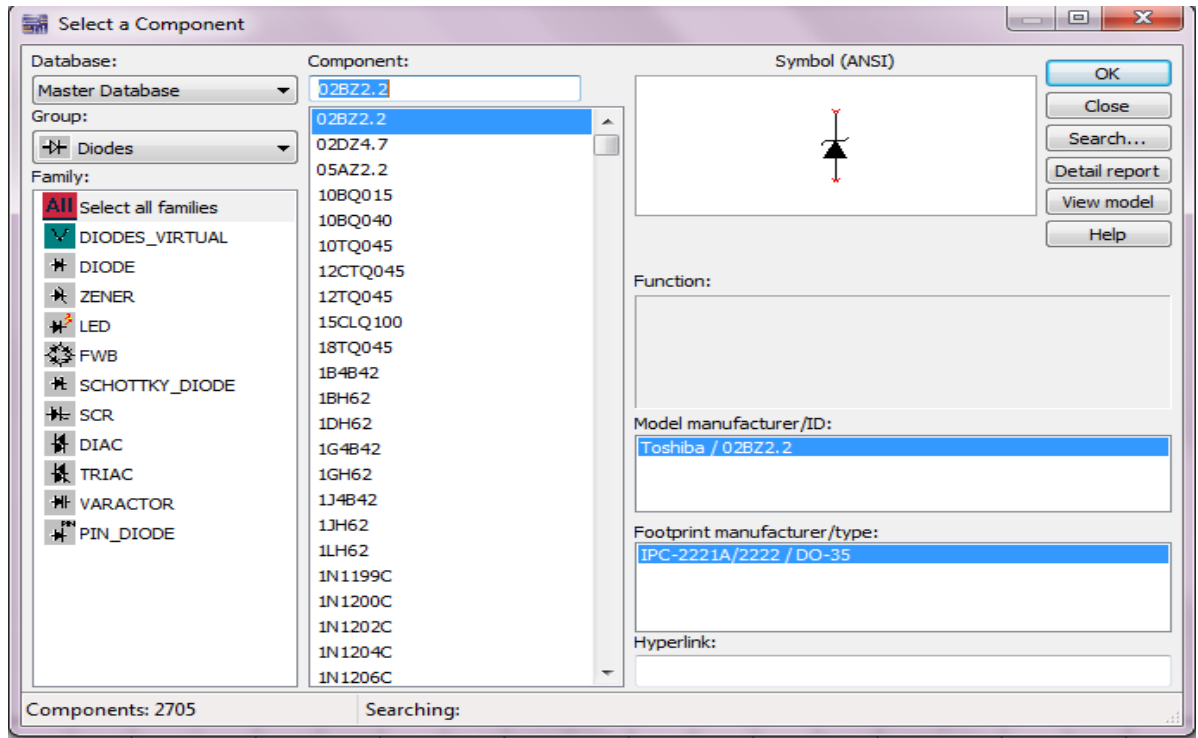


Рис. 2.1 Діалогове вікно вибору моделі діода програми

Еквівалентні схеми діода мають наступні позначення (рис. 2.2): A – анод, K – катод, I – джерело струму, R_s – об'ємний опір, C – ємність переходу, G_{min} – провідність, яка обумовлена втратами.

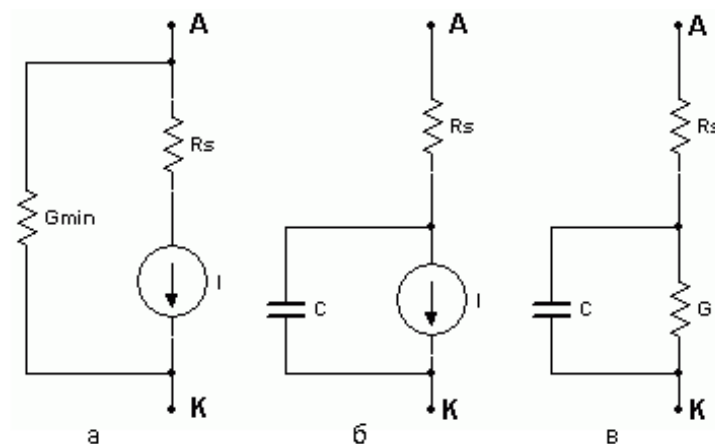


Рис. 2.2 Еквівалентні схеми діода при розрахунках: а) за постійним струмом; б) в діапазоні частот;
в) в діапазоні частот при малих рівнях сигналів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 58 / 31</i>

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 32

2.1.3. Випрямляч

Випрямлячі – перетворювачі струму та напруги змінної полярності до струму та напруги постійної полярності.

Середнє значення вихідної напруги U_d (постійна складова) однонапівперіодного випрямляча (рис. 2.7) визначається за формулою:

$$U_d = \frac{U_{\max}}{\pi} \quad (2.2)$$

Значення U_d двохнапівперіодного випрямляча (рис. 3.8) вдвічі більше:

$$U_d = \frac{2U_{\max}}{\pi}, \quad (2.3)$$

Частота вихідного сигналу f для схем з однонапівперіодним або двохнапівперіодним випрямлячем обраховується як величина, зворотна до періоду вихідного сигналу. При цьому період сигналу на виході однонапівперіодного випрямляча в два рази більше, ніж на виході двохнапівперіодного випрямляча (рис. 2.3).

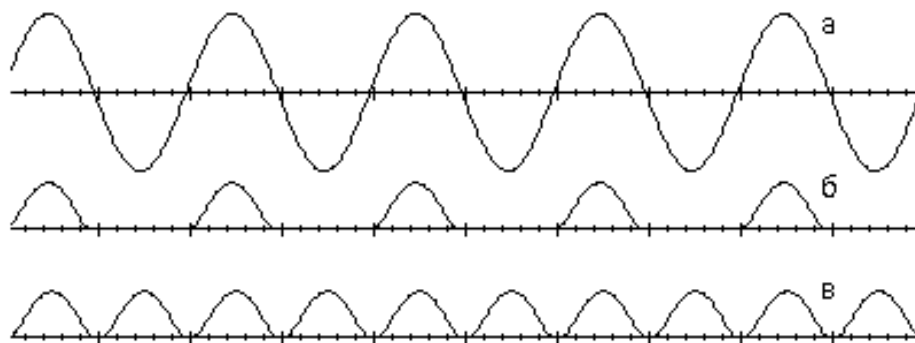


Рис. 2.3 Осцилограми напруг: а) на вході випрямляча; б) на виході однонапівперіодного випрямляча; в) на виході двохнапівперіодного випрямляча

Максимальна зворотна напруга $U_{\max}$ на діоді однопівперіодного випрямляча дорівнює максимуму вхідної напруги. Максимальна зворотня напруга $U_{\max}$ на кожному діоді двохнапівперіодного випрямляча з контактом до середньої точки трансформатора дорівнює різниці подвоєного максимального значення напруги на вторинній обмотці трансформатора U_{2m} і прямого падіння напруги на діоді $U_{\text{пр}}$:

$$U_{\max} = U_{2m} - U_{\text{пр}} \quad (2.4)$$

Якщо увімкнути на вихід випрямляча конденсатор, то змінна складова вихідної напруги буде зменшена (рисунок 2.4). Середнє значення вихідної напруги випрямляча з ємнісним фільтром може бути приблизно оцінено зі співвідношення:

$$U_d = \frac{U_{2\max} + U_{2\min}}{2} = U_{2\max} - \frac{\Delta U_2}{2}, \quad (2.5)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 33

де U_{2max} і U_{2min} – максимум і мінімум вихідної напруги, $\Delta U_2 = U_{2max} - U_{2min}$.

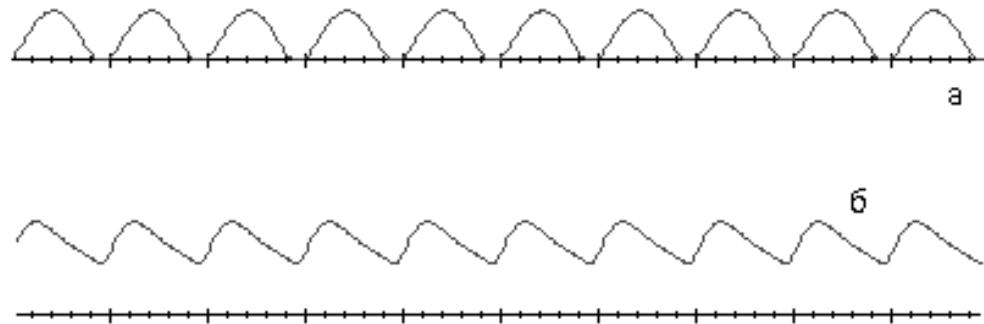


Рис. 2.4 Осцилограми випрямляча:
а) без конденсатора на виході, б) з конденсатором на виході

Для оцінювання якості випрямлення звичайно використовують коефіцієнт пульсацій q вихідної напруги, який обчислюється згідно з виразом:

$$q = \left(\frac{\Delta U_2}{U_d} \right) \cdot 100\% \quad (2.6)$$

2.1.4. Обмежувачі

Обмежувачі – чотириполосники, на виході яких напруга не змінюється, якщо напруга на вході перевищує якесь порогове значення (обмежувач зверху, рис. 2.5,а), приймає значення нижче порогового (обмежувач знизу, рис. 2.5,б) або перевищує межі порогових рівнів (двосторонній обмежувач).

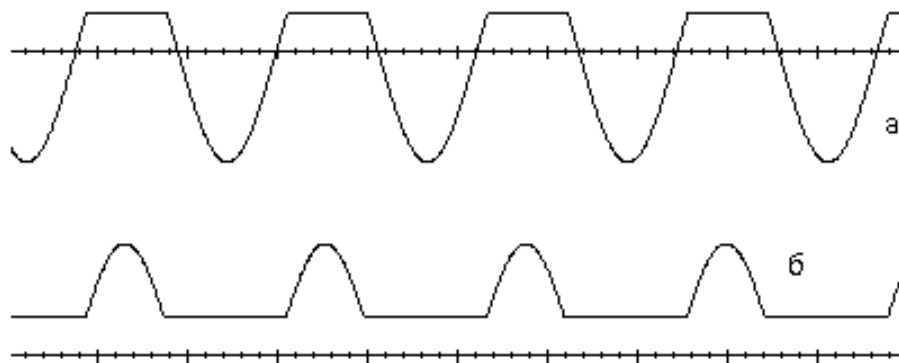


Рис. 2.5 Осцилограми вихідного сигналу:
а) обмежувача зверху; б) обмежувача знизу

Основними характеристиками обмежувачів є: стабільність положення точок зламу їх характеристик, сталість вихідної напруги в області обмеження, лінійність схеми в області пропущення, коефіцієнт передачі на ділянках обмеження і пропущення.

Діодні обмежувачі залежно від способу ввімкнення діода можуть бути послідовними або паралельними.

2.2. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim.
2. Вивчити призначення всіх елементів схеми (рис. 2.6).

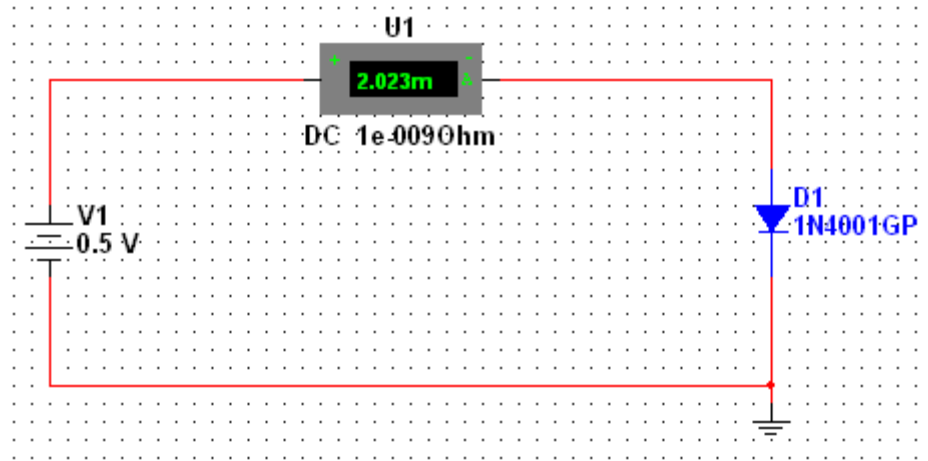


Рис. 2.6 Електрична принципова схема виміру вольт-амперної характеристики напівпровідникових діодів

3. Дослідити вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода 1N4001GP. Для цього:

- встановити значення напруги джерела V1 0,1В;
- увімкнути моделювання;
- занести показники амперметра (U1) та значення напруги генератора (V1) до протоколу;
- вимкнути моделювання;
- повторити вищезазначені дії для наступних напруг генератора: 0,3В; 0,7В; 2В; 5В; 7В;
- змінити полярність увімкнення генератора у схемі;
- заміряти значення напруг та струмів на діоді при наступних значеннях напруг генератора: 0,1В; 0,5В; 1В; 5В;
- занести показники амперметра та значення напруг генератора до протоколу;
- побудувати вольт-амперну характеристику.

4. Побудувати схему однонапівперіодного випрямляча. Вивчити призначення всіх елементів схеми (рис. 2.7). Ключ DIPSW1 знаходиться в бібліотеці Basic, група SWITCH.

Початкові налаштування схеми повинні повністю співпадати з тими, що зображені на рисунку 3.7.

5. Дослідити роботу діода 1N4001GP в схемі однонапівперіодного випрямляча. Для цього:

- увімкніть моделювання. Занести в протокол скріншот осцилограми вхідної та вихідної напруг;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальні вхідну та пряму вихідну напруги;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол період вихідного сигналу. Обчислити частоту вихідного сигналу;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальну зворотну напругу на діоді;

- вимкнути моделювання;
- обчислити середнє значення вихідної напруги U_d .
-

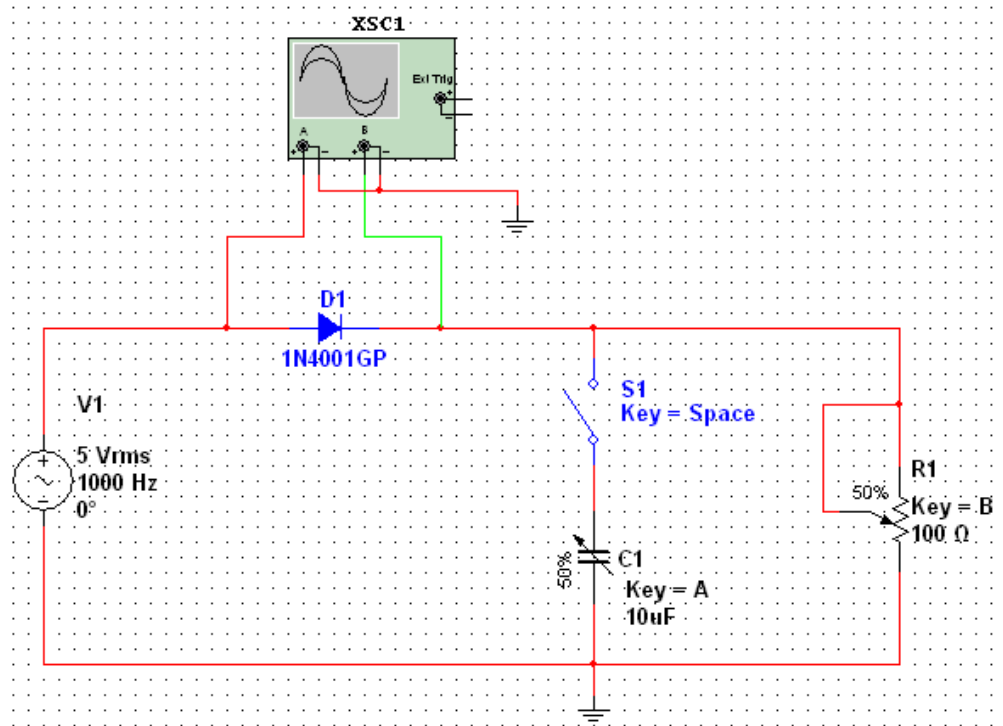


Рис. 2.7 Схема електрична принципова однонапівперіодного випрямляча на напівпровідниковому діоді

6. Дослідити вплив ємнісного фільтра на роботу однонапівперіодного випрямляча. Для цього:

- за допомогою клавіші «Space» замкнути ключ S1;
- увімкнути моделювання. Занести в протокол скріншоти осцилограми вхідної та вихідної напруг;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальну вихідну напругу U_{2max} і різницю між мінімумом та максимумом вихідної напруги ΔU_2 ;
- обчислити середнє значення вихідної напруги U_d ;
- обчислити коефіцієнт пульсацій вихідного сигналу;
- зробити скріншоти осцилограми вихідного сигналу при наступних значеннях вихідних ємності та опору: (C1; R1) = (100%; 100%), (100%; 75%), (100%; 50%), (100%; 25%), (75%; 100%), (50%; 100%), (25%; 100%);
- вимкнути моделювання.

6. Порівняти результати вимірів та обрахунків, отриманих у пунктах 5,6.

7. Побудувати схему двонапівперіодного випрямляча. Вивчити призначення всіх елементів схеми (рис. 2.8).

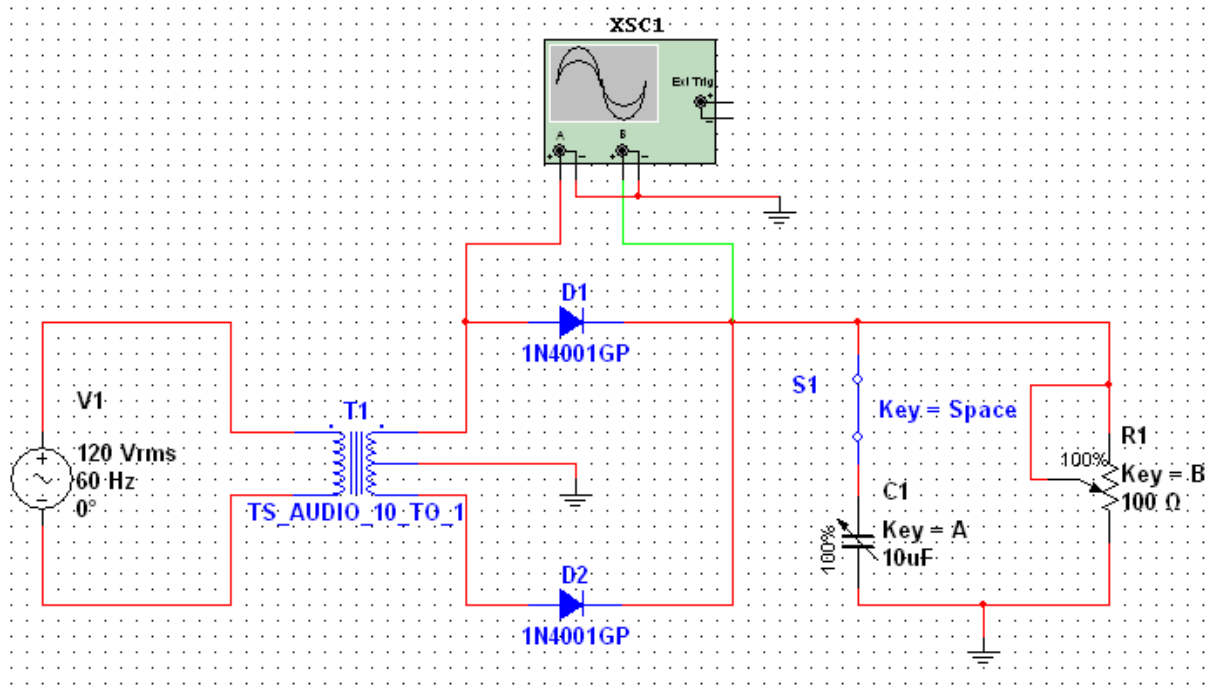


Рис. 2.8 Схема електрична принципова двохнапівперіодного випрямляча на напівпровідниковому діоді

Початкові налаштування схеми повинні повністю співпадати з тими, що зображені на рисунку 2.8. Тобто: S1 – розімкнений, R1 = 100%, C1 = 100%.

8. Дослідити роботу діода 1N4001GP в схемі двохнапівперіодного випрямляча. Для цього:

- увімкнути моделювання. Занести в протокол скріншот осцилограми вхідної та вихідної напруг;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальні вхідну та пряму вихідну напруги;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол період вихідного сигналу. Обчислити частоту вихідного сигналу;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальну зворотну напругу на діоді;
- вимкнути моделювання;
- обчислити середнє значення вихідної напруги U_d .

9. Дослідити вплив ємнісного фільтра на роботу двонапівперіодного випрямляча. Для цього:

- за допомогою клавіш «Space» замкнути ключ S1;
- увімкнути моделювання. Занести в протокол скріншоти осцилограм вхідної та вихідної напруг;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальну вихідну напругу U_{2max} і різницю між мінімумом та максимумом вихідної напруги ΔU_2 ;
- обчислити середнє значення вихідної напруги U_d ;
- обчислити коефіцієнт пульсацій вихідного сигналу;
- зняти скріншоти осцилограм вихідного сигналу при наступних значеннях вихідних ємності та опору: (C1; R1) = (100%; 75%), (100%; 50%), (100%; 25%), (75%; 75%), (50%; 75%), (25%; 75%);
- вимкнути моделювання.

10. Порівняти результати вимірів та обрахунків, отриманих у пп. 9,10.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 37

11. Побудувати схему діодного обмежувача (рис. 2.9). Вивчити призначення всіх елементів схеми. В початковому стані перемикачі S1 і S2 повинні бути в положенні «1».

12. Дослідити роботу діода 1N4001GP в схемі обмежувача напруги. Для цього:

- увімкнути моделювання. Зарисувати в протокол осцилограми вхідної та вихідної напруг;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальні вхідну, пряму та зворотну вихідні напруги;
- вимкнути моделювання;
- за допомогою клавіші «Space» перекинути S1 і S2 в положення «2»;
- увімкнути моделювання. Зарисувати в протокол осцилограми вхідної та вихідної напруг;
- за допомогою моделі осцилографа виміряти та занести в протокол максимальні вхідну, пряму та зворотну вихідні напруги;
- вимкнути моделювання.

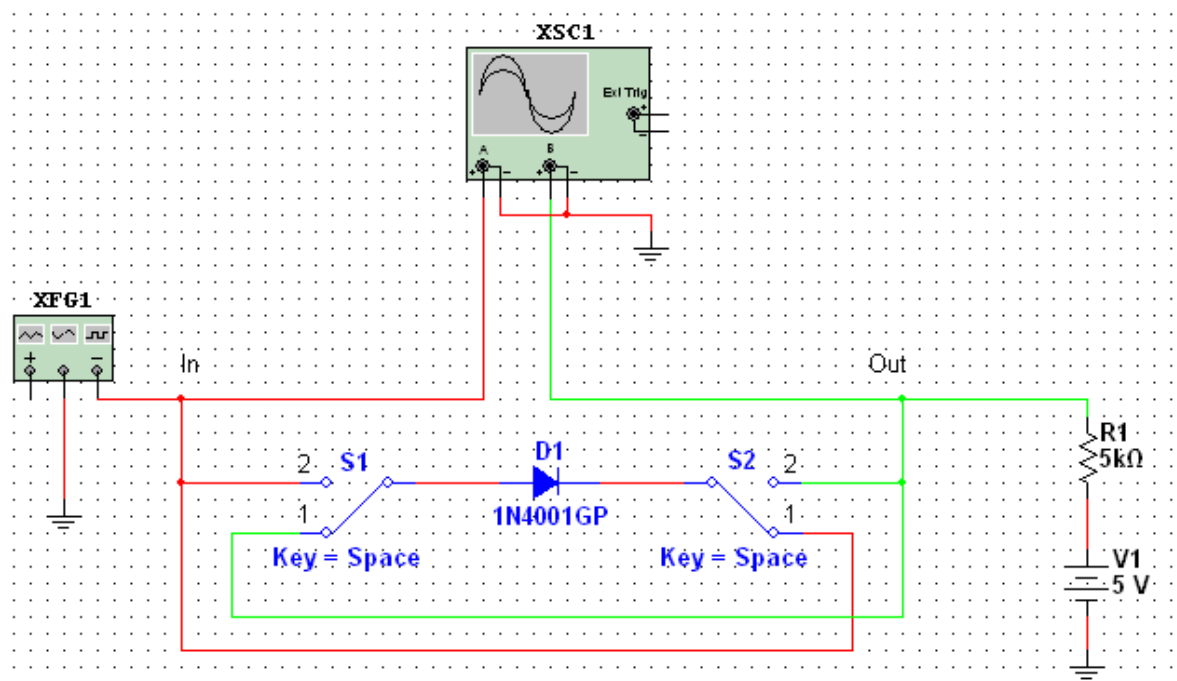


Рис. 2.9 Схема електрична принципова обмежувача на напівпровідниковому діоді

13. Виключити програму Multisim.

14. Сформулювати висновки й оформити протокол звіту.

2.3. Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- мету лабораторної роботи;
- принципові електричні схеми, які використовуються в роботі;
- осцилограми вихідних сигналів, отримані при дослідженні роботи напівпровідникового діода в різних схемах;
- результати досліджень у виді таблиць і графіків, виконаних на міліметрівці;
- висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 38

2.4. Контрольні запитання

1. Як побудовано напівпровідникові діоди?
2. Чим обмежується швидкодія діодів?
3. Наведіть і поясніть еквівалентні схеми діода.
4. Як здійснюється випрямлення змінної напруги за допомогою схем на напівпровідникових діодах?
5. Поясніть роботу двонапівперіодного випрямляча.
6. Як впливає ємнісний фільтр на результат випрямлення?
7. Поясніть роботу обмежувача на напівпровідниковому діоді.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 39

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРІВ У РЕЖИМІ ПІДСИЛЕННЯ

3.1. Мета роботи

1) поглиблення і закріплення знань з основ теорії біполярних транзисторів, особливостям їхньої роботи в режимі підсилення,

2) придбання навиків і умінь експериментального використання статичних характеристик для побудови лінії навантаження, динамічної вхідної характеристики й оптимального вибору режиму транзистора при посиленні гармонійних і імпульсних сигналів.

3.2. Основні теоретичні відомості

Режим підсилення БТ досягається у разі підключення в коло вихідного електрода (колектора або емітера) навантажувального опору. У даному випадку зміна вхідного сигналу (наприклад, зміна U_i) автоматично викликає зміну потенціалу на вихідному електроді.

Основні схеми підсилювачів на біполярних транзисторах визначаються можливими способами їх увімкнення – загальна база (ЗБ), загальний емітер (ЗЕ), загальний колектор (ЗК). Базові схеми підсилювачів з допоміжними елементами показано на рисунку 3.1 з наступними позначеннями: – напруга живлення, – вхідна напруга, – вихідна напруга, – опір колекторного навантаження, – емітерний опір, С – роздільний конденсатор, і – опори подільника напруги, який задає режим каскаду за постійним струмом.

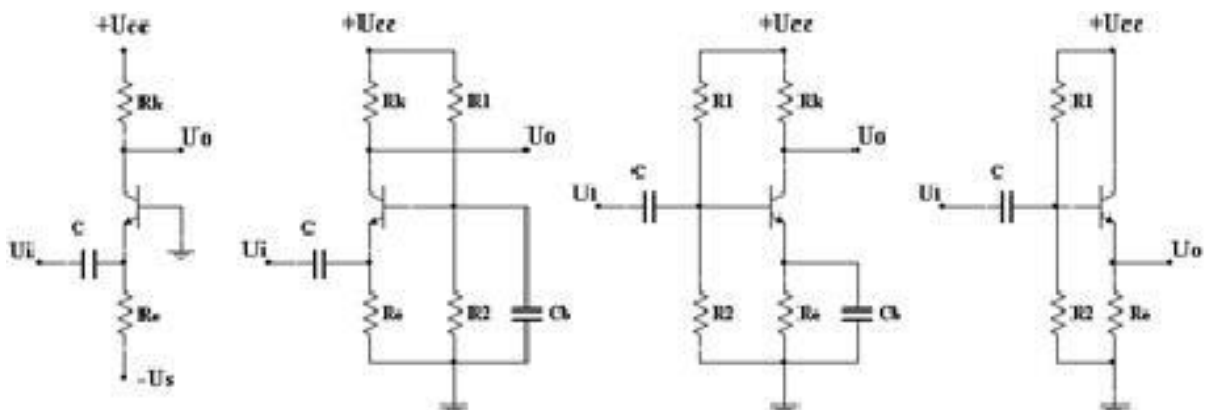


Рис. 3.1 Базові підсилювальні каскади на біполярних транзисторах:

а) класична схема з ЗБ; б) схема з ЗБ і подільником напруги;

в) схема з ЗЕ; г) схема з ЗК

Базові каскади характеризуються вхідним $R_{вх}$ і вихідним $R_{вих}$ опорами, коефіцієнтами підсилення струму $K_I = I_{вих}/I_{вх}$, напруги $K_U = U_{вих}/U_{вх}$ і потужності $K_P = P_{вих}/P_{вх} = K_I \times K_U$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 40

В залежності від струму колектору транзистора і величини напруги на електродах транзистора підсилювального каскаду, а також від амплітуди вхідного сигналу розрізняють наступні режими підсилення: А, В, С, D і проміжні, наприклад АВ.

В режимі А струм у вихідному ланцюзі підсилювача протікає на протязі всього періоду сигналу. Достоїнством цього режиму є мінімум нелінійних спотворень. Його недолік – низький ККД (менш ніж 0,5), тому він використовується найчастіше в каскадах попереднього підсилення, а також в малопотужних вихідних каскадах.

В режимі В струм через транзистор протікає на протязі приблизно половини періоду вхідного сигналу ($\approx 180^\circ$). Через нелінійність початкових ділянок характеристик транзистора форма вихідного струму при його малих значеннях суттєво відрізняється від форми струму в лінійному режимі. Це призводить до значних нелінійних спотворень вихідного сигналу. Цей режим звичайно використовують в двохтактних вихідних каскадах, які мають великий ККД.

В режимі С струм через транзистор протікає на протязі проміжку часу, який менше половини періоду вхідного сигналу. Струм спокою в режимі С дорівнює нулю. Він використовується в потужних підсилювачах, в яких навантаженням є резонансний контур (наприклад, в радіопередавачах).

Режим D (ключовий) – режим, в якому транзистор може знаходитись тільки в двох станах: або повністю закритий, або повністю відкритий. Такий режим використовують в ключових схемах.

Для аналізу активних елементів у режимі підсилення А широко використовують графоаналітичний метод, заснований на застосуванні вхідних і вихідних статичних характеристик. При цьому розглядають роботу транзистора у статичному та динамічному режимах. Статичний режим враховує тільки постійні складові струмів та напруг на біполярному транзисторі, що забезпечують проходження та підсилення сигналів – змінних, динамічних складових. Динамічний режим використовується для аналізу підсилювальних властивостей транзисторного підсилювача по сигналах.

У схемі з загальним емітером напруга колектора при наявності навантаження R_K у його ланцюзі дорівнює $U_K = E_K - R_K I_K$.

Це співвідношення є рівнянням прямої. Графік, побудований з цього рівняння, називають статичною навантажувальною характеристикою (СНХ). На сім'ї вихідних характеристик вона будується по двох точках: ($I_K = 0$, $U_{KE} = E_K$) і ($U_{KE} = 0$, $I_K = E_K / R_K$) (рис. 3.2).

За допомогою СНХ вибирають робочу точку біполярного транзистора у статичному режимі (по постійному струму) як точку перетину СНХ з тією або іншою вихідною статичною характеристикою транзистора.

Вхідна характеристика навантаженого транзистора у динамічному режимі відрізняється від статичної, що обумовлено зміною колекторної напруги. Динамічна вхідна характеристика при збільшенні струму бази послідовно перетинає сім'ю статичних характеристик, знятих при $U_{KE} = const$. Ця характеристика йде більш круто: при увімкненні навантаження вхідна провідність транзисторів зростає.

У режимі лінійного підсилення робоча точка (тобто I_{KE0} та U_{KE0}) вибирається в середині лінійної ділянки.

При виборі робочої точки також потрібно враховувати обмеження пов'язане із недопустимістю перевищення потужності, що виділяється на транзисторі, максимально допустимої потужності. Тому робоча точка повинна бути розміщена поза зоною перевищення максимальної потужності, окресленої пунктирною лінією на рис. 3.2.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 41

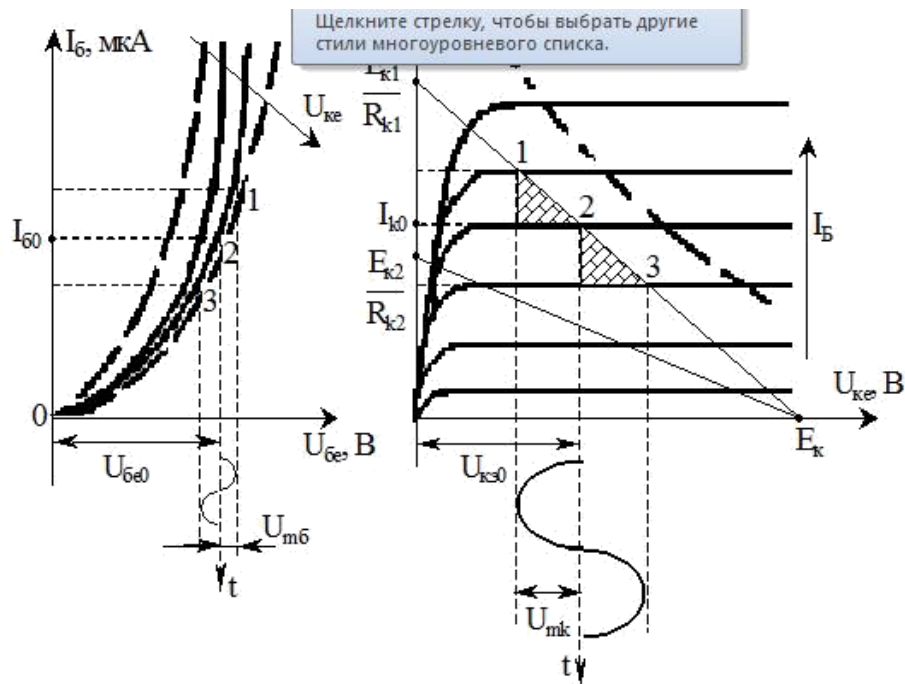


Рис. 3.2 Побудова навантажувальних і вхідних динамічних характеристик для схеми увімкнення транзистора з ЗЕ

Наведені на рисунку 3.2 характеристики дозволяють графоаналітичним методом визначити коефіцієнти підсилення по струму і напрузі (відношення амплітуд струму колектора I_{mk} і струму бази I_{mb} і амплітуд напруг U_{mk} і U_{mb}).

Максимальне значення амплітуди змінної складової колекторного струму обмежується граничним струмом транзистора ($I_{Kmax} < 0,5 I_{Kгран}$), значення якого обумовлюється припустимим зниженням коефіцієнта передачі струму при високих рівнях інжекції.

Максимальне значення амплітуди змінної складової колекторної напруги обмежується максимально припустимою напругою колектора ($U_{mkmax} < 0,5 U_{кеmax}$ прип.).

При підсиленні гармонійних і двополярних імпульсних сигналів вихідну робочу точку вибирають у центрі лінійної ділянки. Це забезпечує максимальну амплітуду вихідного сигналу. Якщо схема призначена для підсилення імпульсів позитивної або негативної полярності, то для одержання максимального вихідного сигналу з амплітудою, що дорівнює майже E_K , транзистор повинен знаходитися або в режимі відсічення, або насичення.

При виборі параметрів робочої точки активного елементу треба приймати до уваги залежність його параметрів від температури (зворотній струм переходів, коефіцієнт передачі струму), а також схильність зміні з часом (старіння). Це потребує спеціальних заходів для стабілізації коефіцієнта підсилення і інших параметрів підсилювачів.

В більшості транзисторних підсилювачів для стабілізації положення робочої точки вводять стабілізуючий зворотній зв'язок або використовують методи температурної компенсації.

Якщо необхідно мати стабільний режим за постійним струмом і стабільне підсилення за змінним струмом, вводять достатньо глибокий зворотній зв'язок за рахунок збільшення опору Re , паралельно якому вмикається конденсатор великої ємності.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 42

В багатокаскадних підсилювачах для стабілізації статичного режиму перевага надається загальному зворотному зв'язку за постійним струмом, який охоплює цілком весь підсилювач.

3.2. Порядок виконання роботи

1. Побудувати схему підсилювача за рисунку 3.3 Вивчити призначення всіх елементів схеми.

Початкові налаштування схеми:

- ключ розімкнено;
- опір потенціометра 0%;
- крок зміни опору потенціометра 10%;
- характеристики вхідного сигналу: форма – синусоїда, частота 1 кГц, амплітуда N мВ (N – номер варіанту), зсув 0 В;
- настроювання осцилографа: часова шкала 1 мс/поділ, канал А 100 мВ/поділ, канал В 5 В/поділ.

2. Побудувати навантажувальну характеристику підсилювача. Для цього:

- увімкнути моделювання;
- зафіксувати в протоколі вхідні струм та напругу і вихідні струм та напругу;
- провести подібні виміри для всіх значень опору потенціометра;
- побудувати навантажувальну характеристику;
- вимкнути моделювання.

3. Дослідити роботу підсилювача на біполярному транзисторі при подачі на вхід синусоїдального сигналу. Для цього:

- за допомогою клавіші «Space» замкнути ключ;
- потенціометр перевести в положення 0%;
- увімкнути моделювання;
- зняти скріншот осцилограм вхідного і вихідного сигналів в протокол, зберігаючи їх положення відносно осей;
- зняти скріншот осцилограм вхідного і вихідного сигналів в протокол при всіх інших положеннях потенціометра;
- провести вимірювання амплітуд вхідного та вихідного сигналів;
- обчислити коефіцієнт підсилення підсилювача на біполярному транзисторі по напрузі, по струму та потужності при роботі в активному режимі;
- вимкнути моделювання;
- порівняти і пояснити отримані результати.

4. Змінити настроювання схеми: на генераторі – форма сигналу прямокутна, частота 100 кГц, скважність 25%, амплітуда 20 мВ; на осцилографі часова шкала 10 мкс/поділ, канал А 50 мВ/поділ, канал В 5В/поділ.

5. Дослідити роботу підсилювача на біполярному транзисторі при подачі на вхід прямокутних сигналів. Для цього:

- потенціометр перевести в положення 0%;
- увімкнути моделювання;
- зняти скріншот осцилограм вхідного і вихідного сигналів в протокол, зберігаючи їх положення відносно осей;
- потенціометр перевести в положення 100%;
- зняти скріншот осцилограм вхідного і вихідного сигналів в протокол;
- вимкнути моделювання;
- порівняти і пояснити отримані результати.

6. Проаналізувати отримані результати, зробити висновки й оформити протокол звіту.

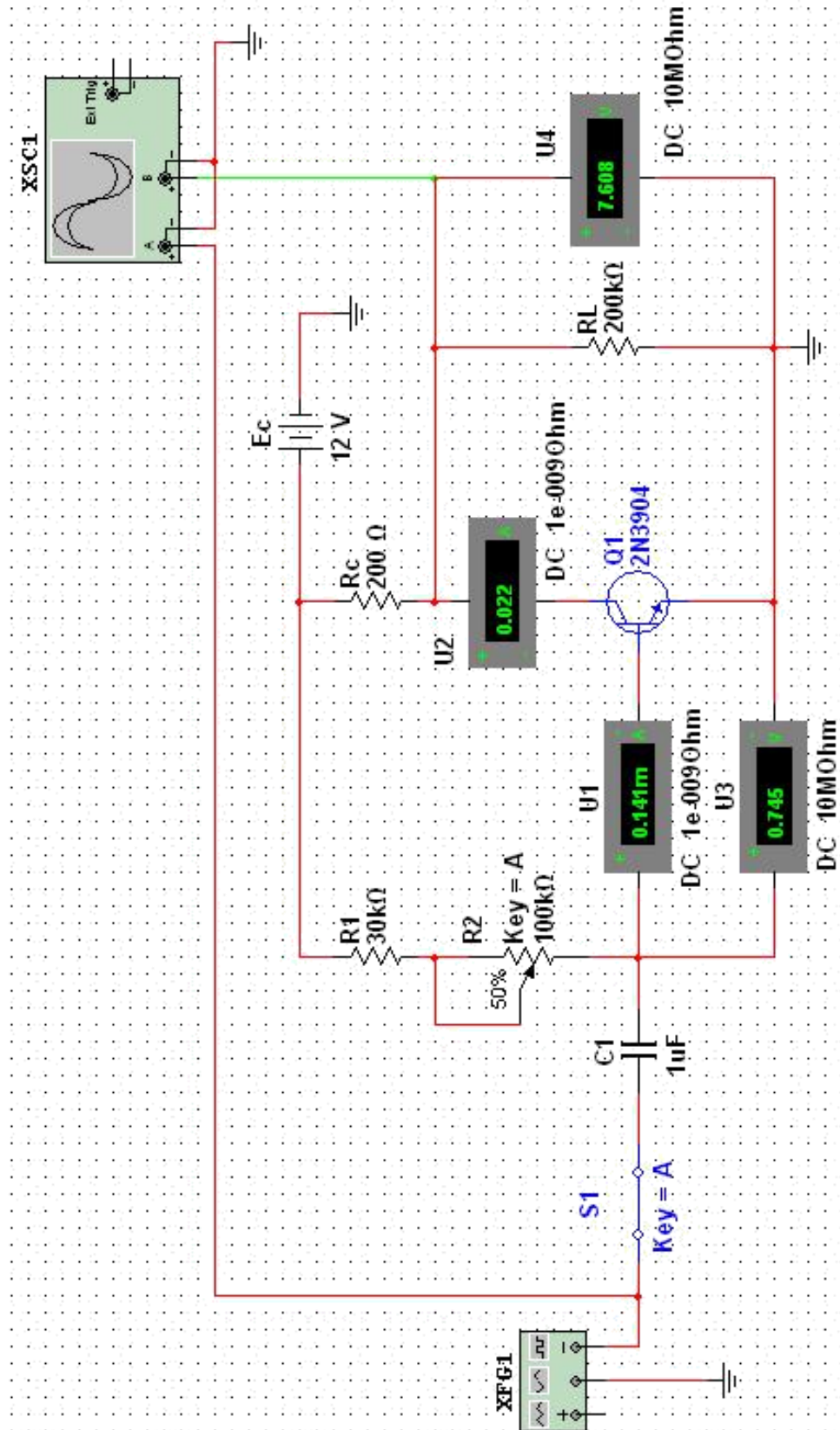


Рис. 3.3 Електрична принципова схема підсилювача на біполярному транзисторі, який увімкнено за схемою з 3Е

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 44

3.3. Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- мету роботи;
- принципи електричні схеми підсилювальної ланки при увімкненні БТ із загальним емітером, загальною базою і загальним колектором;
- результати досліджень у вигляді таблиць, графіків (на стандартному аркуші формату А4) і осцилограм, отриманих за допомогою вихідних характеристик та лінії навантаження і перерисованих з екрана осцилографа;
- висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів

3.4. Контрольні запитання

- Нарисуйте підсилювальну ланку на біполярному транзисторі з ЗЕ, ЗБ і ЗК і поясніть призначення елементів.
- Як враховується ефект модуляції товщини бази при наявності опору в колі колектора (у режимі підсилення)?
- Якими параметрами обмежується робоча зона транзистора при застосуванні його у підсилювачах у режимі підсилення А?
- Чому в режимі великих сигналів використовується графоаналітичний метод розрахунку транзисторних ланок?
- Як вибирається початкове положення робочої точки при підсиленні гармонійних і однополярних сигналів?
- Перелічіть особливості роботи БТ у ключовому режимі.
- Нарисуйте осцилограми імпульсів на виході транзисторного ключа з загальною базою і загальним емітером.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 45

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ

Мета роботи:

- 1) Вивчення принципів роботи, головних параметрів та характеристик операційного підсилювача (ОП).
- 2) Вивчення принципів побудови та особливостей функціонування генераторів імпульсів. Дослідження властивостей автоколивального мултивібратора та генератора напруги, що лінійно змінюється, впливу параметрів елементів схеми на вид та характеристики вихідних сигналів..
- 3) Прищеплення навичок побудови, налагоджування та експериментального дослідження функціонування генераторів імпульсів на операційних підсилювачах за допомогою програмного забезпечення Multisim.

4.1. Основні 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.п. Операційним часто називають підсилювач напруги з великим коефіцієнтом підсилення, охоплений ланцюгом від'ємного зворотного зв'язку, який визначає основні якісні показники та характер виконуваних підсилювачем операцій. Сучасні ОП виконуються на базі інтегральних мікросхем операційного підсилювача ІМС ОП, до виводів якої, крім ланцюга від'ємного зворотного зв'язку, підключаються джерело живлення, вхідних сигналів, опору навантаження, ланцюги корекції частотних характеристик ОП в інтегральному виконанні та інші ланцюги.

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 при відсутності вхідних сигналів потенціал виходу можна було звести до нуля (потенціалу землі), живлення ОП роблять двополярним та звичайно симетричним (наприклад, $\pm 12,6$ В

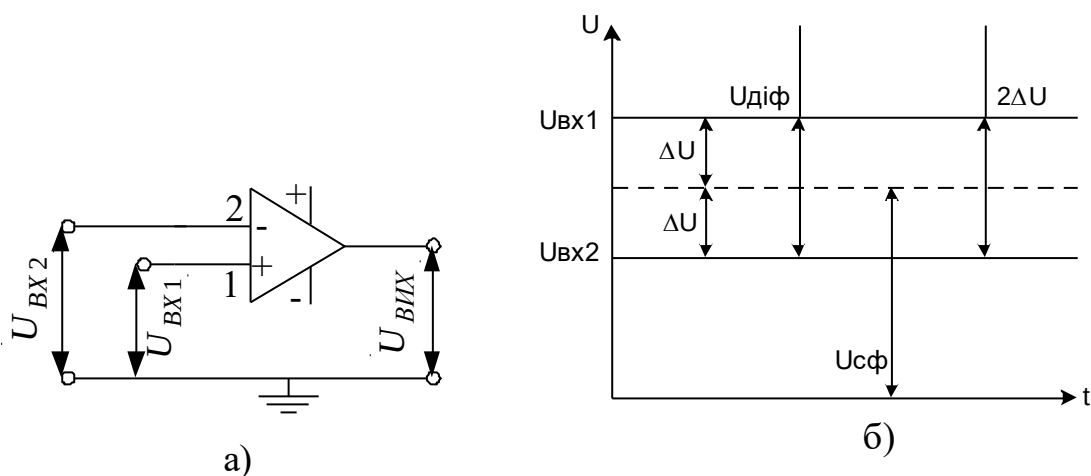


Рис.4.1

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 46

На рис. 4.1,а показано умовне позначення ОП з одним виходом та двома входами: прямим та інверсним. Інверсний вхід позначають знаком інверсії (колом) або позначають знаком “-“. Прямий вхід 1 не має знака інверсії або 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.4.1,б). Відносно $U_{СФ}$ потенціал вхідного виводу 1 вище, а виводу 2 – нижче на значення ΔU , а диференціальний (різницевий) сигнал $U_{ДИФ} = 2\Delta U$. Операційний підсилювач призначений для підсилення невеликого (диференціального) 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.4.2 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 $U_{ВХ1}$) Вихідна напруга $U_{ВИХ}$ знімається відносно середньої точки джерела живлення. Якщо $U_{ВХ}=0$, то $U_{ВИХ}=0$, що відображує умови балансу ОП. При відсутності зовнішнього ланцюга зворотного зв'язку уклін амплітудних характеристик (рис.4.2)

визначається коефіцієнтом підсилення напруги ОП $K_{Uon} = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{диф}}$. 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 опором.

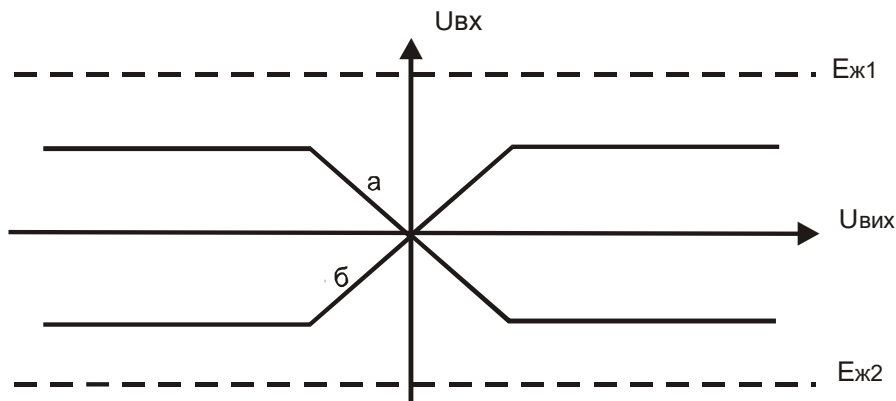


Рис.4.2 – Амплітудна характеристика операційного підсилювача

В залежності від того, на які входи ОП діють вхідні сигнали, розрізняють схеми підключення ОП в інтегральному виконанні: інвертуючі і (рис.3) і неінвертуючі (рис. 4). Ці схеми мають ряд загальних особливостей: 1- наявність елементів від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ); 2 – при виводі аналітичних виразів для оцінки основних параметрів ОП

приймають значення $U_{диф} \approx \frac{U_{вих}}{K_{Uon}} \approx 0$, так як ІМС ОП мають дуже високий коефіцієнт

підсилення напруги ($K_{Uon} \rightarrow \infty$); 3 – вхідний струм вважають рівним нулю, так як ІМС ОП має високий вхідний опір ($R_{ВХОП} \rightarrow \infty$).

Інвертуючий операційний підсилювач (рис.4.3,а). В цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий (інверсний) вхід ІМС ОП, а його неінвертуючий (прямий) вхід заземлений. Підсилювач називається інвертуючим, оскільки вихідна напруга $U_{ВИХ}$ інверсна

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 47

(протифазна) відносно вхідної напруги U_{BX} . Від'ємний зворотний зв'язок відтворюється при допомозі опору R_2 , R_1 (паралельний ВЗЗ за напругою).

Так як вхідний струм ІМС ОП $I_{BXOP}=I_{\Sigma}\approx 0$, то

$$I_{BX} \approx I_{\Sigma} \quad (4.1)$$

Оскільки диференційна вхідна напруга ІМС ОП $U_{\text{диф}} \approx (K_{UOP} \rightarrow \infty)$, а $R_{\text{вихоп}} \rightarrow \infty$, то $I_{BX}=U_{BX}/R_1$, то $I_{BX}=U_{BX}/R_1$

$$I_{\Sigma} = -U_{BX}/R_2 \quad (4.2)$$

Вихідна напруга в останньому виразі входить із знаком мінус, так як вона знаходиться у протифазі вхідній напрузі.

На основі співвідношень (4.1),(4.2) одержимо вираз для визначення коефіцієнта підсилення напруг схемою інвертуючого ОП:

$$K_U = -R_2/R_1 \quad (4.3)$$

Якщо ввести позначення глибини ВЗЗ $\beta_{\text{взз}} = R_1/(R_1 + R_2)$, яка при виконанні умови $R_2 \gg R_1$ дорівнює $\beta_{\text{взз}} \approx R_1/R_2$, то $K_U \approx -1/\beta_{\text{взз}}$, якщо $R_1=R_2$, то $K_{UOP}=-1$, ОП стає інвертуючим повторювачем напруги, у якого $U_{\text{вих}} = -U_{\text{вх}}$. Вхідний опір інвертуючого ОП $R_{\text{вихоп}}=R_1$, а вихідний опір $R'_{\text{вихоп}} = R_{\text{вихоп}}/(1 + \beta_{\text{взз}}K_U)$.

Неінвертуючий вхід ІМС ОП через опір R_3 з'єднаний з землею, тому його потенціал дорівнює нулю, а, відповідно, дорівнює нулю і потенціал інвертуючого входу, оскільки $U_{\text{диф}} \approx 0$. Тому на входах цієї ІМС ОП синфазний сигнал відсутній. Оскільки $R_{\text{вх}}$ реальної мікросхеми ОП не дорівнює нескінченності, то через її входи протікають незначні вхідні струми, які при $U_{\text{вх}} \approx 0$ можуть визвати помилкові зміни вихідного сигналу. Для їх компенсації необхідно забезпечити рівність опорів входів ІМС ОП. Тому в схему вводиться

$$\text{опір } R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Інвертуючий ОП (рис. 4.3,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.4.3,б). Напруга на виході такої схеми

$$U_{\text{вих}} = -(R_2/R_1)(U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_H),$$

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

Неінвертуючий операційний підсилювач (рис. 4.4). У цій схемі вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ІМС ОП. На його інвертуючий вхід за допомогою подільника вихідної напруги, виконаного на опорах R_1 і R_2 , подається напруга ВЗЗ $U_{\text{взз}}=U_{\text{вих}}R_2/(R_1+R_2)$. У схемі діє послідовний ВЗЗ за напругою, глибина якого а диференційна напруга, прикладена до ІМС ОП $U_{\text{диф}}=U_{\text{вх}}-U_{\text{взз}}$.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 48

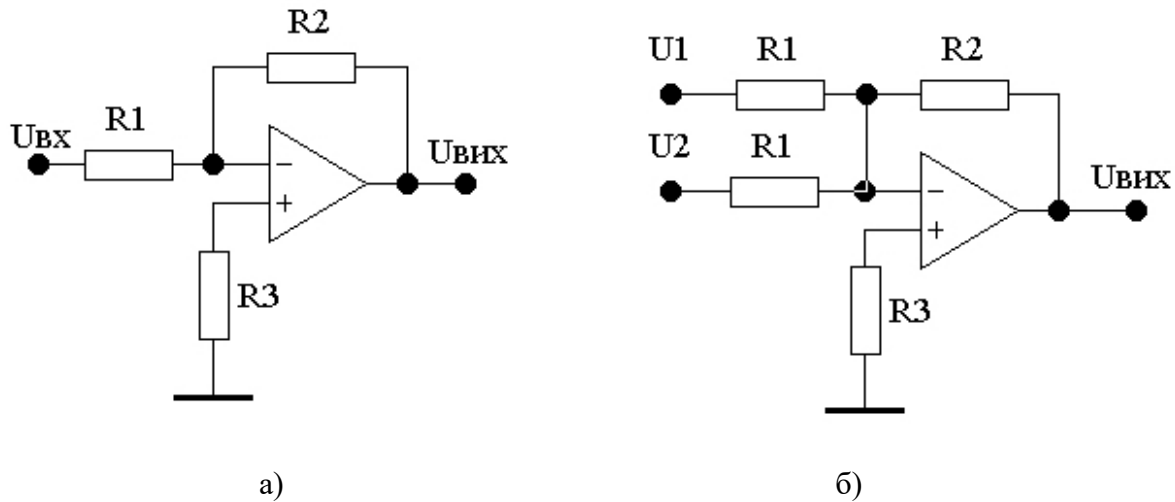


Рис.4.3 - Інвертуюча схема ввімкнення операційного підсилювача (а), аналоговий суматор (б)

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad (4.4)$$

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

$$U_{BX} \cong U_{B33} = (U_{B1X} R_2) / (R_1 + R_2) \quad (4.5)$$

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

$$K_{UOP} = (R_1 + R_2) / R_2 = 1 + (R_1 / R_2) = 1 / \beta_{B33}, \quad (4.6)$$

Вхідний опір неінвертуючого ОП $R'_{BXOP} = R_{BXOP} (1 + \beta_{B33} K_U)$, а вихідний опір $R'_{B1XOP} = R_{B1XOP} / (1 + \beta_{B33} K_U)$.

У цьому ввімкненні ІМС ОП потенціали його входів залишаються приблизно однакові, оскільки $U_{\text{диф}} \cong 0$, і дорівнюють значенню U_{BX} , тобто на входах ІМС ОП діє синфазний сигнал, значення якого близьке до U_{BX} . При виконанні умови $R_1 = 0$, $R_2 = \infty$, вираз (б) прийме вигляд

$$K_{UOP} = 1,$$

тобто операційний підсилювач буде виконувати функцію неінвертуючого повторювача напруги, у якого $U_{B1X} = U_{BX}$ (рис. 4,б).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 49

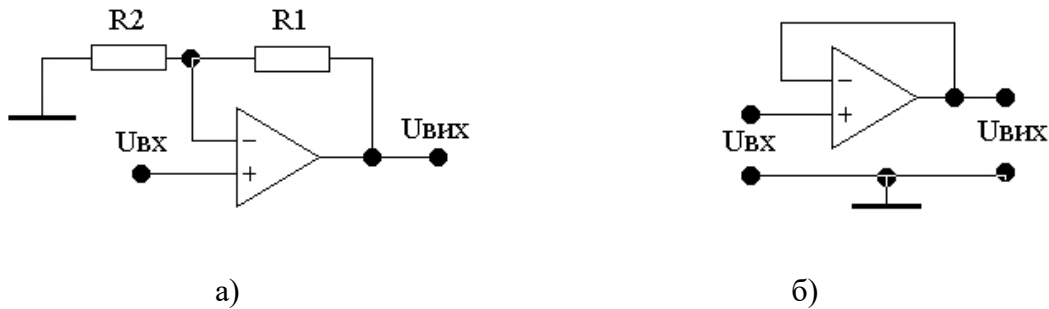


Рис. 4.4 - Неінвертуюча схема ввімкнення операційного підсилювача (а), неінвертуючий повторювач напруги (б)

Генератором електричних коливань називається пристрій, що перетворює енергію джерела постійного струму в енергію змінного струму потрібної форми. В залежності від форми вихідної напруги розрізняють генератори гармонічних коливань та генератори негармонічних коливань (імпульсні або релаксаційні генератори).

Незалежно від форми вихідної напруги всі генератори можуть функціонувати в одному з двох режимів: режимі автоколивань (автогенератори); режимі запуску зовнішніми імпульсами (загальмовані або очікуючі генератори).

Мультивібратор (від латинського слова *multim* – багато та *vibro* – коливаю) – релаксаційний генератор імпульсів майже прямокутної форми, виконаний у вигляді підсилювального пристрою з ланцюгом позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ).

Зокрема, як підсилювач можна використовувати й операційний підсилювач (ОП). Схема мультивібратора на ОП наведена на рис. 4.5. У даному випадку ОП охоплений двома ланцюгами зворотного зв'язку: позитивним зворотним зв'язком з коефіцієнтом передачі

$$b_{ПЗЗ} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{та негативним зворотним зв'язком (НЗЗ) з} \quad b_{НЗЗ} = \frac{1_2}{R \cdot R_c + 1}.$$

Розглянемо процеси, що відбуваються в схемі. Припустимо, що конденсатор C в момент часу t_0 , коли на схему було подано напругу живлення, знаходився в повністю розрядженому стані. Завдяки тому, що підсилювач охоплений ланцюгом ПЗЗ, а напруга на його вході, що інвертує дорівнює нулю, ОП з рівною імовірністю може встановитися в кожне з двох його максимально можливих напруг.

Допустимо, $u_{вих1} = U_{Вих \max}$.

Тоді вхідна напруга ОП прийме значення $U_{ВхОП} = U_{Вхi} - U_{Вхн} = -b_{ПЗЗ}U_{Вих \max} < 0$, що підтвердить позитивну полярність його вихідної напруги. Після появи на виході ОП напруги позитивної полярності $U_{Вих \max}$ починається процес заряду конденсатора C . Напруга на вході підсилювача, що інвертує, почне підвищуватися. Цей процес іде з постійного часу заряду $\tau = RC$ і супроводжується збільшенням вхідної напруги ОП. Отже, стан схеми буде квазистійким.

У момент, коли напруга, що інвертує, на вході досягне значення $U_{Вхi} = b_{ПЗЗ}U_{Вих \max}$ (при цьому $U_{ВхОП} = 0$), вихідна напруга підсилювача змінить свою полярність, зменшившись до $u_{Вих1} = -U_{Вих \max}$. Напруга на вході, що не інвертує, зменшиться до $U_{Вхн} = -b_{ПЗЗ}U_{Вих \max}$, а вхідна напруга підсилювача збільшиться до $U_{ВхОП} = 2b_{ПЗЗ}U_{Вих \max} > 0$.

Новий стан схеми також буде квазистійким. Зміна полярності вихідної напруги ОП викличе перезаряд конденсатора C . Внаслідок цього з часом вхідна напруга підсилювача $U_{ВхОП}$ буде зменшуватися, і в момент, коли $U_{ВхОП} = 0$ ($U_{Вхi} = -b_{ПЗЗ}U_{Вих \max}$), відбудеться чергове перемикання схеми й процес повториться.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 50

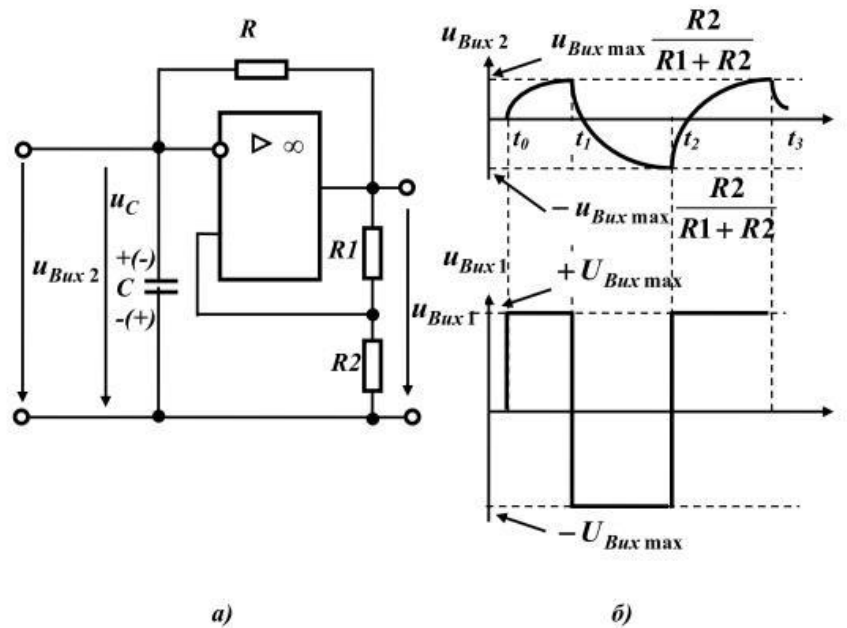


Рис. 4.5. Принцип роботи мультивібратора на ОП:
а) функціональна схема; б) часові діаграми роботи.

Таким чином, на виході ОП буде формуватися змінна напруга $u_{Вих1}$ прямокутної форми (рис. 4.5, б). Форма напруги на конденсаторі $u_{Вих2}$, яка складена з початкових ділянок експонентних процесів його перезаряду, буде наближатися до трикутного.

Із сказаного можна зробити два висновки:

- щодо вихідної напруги **ОП** ($u_{Вих1}$) схему можна розглядати як мультивібратор, який працює в режимі автоколивань;
- щодо напруги на конденсаторі **С** ($u_{Вих2}$) схема є генератором пилкоподібної напруги (напруги що лінійно змінюється).

Для визначення залежності частоти вихідної напруги розглянутої схеми від параметрів її елементів запишемо вираз для перезаряду конденсатора **С** :

$$u_C(t) = u_{C \text{ вільн}} + u_{C \text{ змуш}} = U_{C0} e^{-\frac{1}{RC} t} + U_{Вих \text{ max}} (1 - e^{-\frac{1}{RC} t})$$

де $u_{C \text{ вільн}}$ й $u_{C \text{ змуш}}$ – вільна й змушена складові процесу перезаряду конденсатора **С**;

U_{C0} – напруга на конденсаторі в початковий момент часу ($t = t_0$).

Відповідно до наведених часових діаграм маємо: для моменту t_1 $U_{C0} = b_{ПЗЗ} U_{Вих \text{ max}}$, для моменту часу t_2 – $U_C = b_{ПЗЗ} U_{Вих \text{ max}}$. Підставляючи ці значення напруг у вираз для $u_C(t)$ і розв’язуючи його відносно частоти вихідної напруги, знаходимо період і частоту коливань мультивібратора:

$$T = 2(t_2 - t_1) = 2RC \ln\left(1 + 2 \frac{R1}{R2}\right),$$

$$f_0 = \frac{1}{2(t_2 - t_1)} = \frac{1}{2RC \ln\left(1 + 2 \frac{R1}{R2}\right)}.$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 51

Як видно з отриманих виразів, для збільшення частоти вихідної напруги необхідно зменшувати як постійну часу ланцюга негативного зворотного зв'язку τ , так і коефіцієнт передачі ланцюга позитивного зворотного зв'язку ($b_{пзз}$). Останнє автоматично приводить до зменшення амплітуди вихідної напруги $U_{Вих2}$.

Отримані вирази справедливі для припущення що $U_{Вих\max} = -|U_{Вих\max}|$ період і значення $b_{пзз}$ і τ не залежать від полярності вихідної напруги. Як правило, в реальних ОП умова

ряді випадків необхідно мати або прямокутну напругу, для якої тривалість імпульсів не рівняється тривалості пауз, або трикутну напругу з різними за абсолютними величинами значеннями похідної на різних інтервалах.

4.2. Порядок виконання роботи

1. Для дослідження неінвертуючого операційного підсилювача побудувати схему, наведену на рис. 4.5.

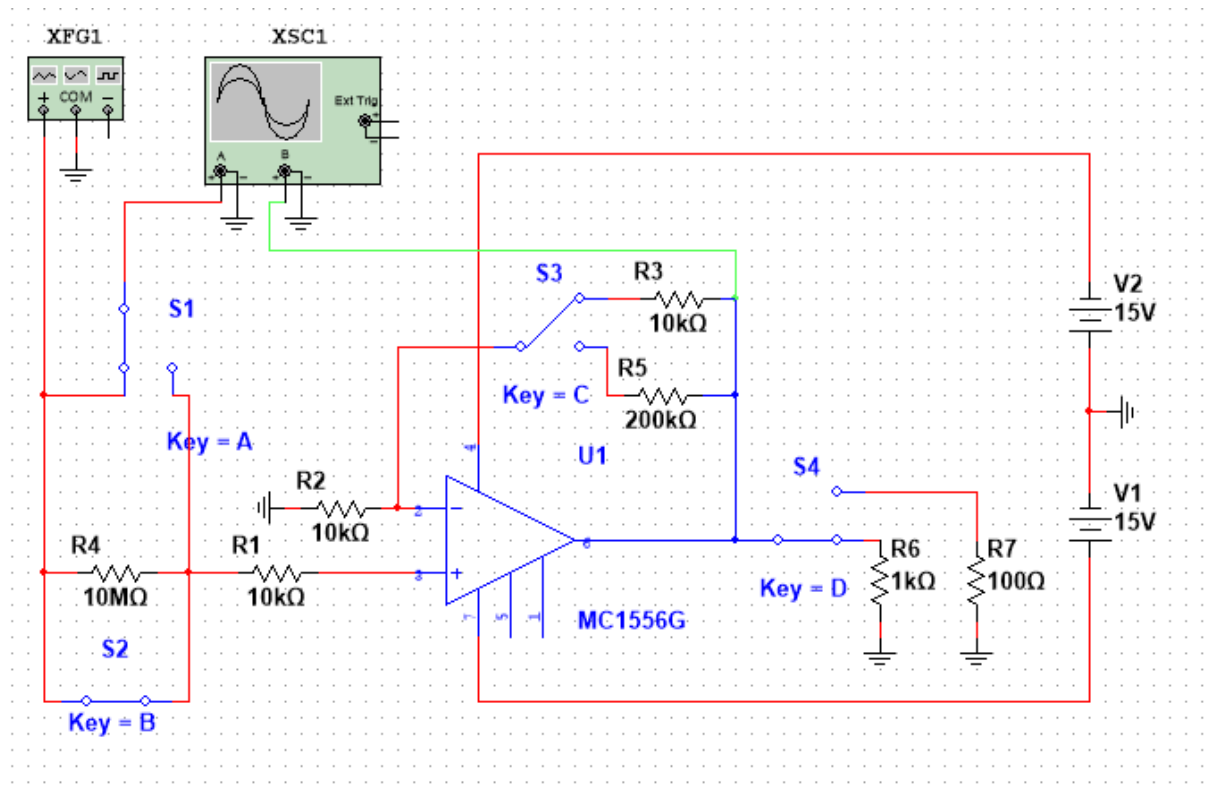
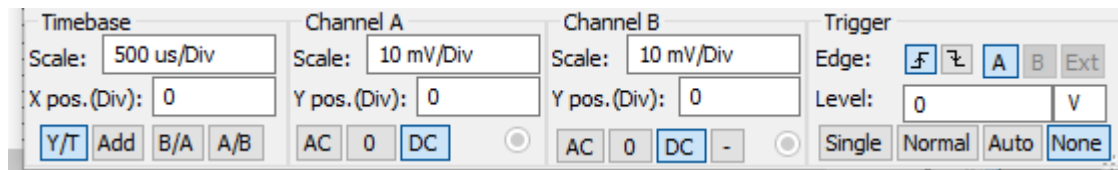


Рис. 4.5. Схема дослідження неінвертуючого підсилювача

2. На частоті $f = 1$ кГц зняти і побудувати амплітудні характеристики неінвертуючого підсилювача при різних опорах зворотного зв'язку.

Для цього заповнити таблицю 1 ($R_n = 1$ кОм). Початкове значення $U_{вх} = 10$ мВ.



На

основі отриманих показів побудувати графіки амплітудних характеристик, зробити висновки.

Таблиця 4.1 – Амплітудні характеристики неінвертуючого підсилювача

U _{ВХ}								
U _{ВІХ} , В; R _{ЗЗ} = 10 кОм								
U _{ВІХ} , В; R _{ЗЗ} = 200 кОм								

3. На частоті $f = 1$ кГц виміряти вхідний $R_{вх}$ і вихідний $R_{вих}$ опори неінвертуючого підсилювача при різних опорах зворотного зв'язку.

При вимірюванні вхідного опору неінвертуючого підсилювача задати ЕРС джерела сигналу, що дорівнює 1 В, послідовно з резистором R1 слід включити (розімкнути) додатковий резистор R4 опором 10 МОм. При вимірі вихідного опору підсилювачів резистор R4 замкнути.

4. Для дослідження інвертуючого операційного підсилювача побудувати схему, наведену на рис. 4.6.

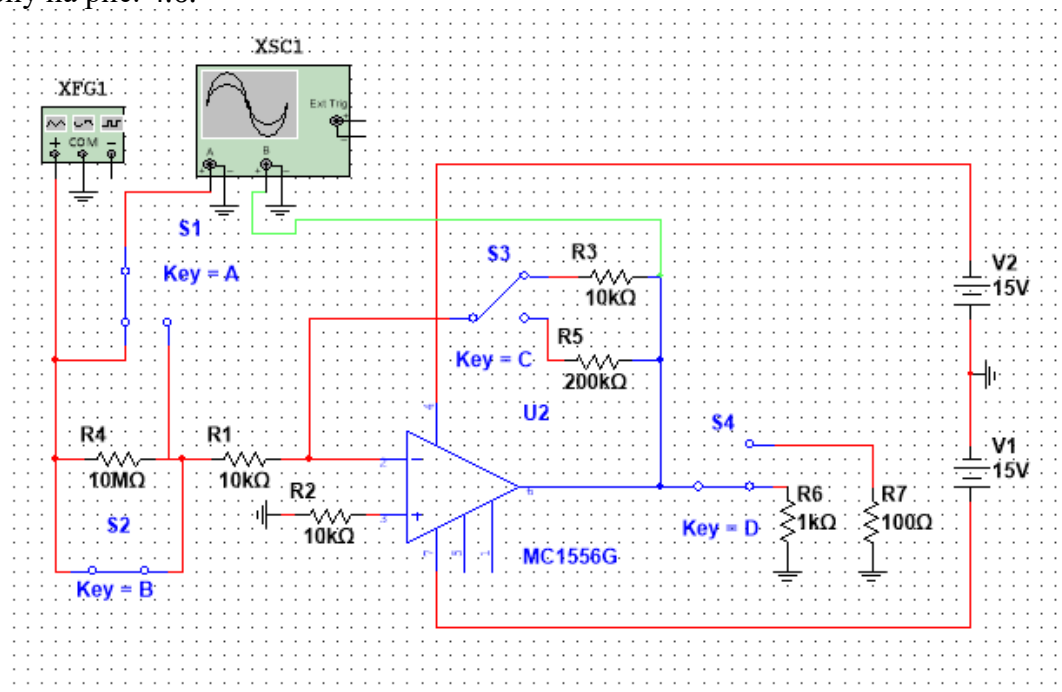
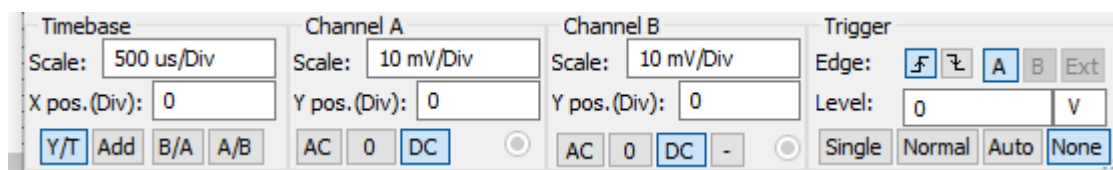


Рис. 4.6. Принципова схема інвертуючого підсилювача

5. На частоті $f = 1$ кГц зняти і побудувати амплітудні характеристики інвертуючого підсилювача при різних опорах зворотного зв'язку.

Для цього заповнити таблицю 4.2 ($R_n = 1$ кОм). Початкове значення $U_{вх} = 10$ мВ.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 53



На основі отриманих показів побудувати графіки амплітудних характеристик, зробити висновки.

Таблиця 4.2 – Амплітудні характеристики інвертуючого підсилювача

U _{вх}								
U _{вих} , В; R _{зз} = 10 кОм								
U _{вих} , В; R _{зз} = 200 кОм								

6. На частоті $f = 1$ кГц виміряти вхідний R_{вх} і вихідний R_{вих} опори інвертуючого підсилювача при різних опорах зворотного зв'язку.

При вимірюванні вхідного опору інвертуючого підсилювача задати ЕРС джерела сигналу, рівну 1 В, послідовно з резистором R1 слід включити (розімкнути) додатковий резистор R4 опором 10 МОм. При вимірі вихідного опору підсилювачів резистор R4 замкнути.

7. Зняти та побудувати амплітудно-частотні характеристики інвертуючого підсилювача при різних опорах зворотного зв'язку.

Заповнити таблицю 4.3 (R_н = 1 кОм). При знятті АЧХ інвертуючого підсилювача значення U_{вх} визначається по середині прямолінійної ділянки амплітудної характеристики. За підсумками отриманих показань будуються графіки АЧХ

Таблиця 4.3 Амплітудно-частотна характеристика інвертуючого підсилювача

f, кГц										
U _{вих} , В										

8. Відповідно до заданого варіанту (табл.4.4) побудувати автоколивальний мултивібратор на операційному підсилювачі. Визначити теоретичним, а потім експериментальним методами частоту вихідних імпульсів.

9. Оцінити похибку розрахунків та вплив величини опору резистору зворотного зв'язку на параметри імпульсів вихідного сигналу. Для цього змінити на 50 % один з параметрів RC-ланцюга і виконати експериментальні дослідження спочатку для R, потім – для C. Порівняти результати і зробити висновки.

4.3. Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- мету роботи;
- результати моделювання роботи автоколивального мултивібратора на операційному підсилювачі з результатами теоретичного та експериментального визначення параметрів імпульсів вихідного сигналу;

висновки, в яких відобразити результати досліджень, а також призначення та вплив елементів схеми на параметри вихідних сигналів

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 54

Таблиця 4.4

№ варіанту	C, мкФ	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R ₃ , кОм	R ₄ , кОм
1	1	1,1	3,9	51	20
2	0,99	1,2	4,3	56	22
3	0,98	1,3	4,7	62	24
4	0,97	1,5	5,1	68	27
5	0,96	1,6	5,6	75	30
6	0,95	1,8	6,2	82	33
7	0,94	2,0	6,8	91	36
8	0,93	2,2	7,5	10	39
9	0,92	2,4	8,2	11	43
10	0,91	2,7	9,1	12	47
11	1	3,0	1,1	13	51
12	0,99	3,3	1,2	15	56
13	0,98	3,6	1,3	16	62
14	0,97	3,9	1,5	18	68
15	0,96	4,3	1,6	20	75
16	0,95	4,7	1,8	22	82
17	0,94	5,1	2,0	24	91
18	0,93	5,6	2,2	27	10
19	0,92	6,2	2,4	30	11
20	0,91	6,8	2,7	33	12
21	1	7,5	3,0	36	13
22	0,99	8,2	3,3	39	15
23	0,98	9,1	3,6	43	16
24	0,97	1,1	3,9	47	18
25	0,96	1,2	4,3	51	20
26	0,95	1,3	4,7	56	22
27	0,94	1,5	5,1	62	24
28	0,93	1,6	5,6	68	27
29	0,92	1,8	6,2	75	30
30	0,91	2,0	6,8	82	33
31	1	2,2	7,5	91	36
32	0,99	2,4	8,2	10	39
33	0,98	2,7	9,1	11	43
34	0,97	3,0	1,1	12	47
35	0,96	3,3	1,2	13	51
36	0,95	3,6	1,3	15	56
37	0,94	3,9	1,5	16	62
38	0,93	4,3	1,6	18	68
39	0,92	4,7	1,8	20	24
40	0,91	5,1	2,0	22	27

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 55

4.4. Контрольні запитання

1. Дайте характеристику призначення, параметрів, характеристик та особливості використання ОП.
2. Приведіть схеми інвертуючого та неінвертуючого та ввімкнення ІМС ОП визначте їх основні параметри та дайте порівняльну характеристику.
3. Дайте характеристику неінвертуючого та і інвертуючого повторювача напруги та приведіть їх схемну реалізацію.
4. Як визначається вхідний і вихідний опір неінвертуючого операційного підсилювача.
5. Як визначається вхідний і вихідний опір неінвертуючого операційного підсилювача.
6. Дати визначення мультивібратора.
7. Пояснити вплив елементів схеми на параметри імпульсів.
8. Дати характеристику автоколивальному мультивібратору.
9. Привести схему автоколивального (загальмованого) мультивібратора на логічних елементах, пояснити принцип їх роботи.
10. Пояснити шляхи струму заряду та розряду конденсатора в автоколивальному мультивібраторі.
11. Пояснити принцип отримання імпульсних сигналів з різною тривалістю імпульсів та періодом.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 56

ДОДАТОК А

Ряди номінальних опорів та допуски резисторів

Номінальний опір – значення електричного опору резистору, на котре він розрахований та яке указується на ньому (чи на документації, що його супроводжує). Значення номінальних опорів звичайних та точних резисторів встановлюють згідно семи рядів (ряди Е), що наведені нижче в двох таблицях. Цифра після букви Е (номер ряду) вказує число номінальних значень в кожному десятиковому інтервалі.

Таблиця А1.

Ряди номінальних значень опорів резисторів з допуском $\pm 5\%$ та більш

Е3	Е6	Е12	Е24	Е3	Е6	Е12	Е24	Е3	Е6	Е12	Е24
1,0	1,0	1,0	1,0 1,1	2,2	2,2	2,2	2,2 2,4	4,7	4,7	4,7	4,7 5,1
		1,2	1,2 1,3			2,7	2,7 3,0			5,6	5,6 6,2
	1,5	1,5	1,5 1,6		3,3	3,3	3,3 3,6		6,8	6,8	6,8 7,5
		1,8	1,8 2,0			3,9	3,9 4,3			8,2	8,2 9,1

Допуски на номінали опору наводяться у відсотках і обираються у відповідності з рядом: $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,01$; $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; $\pm 1,0$; $\pm 2,0$; $\pm 5,0$; ± 10 ; ± 20 ; ± 30 відсотків. Для резисторів ряду Е3 допуск $\pm 30\%$; Е6 – $\pm 20\%$; Е12 – $\pm 10\%$; Е24 – $\pm 5\%$; Е48 – $\pm 2\%$; Е96 – $\pm 1\%$; Е192 – $\pm 0,5\%$.

Для резисторів з допусками $\pm 0,02$; $\pm 0,05$; $\pm 0,1$; $\pm 0,2\%$ номінальні опори можуть встановлюватись за будь-яким рядом, що вказується в технічній документації вибраного типу резистора.

Для прецизійних та надпрецизійних резисторів з допусками $\pm 0,001$; $\pm 0,002$; $\pm 0,005$; $\pm 0,01\%$ номінальні опори встановлюються з ряду, що отримують множенням чисел 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9 на 10^n , де n – ціле додатне число від 1 до 6.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 57

Таблиця А2.

Ряди номінальних значень опорів резисторів з допуском менш ніж 5%

E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	E192
100	100	100 101		150	150 152	226	226	226 229		340	340 344
	102	102 104	154	154	154 156		232	232 234	348	348	348 352
105	105	105 106		158	158 160	237	237	237 240		257	357 361
	107	107 109	162	162	162 164		243	243 246	365	365	365 370
110	110	110 111		165	165 167	249	249	249 252		374	374 379
	113	113 114	169	169	169 172		255	255 258	383	383	383 388
115	115	115 117		174	174 176	261	261	261 264		392	392 397
	118	118 120	178	178	178 180		267	267 271	402	402	402 407
121	121	121 123		182	182 184	274	274	274 277		412	412 417
	124	124 126	187	187	187 189		280	280 284	422	422	422 427
127	127	127 129		191	191 193	287	287	287 291		432	432 437
	130	130 132	196	196	196 198		294	294 298	442	442	442 448
133	133	133 138		200	200 203	301	301	301 305		453	453 459
	137	137 138	205	205	205 208		309	309 312	464	464	464 470
140	140	140 142		210	210 213	316	316	316 320		475	475 481
	143	143 145	215	215	215 218		324	324 328	487	487	487 493
147	147	147 149		221	221 223	332	332	332 336		499	499 505

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015			Ф-20.09- 05.02/2/175.00.1/Б/ОК16- 1-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 58 / 58

Продовження таблиці А2

E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	E192	E48	E96	E192
511	511	511 517		604	604 612	715	715	715 723		845	845 856
	523	523 530	612	612	612 626		732	732 741	866	866	866 876
536	536	536 542		634	634 642	750	750	750 759		887	887 898
	549	549 556	649	649	649 657		798	768 777	909	909	909 920
562	562	562 569		665	665 673	787	787	787 796		931	921 942
	576	576 583	681	681	681 690		806	806 816	953	953	953 965
590	590	590 597		698	698 706	825	825	825 835		976	976 988