

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/152.00.1/Б/ОК16- 2022
	Екземпляр № 1	Арк 86 / 1

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»  
протокол від 16 грудня 2022 р.  
№ 13

### **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ для проведення лабораторних робіт з навчальної дисципліни «ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»  
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані інформаційно-  
вимірювальні системи»  
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і  
робототехніки

кафедра метрології та інформаційно-вимірювальної техніки

Рекомендовано на засіданні  
кафедри метрології та  
інформаційно-вимірювальної  
техніки  
30 серпня 2022р., протокол № 8

Розробники: к.т.н., доцент кафедри метрології та інформаційно-  
вимірювальної техніки ЧЕПЮК Ларіна, асистент кафедри метрології та  
інформаційно-вимірювальної техніки  
ВОРОНОВА Тетяна

Житомир  
2022

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 2

Методичні рекомендації до лабораторних робіт з дисципліни «ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»/ Укладачі Л.О. Чепюк, Т.С. Воронова. – Житомир: ДУ «Житомирська політехніка», 2022. – 86 с.

Укладачі: Л.О. Чепюк, Т.С. Воронова

Рецензенти:

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

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/3

## ЗМІСТ

<b>Лабораторна робота № 1</b>	
Освоєння методів дослідження електронних схем в середовищі програми Electronics Workbench (Multisim)	4
<b>Лабораторна робота № 2</b>	
Дослідження однофазних випрямлячів	28
<b>Лабораторна робота № 3</b>	
Розрахунок та дослідження підсилювачів зі СЕ класу А	37
<b>Лабораторна робота № 4</b>	
Розрахунок, моделювання та дослідження підсилювачів на основі ОП	49
<b>Лабораторна робота № 5</b>	
Дослідження схем на операційному підсилювачі	64
<b>Лабораторна робота № 6</b>	
Параметричні стабілізатори напруги	69
<b>Лабораторна робота № 7</b>	
Дослідження муьтивібратора	75
<b>Лабораторна робота № 8</b>	
Дослідження генератора імпульсів	80
<b>Додатки</b>	85

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 4

## Лабораторна робота № 1 ОСВОЄННЯ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ В СЕРЕДОВИЩІ ПРОГРАМИ ELECTRONICS WORKBENCH (MULTISIM).

### 1.1. 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.

Меню «Place» містить набір команд для створення схем.

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 5

для мікроконтролерів.

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

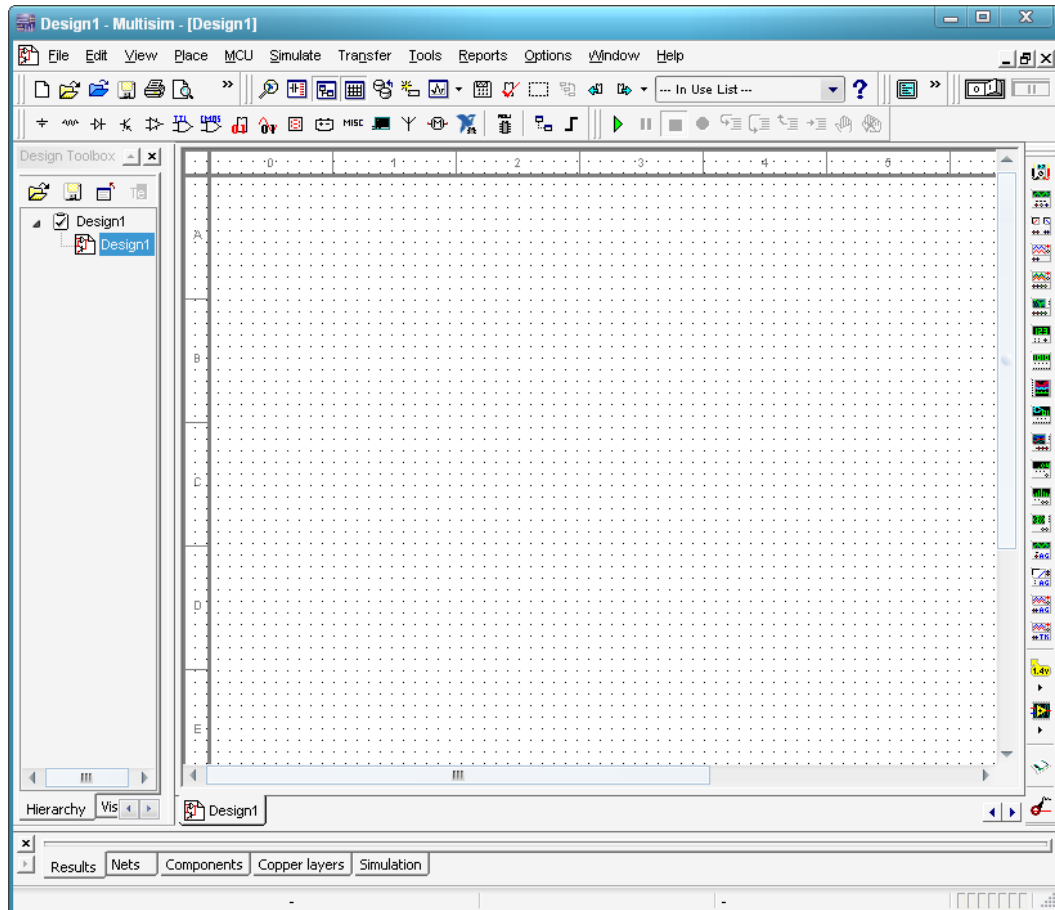


Рис. 1.1 Вікно програми Multisim

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 виводити 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.

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

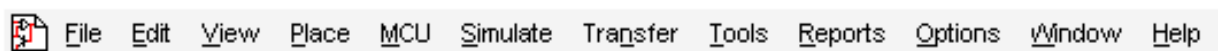


Рис. 1.2 Поле меню програми Multisim

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 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.

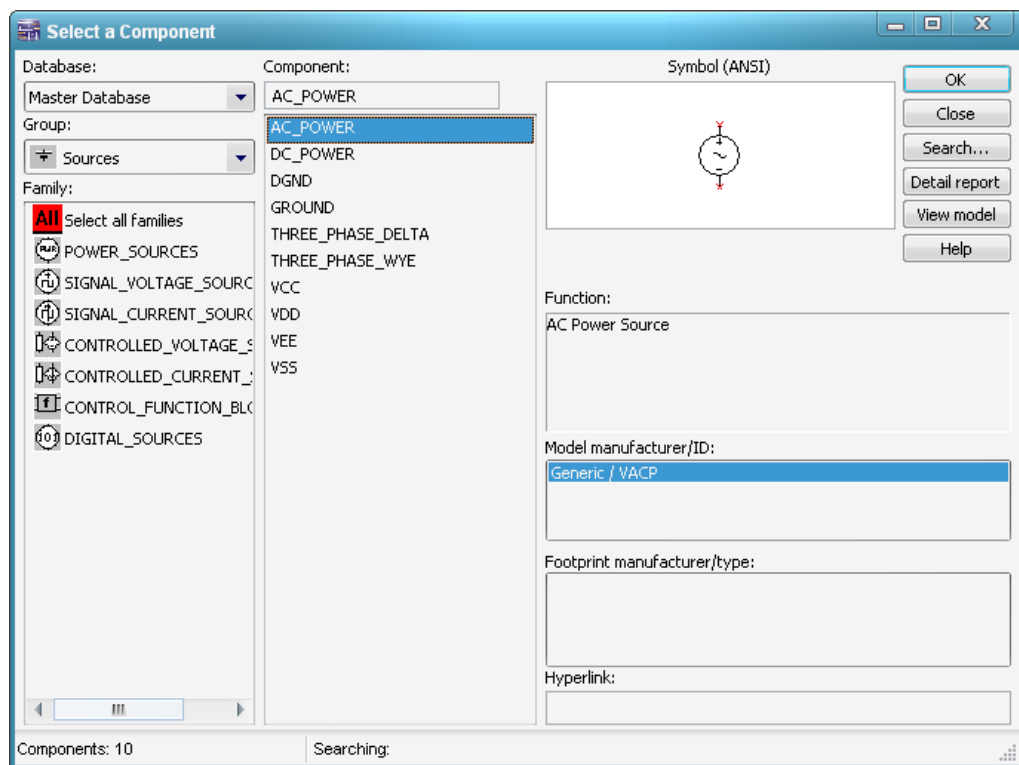


Рис. 1.4 Елементи, що знаходяться в підгрупі POWER\_SOURCES бібліотеки Sources

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 елемента. Він переноситься на заплановане місце, після чого знову натискається ліва кнопка миші (для

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 7

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 провідники 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.

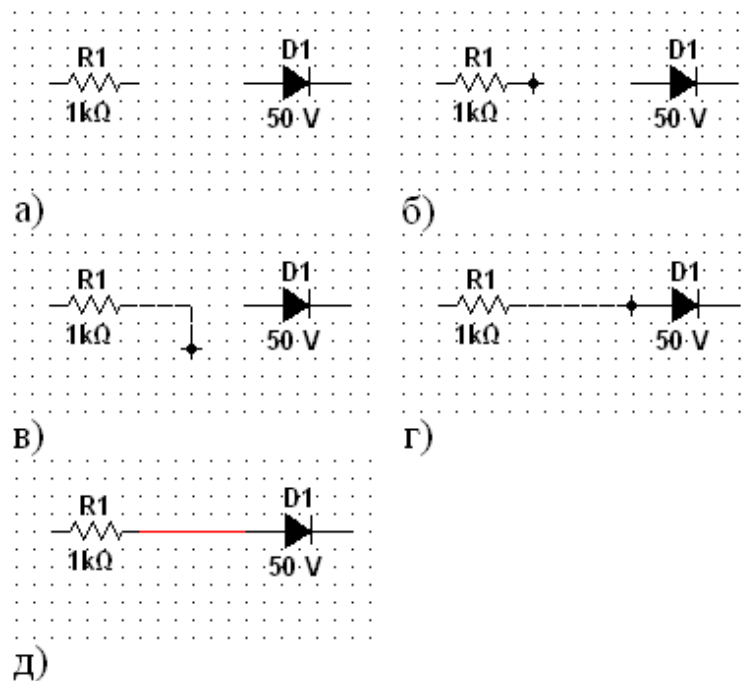


Рис. 1.5. З'єднання двох елементів схеми провідниками в програмі Multisim: а) два окремих компонента; б) виділено вивід першого компонента; в) ведеться з'єднувальний провід; г) провід підведено до другого компонента; д) з'єднання готове

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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 8

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 окремих 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 компонента 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).

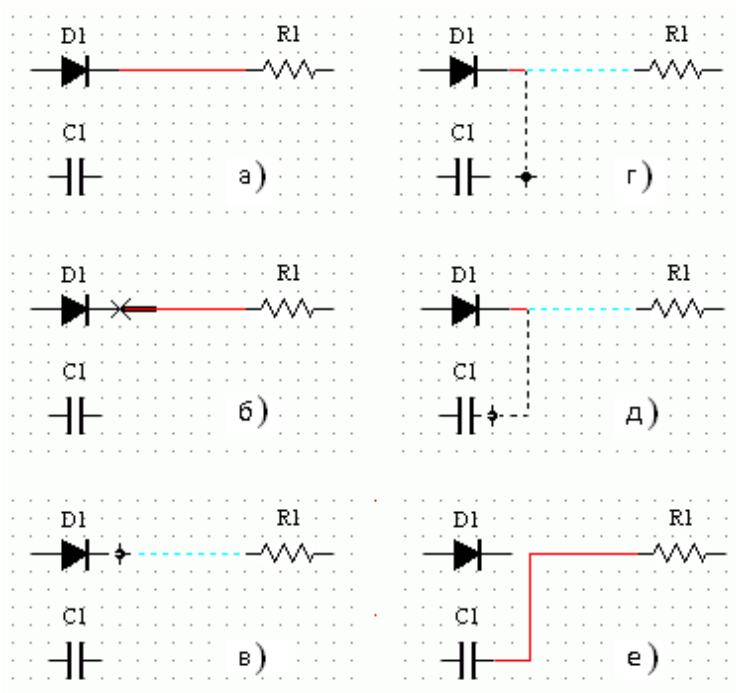


Рис. 1.6 Зміна наявних з'єднань: а) початковий стан; б) зміна форми курсору миші при виборі виводу; в) зміна форми курсору після натискання кнопки миші; г) прокладення нового з'єднання; д) приєднання нового компонента; е) нове з'єднання

### 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



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/9

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.

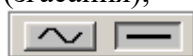
### 1.1.3.1. Мультиметр

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

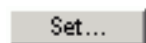
Розглянемо призначення кнопок керування:



- 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;

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

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

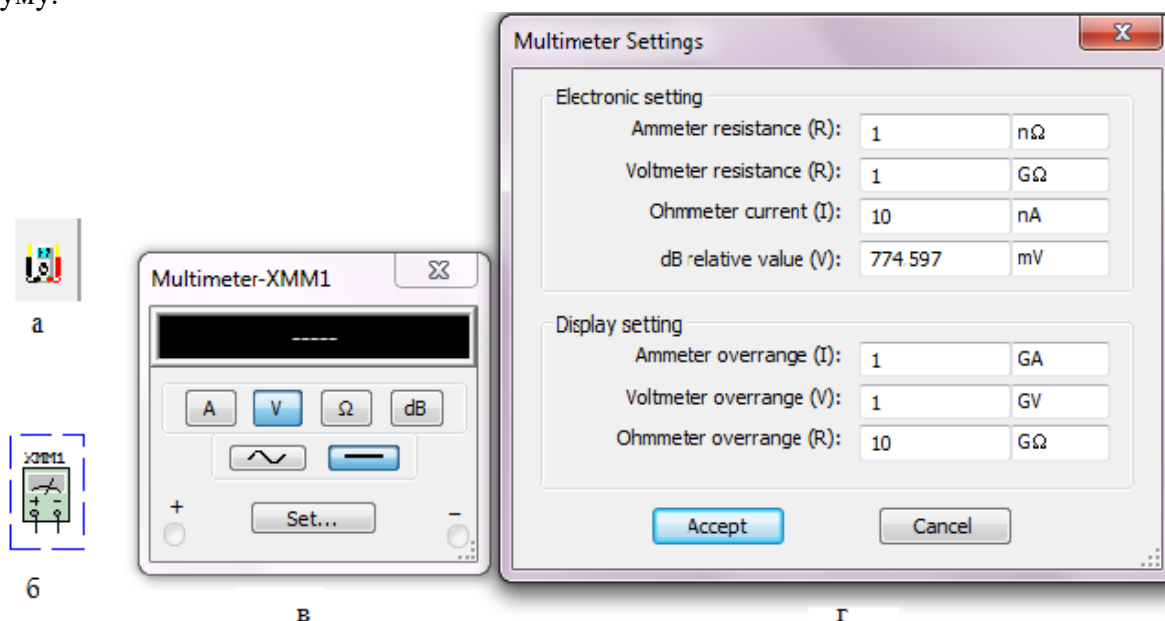


Рис. 1.7 Мультиметр: а) позначення на панелі контрольно-вимірювальних приладів;  
б) позначення на схемі;  
в) лицьова панель; г) вікно установок режимів роботи

### 1.1.3.2. Функціональний генератор

Функціональний генератор наведений на рис. 1.8.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/10

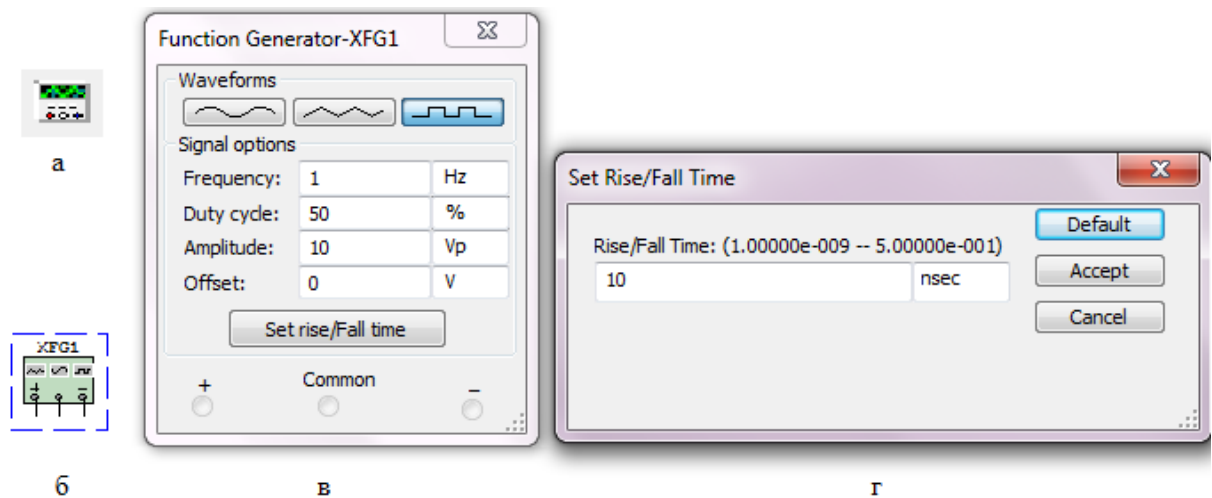



Рис. 1.8 Функціональний генератор: а) позначення на панелі контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі; в) лицьова панель; г) вікно встановлення часу наростання/спаду прямокутних імпульсів

Керування генератором здійснюється наступними органами керування:

-  - вибір форми вихідного сигналу: синусоїдальна (за умовчанням), трикутна і прямокутна;
- Frequency  Hz - установка частоти вихідного сигналу;
- Duty Cycle  % - 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;
- Amplitude  V - установка амплітуди вихідного сигналу;
- Offset  V - 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).
- +  Common  - - умовне позначення вихідних клем; при заземленні клеми Common (загальний) на клеммах «-» і «+» отримуємо парафазний сигнал.

### 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 клеми для підключення до схеми.

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

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/11

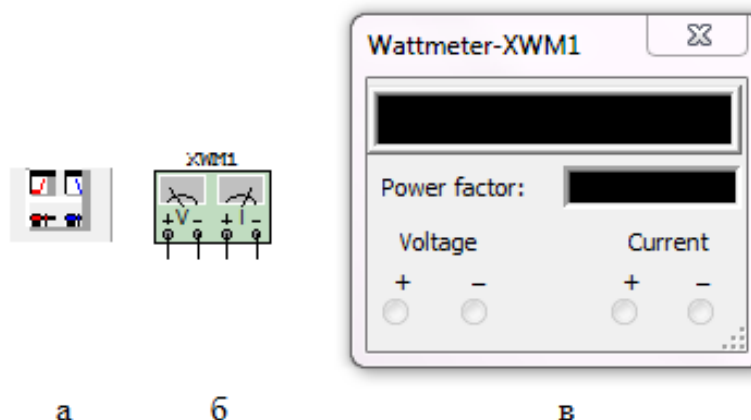


Рис. 1.9 Ватметр: а) позначення на лінійці контрольно-вимірювальних приладів; б) позначенні на схемі; в) лицьова панель

### 1.1.3.4. Осцилограф

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

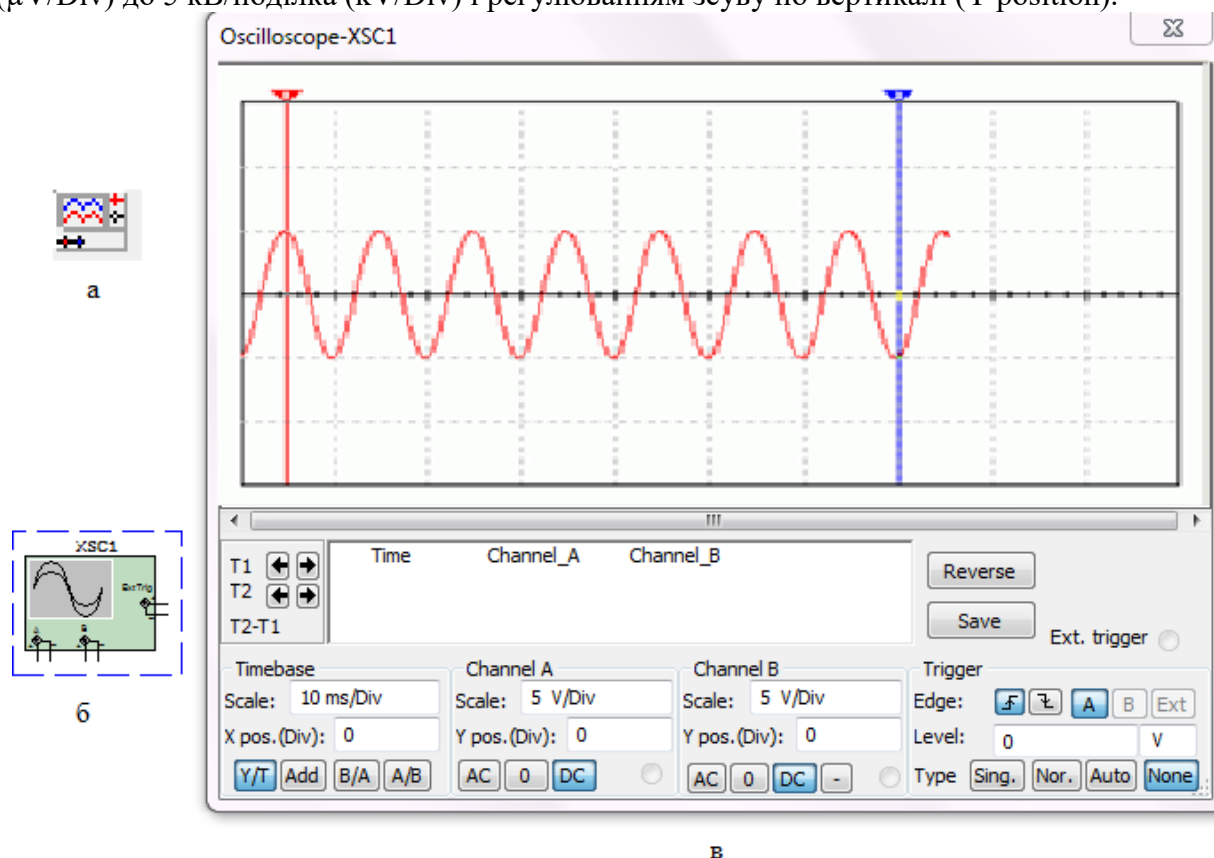







Рис.1.10 Осцилограф: а) позначення на лінійці контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі; в) лицьова панель









Вибір режиму по входу здійснюється натисканням кнопок **AC** **0** **DC**. Режим AC призначений для спостереження тільки сигналів змінного струму (його ще називають

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/12

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    . У режимі Y/T (звичайний режим, включений за замовчуванням) реалізуються наступні режими розгортки: по вертикалі - напруга сигналу, по горизонталі — час; в режимі В/А: по вертикалі - сигнал каналу В, по горизонталі - сигнал каналу А; в режимі А/В: 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).

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 А або В), 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 клеми Ground у правому верхньому куті приладу.

У осцилографа 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.

### 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 перемішуваної

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/13

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.

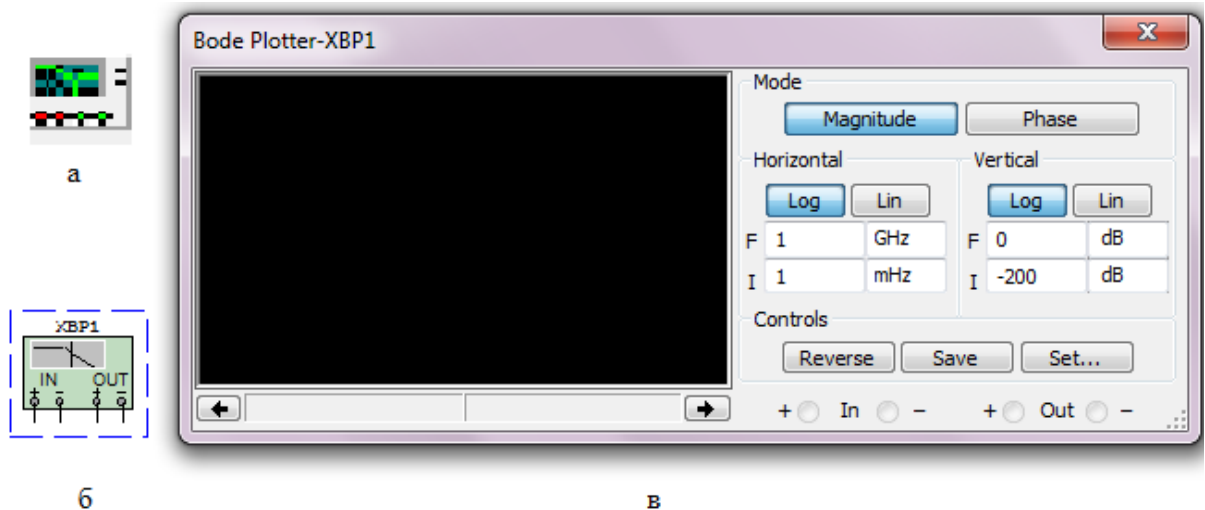


Рис. 1.11 Вимірювач АЧХ та ФЧХ: а) позначення на лінійці контрольно-вимірювальних приладів; б) позначення на схемі; в) лицьова панель

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 рухомих 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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/14

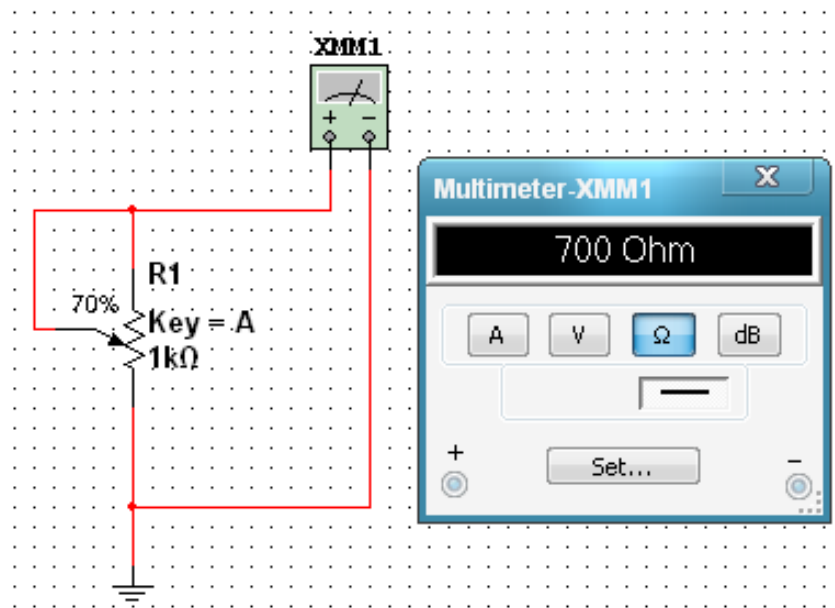


Рис. 1.12 Перший спосіб включення потенціометра

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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/15

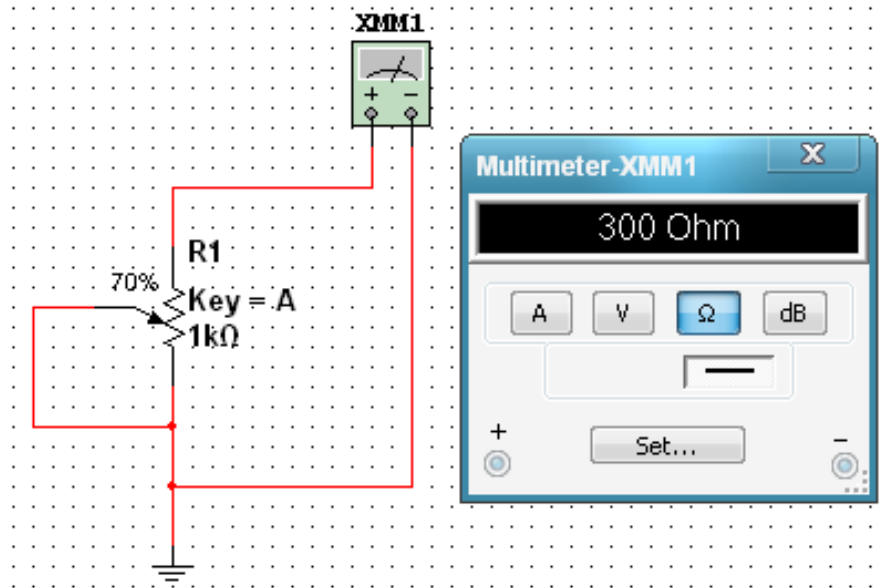


Рис. 1.13 Другий спосіб включення потенціометра

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.

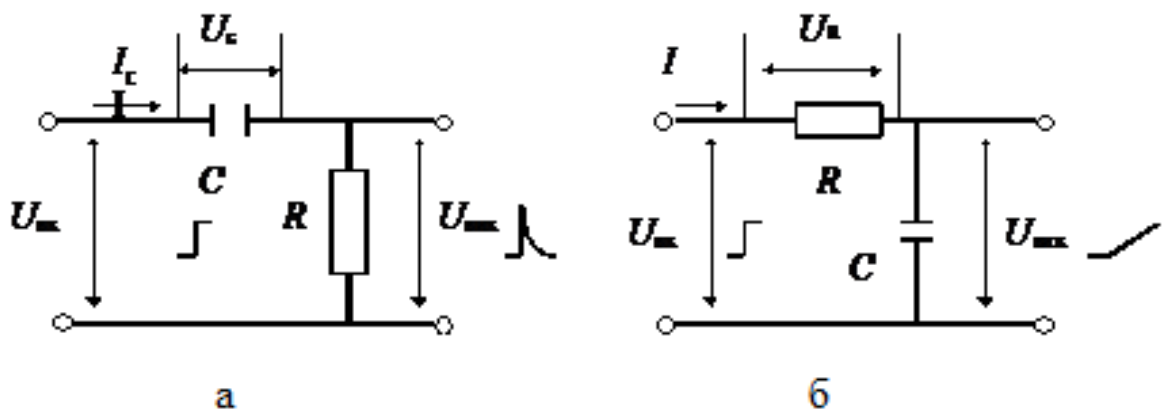


Рис.1.14 Прості  $RC$ -схеми: а – диференціююча; б – інтегруюча

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 швидкодюю. Таким чином схеми досліджують у часовій області, що дозволяє оцінити часові спотворення сигналів.

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.



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/16

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.

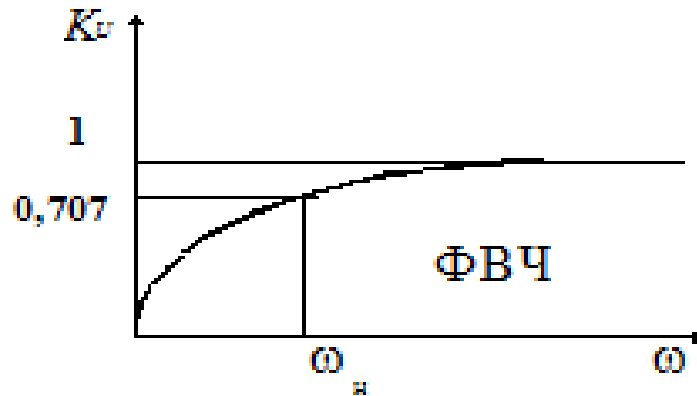


Рис. 1.15 Частотна характеристика диференційної схеми

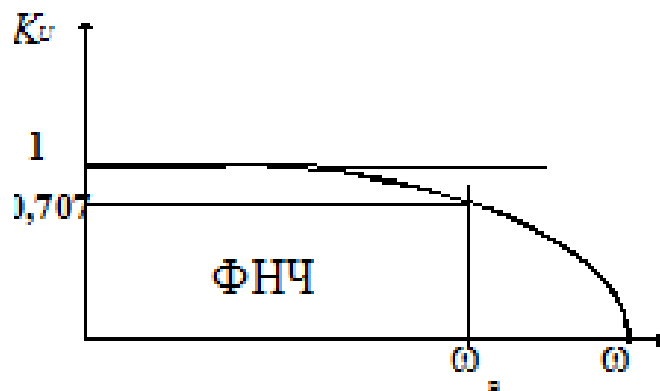


Рис. 1.16 Частотна характеристика інтегруючої схеми

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  $U_{BX}$  (рис. 1.17,а) напруга на ньому (заряд конденсатора) змінюється за експонентою (рис. 1.17, б):

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

Напруга на виході:

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

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



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/17

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

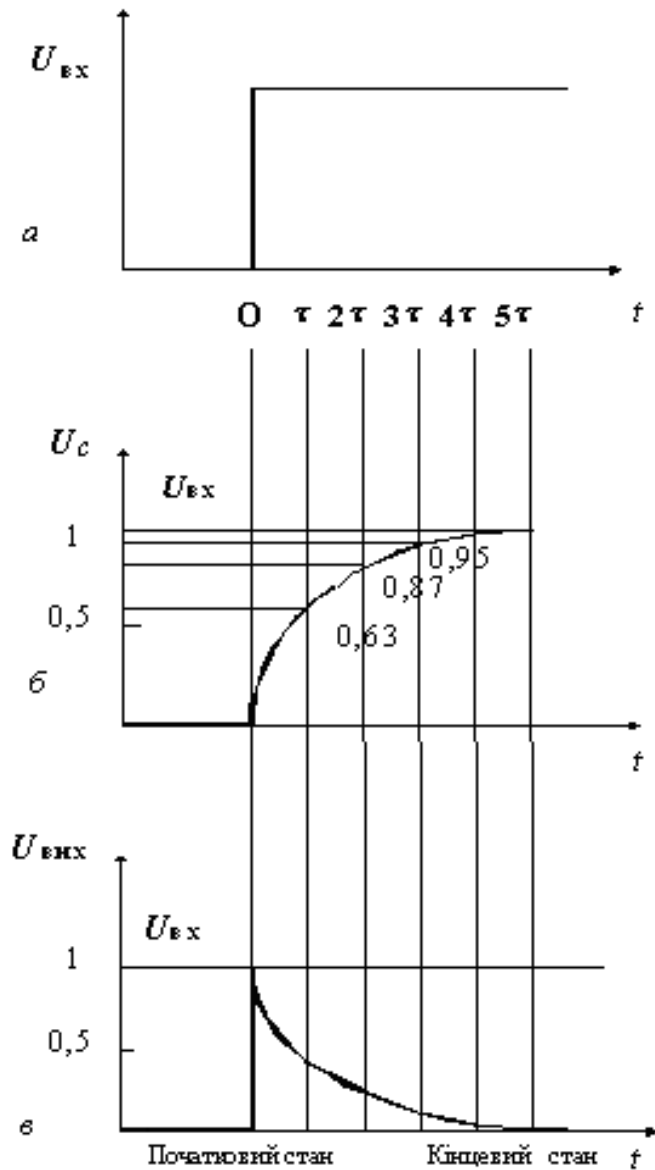


Рис. 1.17 Перехідні процеси в диференційній RC-схемі

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  $t = \tau$  напруга на виході дорівнюватиме:

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

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

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

Напруга на конденсаторі:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/18

$$U_c = U_{вх} - U_{вих}$$

$$U_c = 0,63 \times U_{вх}$$

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

$$U_{вих} = U_{вх} \times e^{-\frac{2\tau}{\tau}} = U_{вх} \times e^{-2} = 0,13 \times U_{вх}$$

$$U_c = 0,87 \times U_{вх}$$

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

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

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 перетворення 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  $t \gg \tau$ .

Такі ж  $RC$ - кола використовують у лінійних схемах, зокрема, у підсилювачах. Треба зауважити, що в цьому випадку вимоги до величини  $\tau$  зовсім інші. Необхідно, щоб інформаційний сигнал при підсиленні зберігав форму, а це можливо коли за час дії імпульсу ( $t_i$ ) заряд конденсатора суттєво не зміниться. Це відбувається за умови  $t_i \ll \tau$ . 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:

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

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  $\tau$  була значно більшою від тривалості вхідного імпульсу  $\tau \ll t_{івх}$ , 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 обумовлює зменшення спаду напруги на резисторі (рис. 1.18, б), а на виході ( $U_{вих} = U_c$ ) напруга зростає до значення  $U_{вих} = U_{вх}$  (рис. 1.18, в).

Перехідний процес так само, як і у диференційних ланцюгах оцінюють за  $2\tau$  при фіксації на рівні  $(1 - 0,9) \times U_{вих}$ , або за  $3\tau$  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.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/19

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  $t_i$ .

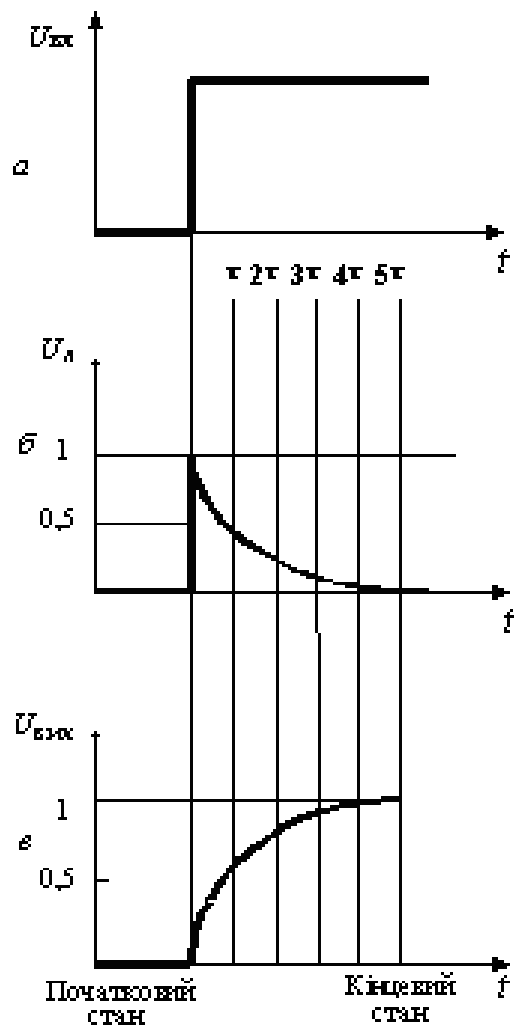


Рис. 1.18 Перехідні процеси в інтегруючій RC-схемі

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- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/20

Схему, показану на рисунку 1.14, б, умовно називають інтегруючим колом. Операція інтегрування відбувається лише за умови  $\tau \gg t_{iBX}$ . При цьому форма вихідного імпульсу дуже відрізняється від форми вхідного (на вході прямокутний імпульс – на виході експоненційна пилка). Якщо така ж схема має співвідношення  $\tau \ll t_{iBX}$ , 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.

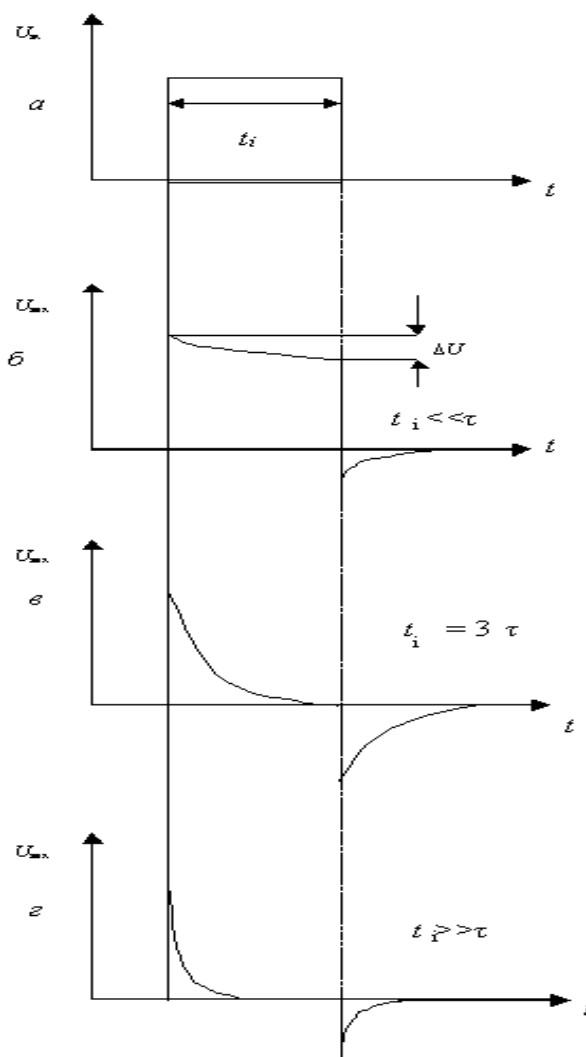


Рис. 1.19 Залежність форми вихідних імпульсів диференційних RC-схем від співвідношення  $t_i$  та  $\tau$ :

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

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

Модуль коефіцієнта передачі визначають за формулою:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/21

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

Смугу 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  $\omega \geq \omega_H$ , тобто є фільтрами верхніх частот (ФВЧ) (рис. 1.15).

### 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  $\omega = 1/\tau$ , то модуль коефіцієнта передачі зменшується у  $\sqrt{2}$  рази. Таки чином, інтегруючі ланцюжки пропускають сигнали із частотою від  $\omega = 0$  і до  $\omega = \omega_B$ , 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).

## 1.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Ознайомитись з принциповою електричною схемою подільника напруги (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.

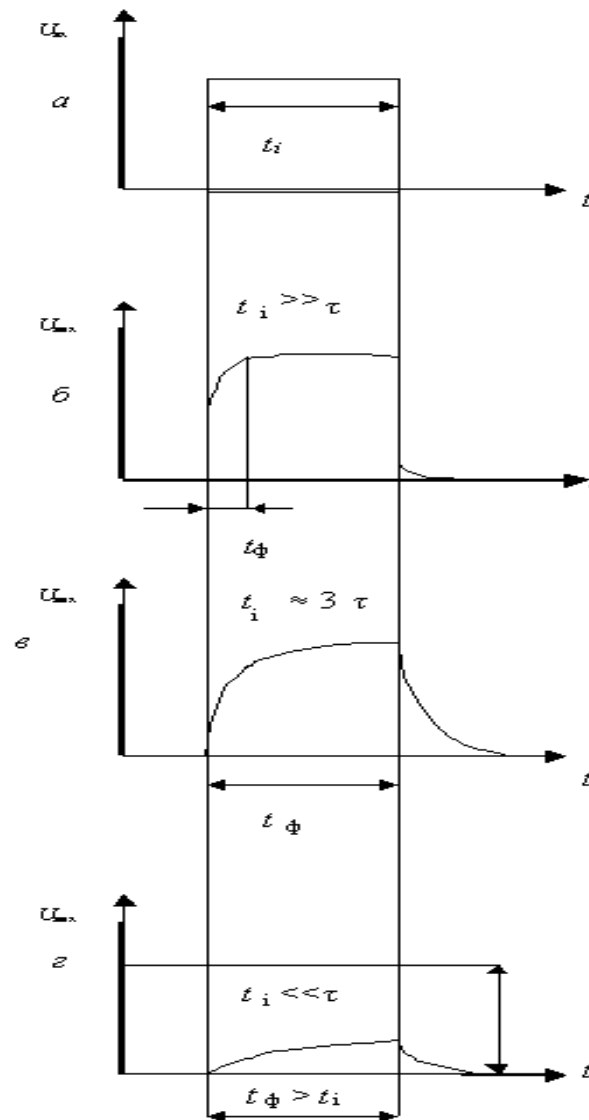


Рис. 1.20 Залежність форми вихідних імпульсів диференційних RC-схем від співвідношення  $t_i$  та  $\tau$ :

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

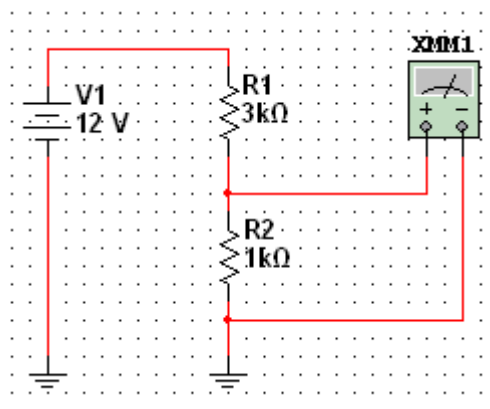


Рис. 1.21 Схема для моделювання подільника напруги

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/23

2. Дослідіть отриману схему. Для цього:
  - встановіть наступні початкові значення:  $V_1=12\text{В}$ ,  $R_1=1\text{кОм}$ ,  $R_2=1\text{кОм}$ ;
  - увімкніть моделювання;
  - відкрийте мультиметр та запишіть значення вихідної напруги;
  - змінюючи значення опору резистора  $R_1$  з кроком  $1\text{кОм}$  до  $10\text{кОм}$ , запишіть значення вихідних напруг.
  - розрахуйте експериментальні коефіцієнти ділення даної схеми при кожному значенні опору  $R_1$  за формулою  $K_d = U_{\text{вх}}/U_{\text{вих}}$ ;
  - порівняйте отримані значення коефіцієнтів ділення з теоретичними, що розраховуються за формулою  $K_d = (R_1 + R_2)/R_2$ ;
  - результати занесіть у протокол.

### 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  $10\text{кГц}$ , амплітуда  $10\text{В}$ .
4. Дослідити частотні характеристики диференційної схеми допомогою вимірювача АЧХ та ФЧХ (*Bode Plotter*). У відповідних віконцях встановити: мінімальне послаблення вихідного сигналу  $F = 0\text{дБ}$  (максимальний коефіцієнт передачі), максимальне послаблення  $I = -40\text{дБ}$  (мінімальний коефіцієнт передачі), максимальна частота  $f = 5\text{МГц}$ , мінімальна частота  $f = 100\text{Гц}$ .
5. Увімкнути моделювання. За допомогою візирної лінійки визначити нижню граничну частоту  $f_n$  диференційної RC-схеми (частоту, на якій коефіцієнт передачі зменшується до  $3\text{дБ}$ ). 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  $10\text{кГц}$  (період  $100\text{мкс}$ ), заповнення (*Duty cycle*)  $50\%$  (тривалість імпульсів  $50\text{мкс}$ ), амплітуда  $10\text{В}$ .
11. Виставити мінімальні значення опору потенціометра та ємності конденсатора.
12. Виставити режими осцилографа: тривалість розгортки (*Time base*)  $20\text{мкс/поділ}$ , тип функціональної залежності  $Y/T$ , чутливість каналу «A» –  $20\text{В/поділ}$ , зміщення по вертикалі осцилограми сигналу каналу «A» (*Y position*)  $2\text{под}$ , тип входу каналу A «DC» (закритий вхід, за змінним струмом), чутливість каналу «B» –  $10\text{В/под.}$ , зміщення по вертикалі осцилограми сигналу каналу «B» (*Y position*) –  $1.2\text{под}$ . 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.

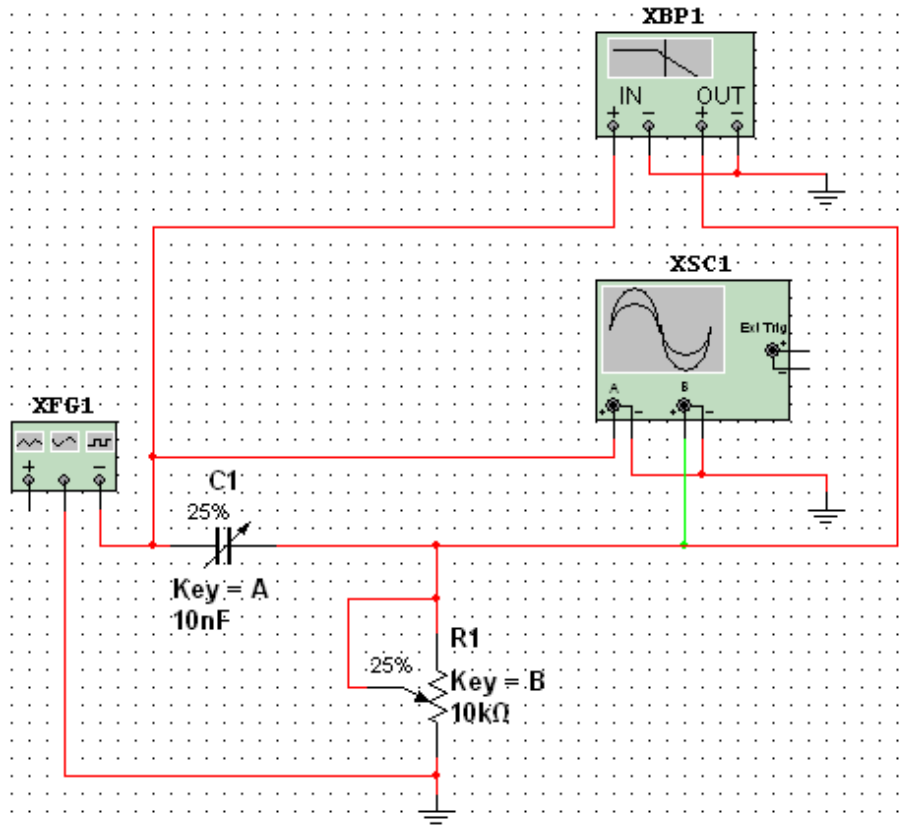


Рис. 1.22 Схема для дослідження диференціюючої RC-схеми

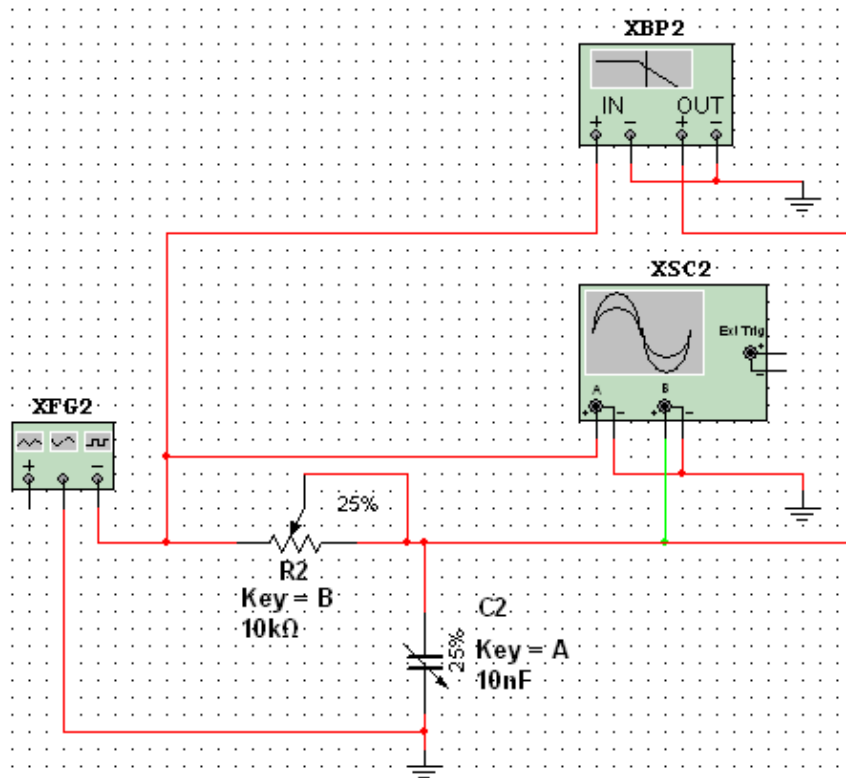


Рис. 1.23 Схема для дослідження інтегруючої RC-схеми



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/25

### 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.

2. 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 T-подібного мосту.

1. Побудувати схему подвійного T-подібного мосту (рис. 1.24).

2. Використовуючи таблицю 1.1 виставити значення опорів в резисторах так, щоб  $R_1 = R_2 = 2R_3$ , і величину ємності конденсаторів із співвідношенням  $C_1 = C_2 = 0,5C_3$ . 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
R, кОм	10	20	20	20	10	5	1	20
C, нФ	16	16	32	3,2	3,2	3,2	16	1,6
F <sub>1</sub> кГц	0,5	0,2	0,08	1,0	3,0	5,0	6,0	2,0
F <sub>2</sub> кГц	10	3,0	3,0	10	20	50	25	30
Позначення	№ варіанта							
	9	10	11	12	13	14	15	16
R, кОм	20	2,0	10	5,1	20	2,4	2,4	51
C, нФ	33	3,3	15	15	15	4,7	47	1,5
F <sub>1</sub> кГц	0,07	10,0	0,4	0,8	0,2	5,0	0,5	0,8
F <sub>2</sub> кГц	2,0	60	8,0	15	2,5	80	8,0	25
Позначення	№ варіанта							
	17	18	19	20	21	22	23	24
R, кОм	20	2,0	10	5,1	20	2,4	2,4	51
C, нФ	33	3,3	15	15	15	4,7	47	1,5
F <sub>1</sub> кГц	0,07	10,0	0,4	0,8	0,2	5,0	0,5	0,8
F <sub>2</sub> кГц	2,0	60	8,0	15	2,5	80	8,0	25

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/26

3. Перевести функціональний генератор в режим формування тестового гармонічного сигналу ( ). Встановити амплітуду коливання - напруга повинна відповідати номеру варіанта. Частоти –  $F_1$ ,  $F_2$  (табл.1.1) та  $F_3 = f_0$ .

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.

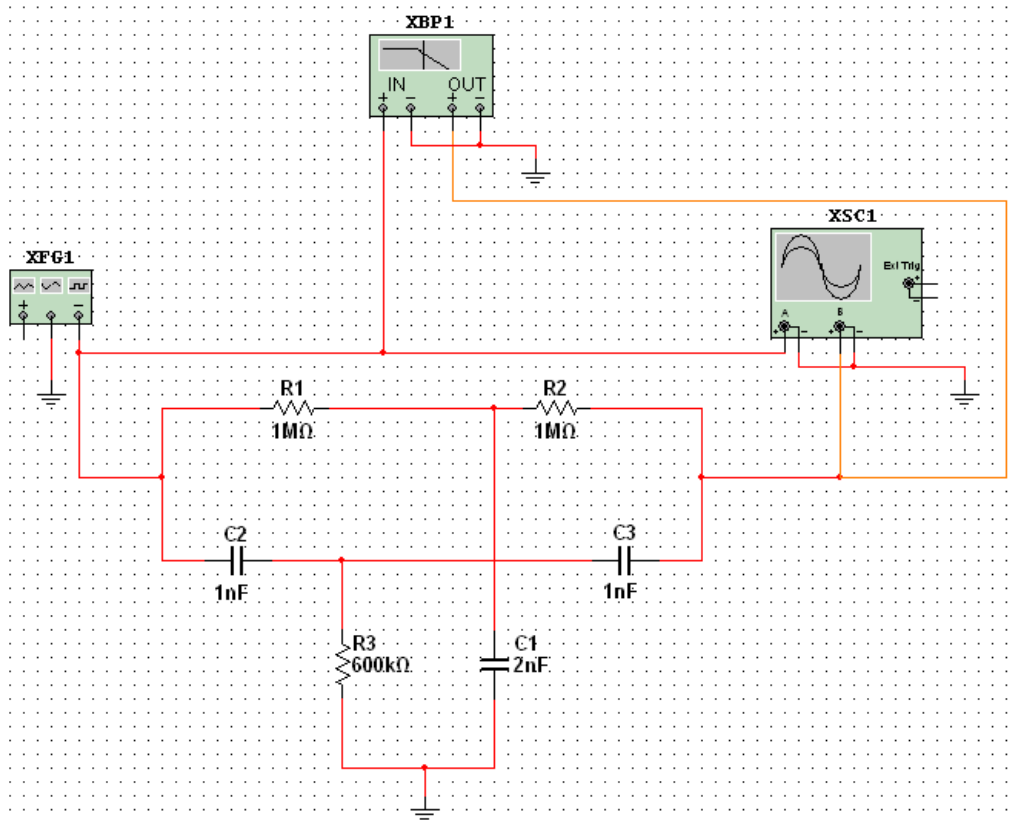


Рис. 1.24 Схема для дослідження подвійного Т-подібного мосту

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 27

### 1.3. Оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- мету лабораторної роботи;
- досліджувану принципову електричну схему;
- результати досліджень у вигляді таблиці зі значеннями опору  $R_1$ , вимірною 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 ;
- 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- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/28

## Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи і дослідження схем однофазних випрямлячів. Дослідження впливу ємності конденсатора згладжувального фільтра на форму і величину випрямленої напруги.

### 2.1. Загальні теоретичні відомості

**Випрямляч** - це пристрій, який призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм.

Випрямлячі підрозділяють на некеровані та керовані. За допомогою некерованих випрямлячів отримують випрямлену напругу незмінної величини. При необхідності змінювати (регулювати) величину випрямленої напруги або струму застосовують керовані випрямлячі.

За числом фаз випрямленої напруги змінного струму випрямлячі підрозділяють на однофазні, трифазні та багатофазні.

За величиною потужності випрямлячі підрозділяють на випрямлячі малої, середньої та великої потужності.

На рис. 2.1 приводиться принципова схема однофазного однонапівперіодного випрямляча. Випрямляч складається з трансформатора  $TV$ , до вторинної обмотки якого послідовно приєднані діод  $VD$  та навантаження  $R_H$ .

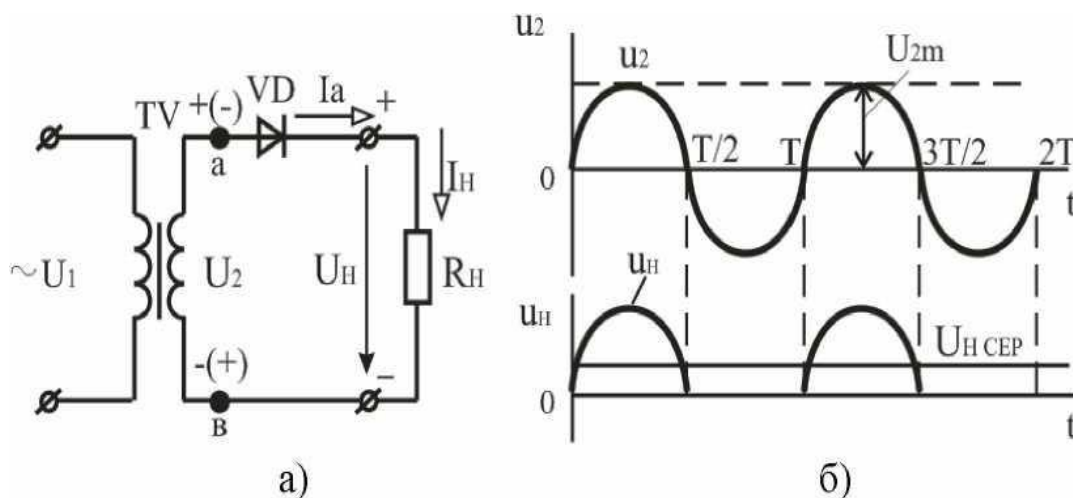


Рис. 2.1 - Однофазний однонапівперіодний випрямляч: а - схема; б - часові діаграми напруги

Основні параметри схеми однонапівперіодного випрямляча:

$$U_{H\text{ CEP}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,45 U_2 \quad (2.1)$$

або

$$U_2 = \frac{\pi U_{H\text{ CEP}}}{\sqrt{2}} \approx 2,22 U_{H\text{ CEP}} \quad (2.2)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/29

Струм вторинної обмотки трансформатора:

$$I_{HCEP} = 0,45 \frac{U_2}{R_H} \quad (2.3)$$

$$I_2 \approx 1,57 I_{HCEP} \quad (2.4)$$

Коефіцієнт пульсації

$$K_{II} \approx 1,57 \quad (2.5)$$

Зворотна напруга, що прикладається до закритого діода під час зворотного напівперіоду:

$$U_{зв\ max} = \sqrt{2} U_2 \quad (2.6)$$

На рис. 2.2 приводиться принципова схема однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом. Випрямляч з нульовим виводом складається з трансформатора  $TV$ , діодів  $VD\ 1$ ,  $VD\ 2$  та резистора навантаження  $R_H$ .

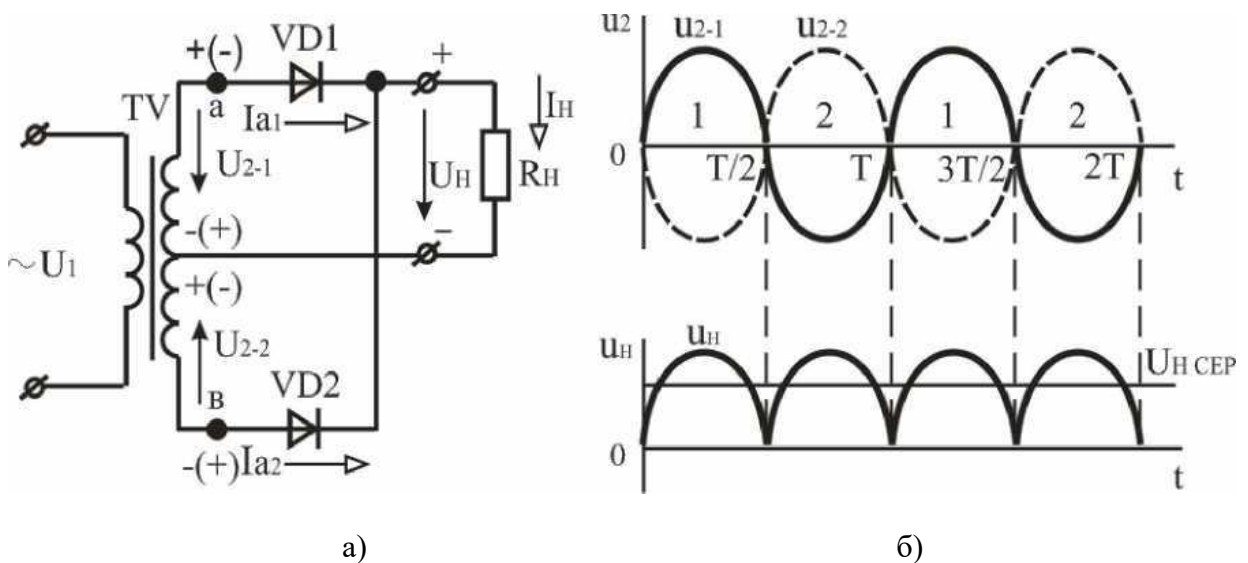


Рис. 2.2 - Однофазний двонапівперіодний випрямляч з нульовим виводом: а - схема; б - часові діаграми напруги

Основні співвідношення для однофазного двонапівперіодного випрямляча з нульовим виводом:

$$U_{HCEP} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 0,9 U_2 \quad (2.7)$$

Звідси

$$U_2 = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_{HCEP} \approx 1,11 U_{HCEP} \quad (2.8)$$

Коефіцієнт пульсацій:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/30

$$K_{II} \approx 0,67 \quad (2.9)$$

Середній струм через діод:

$$I_a \approx \frac{I_{HCEP}}{2} \quad (2.10)$$

Зворотна напруга, що прикладається до закритого діода:

$$U_{зв \max} = 2\sqrt{2} U_2 \quad (2.11)$$

або

$$U_{зв \max} = \pi U_{HCEP2} \quad (2.12)$$

Струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi}{4} I_{HCEP} \quad (2.13)$$

На рис. 2.3 приводиться принципова схема однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча. У схему випрямляча входять трансформатор  $TV$  з однією вторинною обмоткою і випрямний міст з чотирьох діодів  $VD1$ - $VD4$ .

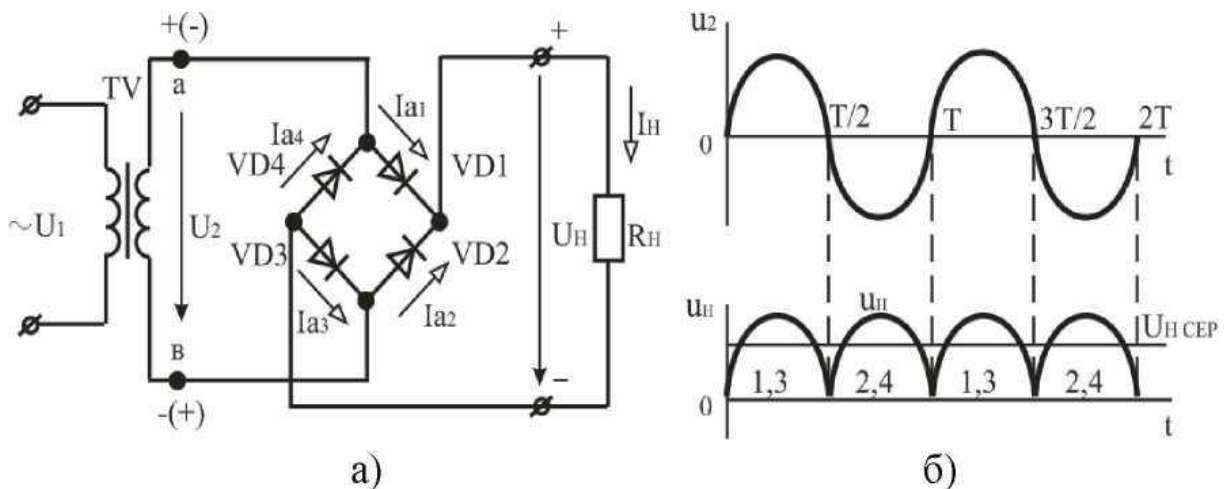


Рис. 2.3 - Однофазний мостовий випрямляч: а - схема; б - часові діаграми напруги

Основні співвідношення для однофазного мостового випрямляча визначаються співвідношеннями (2.7-2.9).

Максимальна зворотна напруга:

$$U_{зв \max} = \sqrt{2} U_2 = \frac{\pi}{2} U_{HCEP} \quad (2.14)$$

тобто вона вдвічі менше, ніж в схемі випрямляча з нульовою точкою.

Струм вторинної обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{HCEP} \quad (2.15)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/31

Випрямлячі призначені для живлення постійним струмом різних систем і пристроїв промислової електроніки, які вирішують завдання управління, регулювання, контролю, відображення інформації і т. п.

**Згладжувальні фільтри** призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги, включаються в схему джерела живлення після випрямляча.

Основним параметром згладжувальних фільтрів є коефіцієнт згладжування, який дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході фільтру до коефіцієнта пульсацій на його виході, тобто

$$q = \frac{K_{ПВХ}}{K_{ПВИХ}} \quad (2.16)$$

Найпростіший ємнісний фільтр  $C_f$  вмикають паралельно резистору навантаження  $R_H$  (рис 2.4, а).

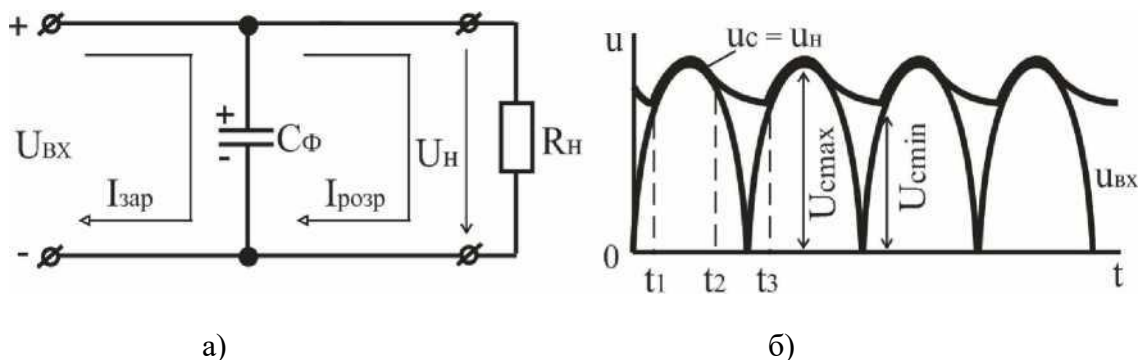


Рис. 2.4 - Схема ємнісного фільтру та часові діаграми напруги однофазного двонапівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром: а - схема; б - часові діаграми напруги

## 2.2. Підготовка до виконання роботи

1. Привести визначення і класифікацію випрямлячів однофазного струму.
2. Привести схеми однофазних випрямлячів: а) однофазної однонапівперіодної; б) однофазної двонапівперіодної з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора; в) однофазної двонапівперіодної мостової.
3. Для схем однофазних випрямлячів визначити параметри випрямленої напруги: середнє значення випрямленої напруги  $U_{H\text{СЕР}} (U_d)$ , середнє значення випрямленого струму  $I_{H\text{СЕР}} (I_d)$ , коефіцієнт пульсацій  $K_H$  і зворотну напругу діодів  $U_{зв\text{ МАХ}}$  при заданих значеннях напруги на вторинній обмотці трансформатора  $U_2$  і опору резистора навантаження  $R_H$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 2.1.
4. Для схем однофазних випрямлячів побудувати графіки зміни в часі напруг на діодах і резисторі навантаження при синусоїдальній вхідній напрузі.
5. Привести класифікацію згладжувальних фільтрів і описати роботу ємнісного фільтру.

### 2.3. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму Multisim. Скласти схему для дослідження однофазного однонапівперіодного випрямляча (рис. 2.5).

Таблиця 2.1 – Вихідні дані

№ вар.	$U_2$ , В	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_2$ , В	$R_H$ , Ом	№ вар.	$U_2$ , В	$R_H$ , Ом
1	10	20	11	60	70	21	10	55
2	15	25	12	55	75	22	14	60
3	20	30	13	50	80	23	18	65
4	25	35	14	45	20	24	22	70
5	30	40	15	40	25	25	26	75
6	35	45	16	35	30	26	30	80
7	40	50	17	30	35	27	34	85
8	45	55	18	25	40	28	38	90
9	50	60	19	20	45	29	42	95
10	55	65	20	15	50	30	44	100

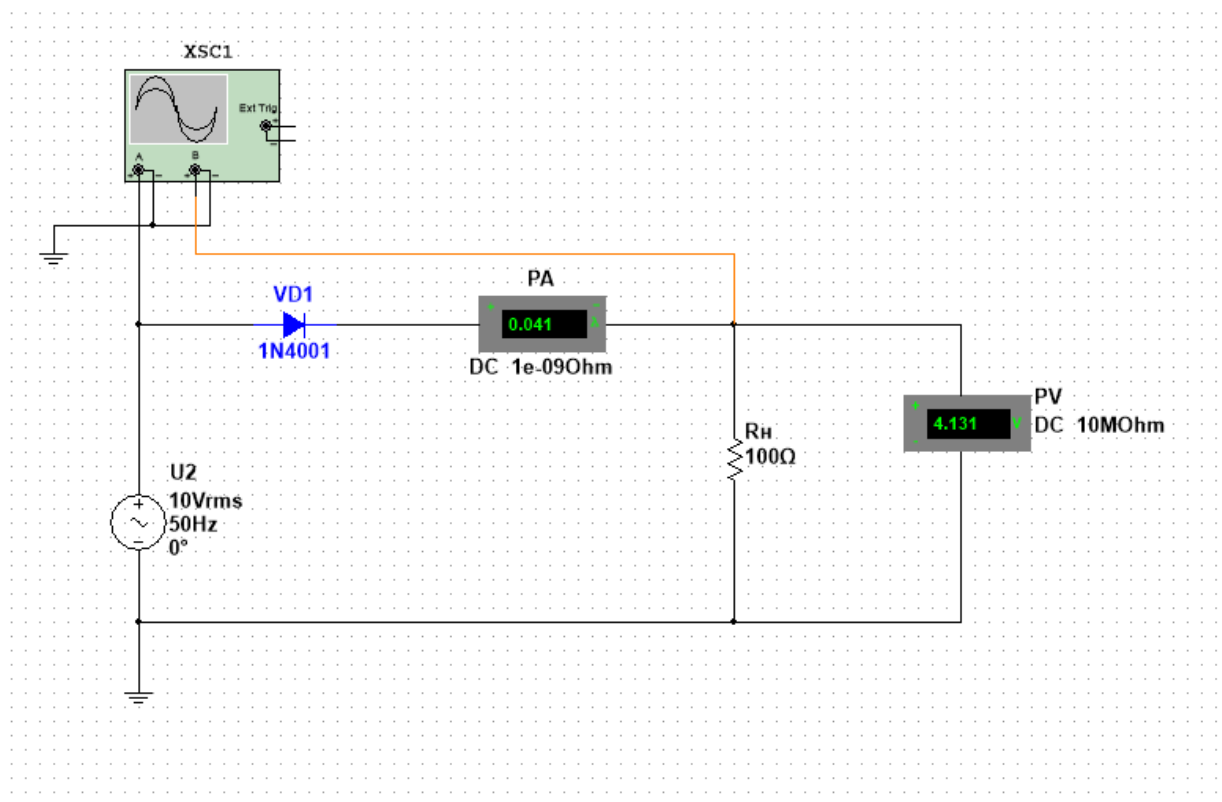


Рис. 2.5 – Схема дослідження однофазного однонапівперіодного випрямляча

2. Установити задане значення напруги джерела живлення  $U_2$  і опору резистора навантаження  $R_H$  (табл. 2.1).

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/33

схеми встановити кольоровою.

4. Включити схему. Записати показання приладів: вольтметра  $PV$  (середнє значення випрямленої напруги  $U_{H\text{СЕР}}$ ) і амперметра  $PA$  (середнє значення випрямленого струму  $I_{H\text{СЕР}}$ ).

5. На віртуальному осцилографі за допомогою візирних ліній визначити амплітудні значення вхідної і вихідної напруги випрямляча. Визначити величину падіння напруги на діоді.



Рис. 2.6 - Осцилограми напруг однофазного однонапівперіодного випрямляча

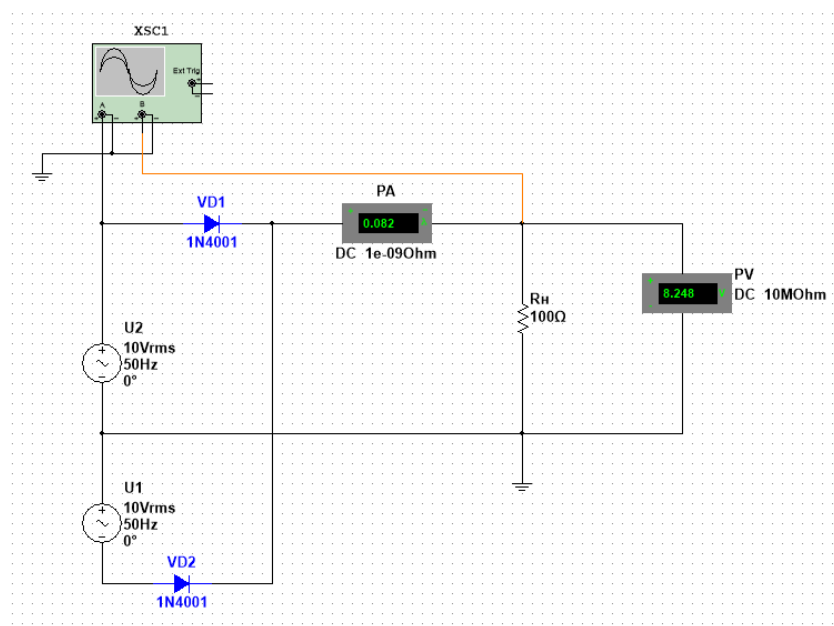


Рис. 2.7 – Схема дослідження однофазного двонапівперіодного випрямляча з середньою точкою

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/34

6. Привести осцилограми вхідної і вихідної напруги випрямляча (див. рис. 2.6).
7. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рис. 2.7). Виконати пп. 2-6.
8. Набрати схему для дослідження однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча (рис. 2.9). Виконати пп. 2, 3.
9. Включити схему. При відключеному конденсаторі  $C$  згладжувального фільтра (перемикач  $S1$  розімкнуть) записати показання приладів: вольтметра  $PV$  (середнє значення випрямленої напруги  $U_{H\text{ CEP}}$ ) і амперметра  $PA$  (середнє значення випрямленого струму  $I_{H\text{ CEP}}$ ) і привести осцилограми напруги на виході випрямляча (див. рис. 2.10).
10. За допомогою перемикача  $S1$  підключити конденсатор  $C$  згладжувального фільтра і, змінюючи величину ємності конденсатора згідно табл. 2.2, записати показання приладів (вольтметра  $PV$ , амперметра  $PA$ ) і привести осцилограми вихідної напруги випрямляча (див. рис. 2.11).

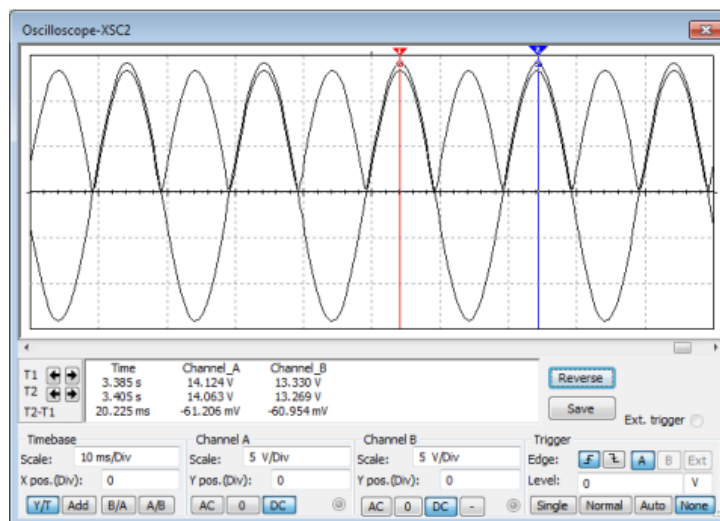


Рис. 2.8 – Осцилограми напруг однофазного двонапівперіодного випрямляча з середньою точкою

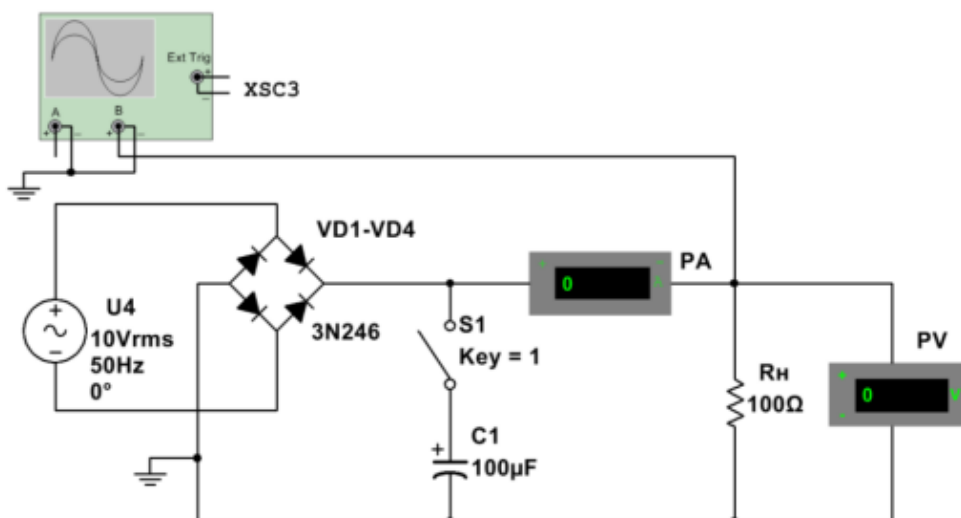


Рис. 2.9 – Схема дослідження однофазного двонапівперіодного мостового випрямляча

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/35

Таблиця 2.2 – Результати експериментальних досліджень ємнісного згладжувального фільтра

C, мкФ	0	10	50	100	200	500	1000
$U_{H\text{ CEP}}$							
$I_{H\text{ CEP}}$							

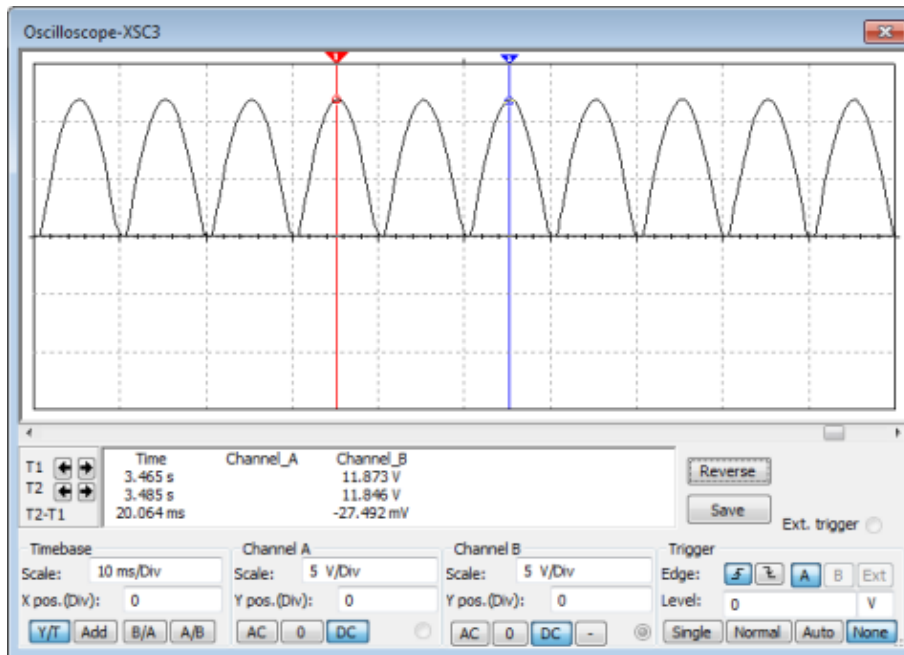


Рис. 2.10 – Осцилограма напруги на виході однофазного двоінапівперіодного мостового випрямляча

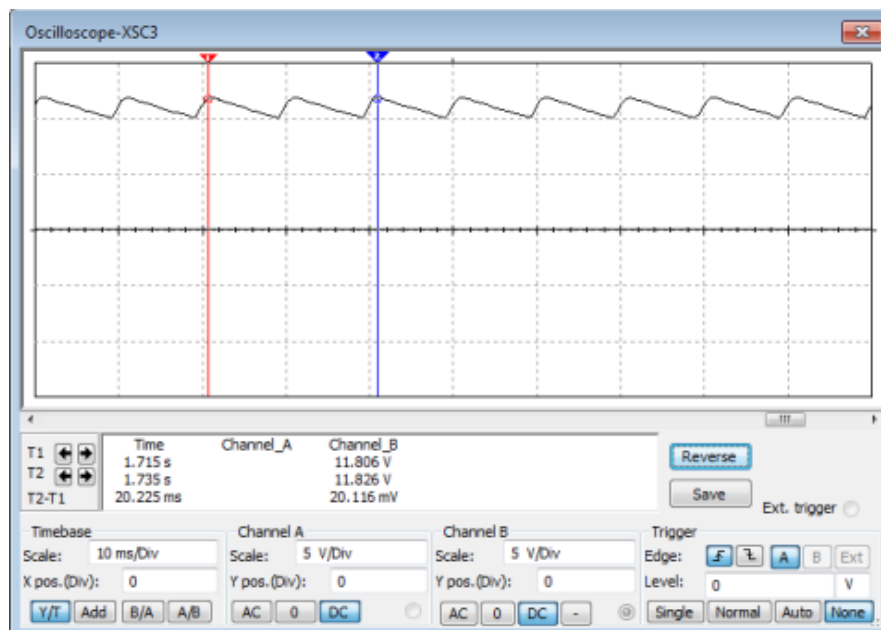


Рис. 2.11 – Осцилограма напруги на виході однофазного двоінапівперіодного мостового випрямляча з ємнісним згладжувальним фільтром

11. За даними таблиці 2.2 побудувати графік залежності вихідної напруги мостового

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/36

випрямляча від величини ємності конденсатора згладжувального фільтра:  $U_{\text{Н СЕР}} = f(C)$ .  
12.

#### 2.4 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для домашньої підготовки.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.
4. Висновки по роботі. Аналіз і порівняння для кожної з схем випрямлячів теоретичних і експериментальних результатів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/37

## Лабораторна робота № 3 РОЗРАХУНОК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ зі СЕ класу А

### 3.1. Мета роботи

- провести розрахунок однокаскадного підсилювача зі спільним емітером (СЕ) класу А на біполярному транзисторі з фіксованим струмом бази згідно з наданими вхідними даними;
- провести моделювання розрахованого підсилювача в середовище програми MULTISIM або ELECTRONIC WORKBENCH 5.12(EWB5.12);
- провести дослідження підсилювача і порівняти експериментальні результати з розрахунковими;
- дослідити залежність нелінійних спотворень підсилювача від режиму роботи транзистора та амплітуди сигналу.

### 3.2. Стислі теоретичні відомості

*Електронним підсилювачем* називається пристрій, що дозволяє перетворювати вхідні електричні сигнали в сигнали більшої потужності без істотного спотворення їхньої форми.

Процес перетворення здійснюється за допомогою нелінійного активного елемента (в даному випадку – транзистора), який збільшує потужність сигналу, беручи додаткову енергію з джерела живлення. Підсилення сигналу відбувається в результаті впливу сигналу на напругу і струми, які формуються на елементах та колах підсилювача в результаті приєднання до нього джерела живлення, енергія якого використовується для підвищення потужності вихідного сигналу. Тому існує залежність показників підсилювача за змінним струмом і електричним режимом, який обумовлений постійною напругою джерела живлення.

Відповідно до цього розрахунок підсилювача проводиться у два етапи. Спочатку визначають параметри елементів, які визначають електричний режим роботи за постійним струмом (встановлюють номінали резисторів та вибирають тип транзистора). На другому етапі встановлюють номінали реактивних елементів (конденсаторів) і розраховують параметри та характеристики підсилювача за змінним струмом.

В даній роботі необхідно буде провести розрахунок та дослідження підсилювача, в якому емітер транзистора є спільним для вхідного та вихідного кола (підсилювач зі СЕ). Його схема представлена на рис. 2.1. В зв'язку з тим, що струм бази практично не залежить від параметрів транзистора схема називається підсилювачем з фіксованим струмом бази.

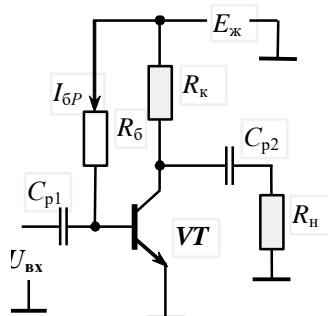


Рис. 3.1. Схема підсилювача зі СЕ

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/38

Шляхом еквівалентних перетворень будь-яку схему можна звести до послідовного включення двох елементів. При цьому характеристики елементів у загальному випадку в залежності від початкової схеми можуть мати довільний характер: це можуть бути або два лінійних елементи, або лінійний і нелінійний елементи, або два нелінійних елементи. Один з них або обоє можуть бути керованими.

Більша частина підсилювачів містить один керований нелінійний елемент – транзистор і пасивні лінійні елементи – резистори (наявність ємностей і індуктивностей на даному етапі аналізу не враховується). Тому схема підсилювача (зокрема, його вихідне коло) з джерелом напруги живлення  $E_{ж}$  може бути зведена до схеми, зображеної на рис. 3.2,а.

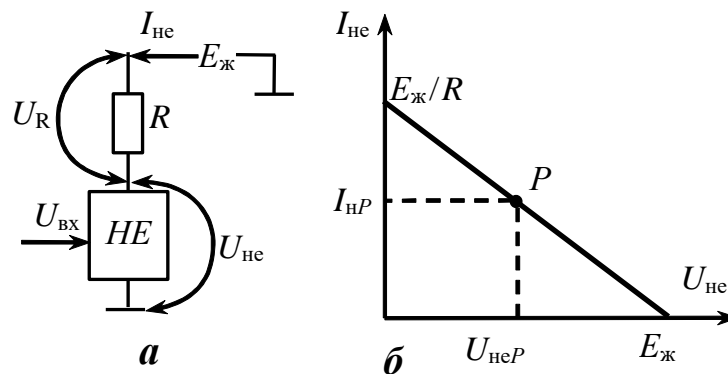


Рис. 3.2. До розрахунку схеми з нелінійним елементом

Для підсилювача з фіксованим струмом бази таке перетворення просто зводиться до зміни позначень: нелінійний елемент ( $HE$ ) збігається з транзистором, а резистор  $R$  – з  $R_k$ . Через нього протікає струм  $I_{не}$  ( $I_k$ ), та на ньому виникає напруга  $U_{не}$  ( $U_{ке}$ ). Нелінійний елемент керується вхідним сигналом  $U_{вх}$ .

На підставі законів Кірхгофа та Ома маємо:

$$E_{ж} = U_R + U_{не} = I_{не} R + U_{не}. \quad (3.1)$$

В системі координат  $U_{не}$  й  $I_{не}$  вираз (4.1) являє собою лінію (рис. 3.2,б):

$$I_{не} = + E_{ж} / R - U_{не} / R. \quad (3.2)$$

Вона проходить через точки  $E_{ж}$  і  $(E_{ж} / R)$  на осях координат. Цю лінію називають *лінією навантаження* або *навантажувальною прямою*, а позначені постійні складові  $U_{неP}$  ( $U_{кеP}$ ) та  $I_{неP}$  ( $I_{кP}$ ), як правило, називають *напругою* і *струмом спокою*. Вони характеризують режим роботи пристрою за постійним струмом – режим при постійному значенні вхідного управляючого сигналу  $U_{вх}$ , тобто, при відсутності змінної складової цього сигналу.

З наведеного випливає, що при будь-якому струмі нелінійного елемента падіння напруги на ньому завжди буде відповідати значенню, яке визначається навантажувальною прямою і не буде залежати від параметрів і характеристик нелінійного елемента (рис. 3.2,б). Зв'язок положення точки  $P$  на лінії навантаження з характеристиками нелінійного елемента визначається залежністю параметрів  $HE$  від вхідного сигналу  $U_{вх}$ .

Основу розрахунку за постійним струмом являє вибір положення точки спокою (точка  $P$  рис. 3.2,б) на лінії навантаження та визначення номіналів резисторів, при яких

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/39

забезпечується визначений розподіл напруги в вихідному колі транзистора при струмі колектора  $I_{кР}$ . Величина останнього, зазвичай, визначається з нерівності:

$$I_{кР} \geq (1,2 \dots 1,5) I_{н \text{ макс}}, \quad (3.3)$$

де  $I_{н \text{ макс}}$  – максимальний струм навантаження.

На основі законів Кірхгофа та Ома розподіл напруги в вихідному колі транзистора визначається з виразу:

$$E_{ж} = U_{Rк} + U_{ке} \approx I_{кР} R_{к} + U_{ке}. \quad (3.4)$$

Останній вираз отриманий з припущенням рівності струмів колектора і емітера.

Сигнал, що пройде крізь перший розділовий конденсатор  $C_{р1}$ <sup>1</sup> почне міняти напругу бази та, відповідно, і її струм. Це призведе до зміни струму колектора

$$I_{к} = h_{21е} I_{б}, \quad (3.5)$$

де  $h_{21е}$  – коефіцієнт передачі струму бази.

Тобто почне змінюватись струм та розподіл напруги між елементами вихідного кола схем рис. 3.1. В вихідному ланцюгу з'явиться змінний сигнал, керований вхідним. Динамічне переміщення точки  $P$  під впливом сигналу буде спостерігатись тільки здовж лінії навантаження між точками її пересічення з координатними осями. Максимальні (амплітудні) значення зміни струму та напруги визначаються положенням точки спокою відносно точок пересічення осів. Щоб мати мінімальні викривлення вихідного сигналу *при його максимальних амплітудах*, точку спокою розташовують в середині відрізка лінії навантаження, тобто:

$$U_{кеР} = U_{Rк} = I_{кР} R_{к} = 0,5 E_{ж} \quad (3.6)$$

Якщо врахувати, що амплітуда вихідного сигналу за напругою не перевищує падіння напруги на транзисторі або колекторному резисторі, то можна визначити умову для величини напруги джерела живлення:

$$E_{ж} \geq 2 U_{\text{макс нав}} \quad (3.7)$$

де  $U_{\text{макс нав}}$  – максимальна амплітуда напруги сигналу в навантаженні.

Додаток в декілька вольтів обумовлений необхідністю зменшити нелінійні спотворення.

Вибрані значення падіння напруги на елементах вихідного кола підсилювача дозволяють визначити (згідно закону Ома) необхідну величину опору резистора  $R_{к}$ .

На даному етапі розрахунку вже можна сформулювати вимоги до припустимих параметрів транзистора за потужністю, напругою та струмом, на основі яких визначають його тип.

У стані спокою через транзистор протікає струм  $I_{кР}$  та існує напруга  $U_{кР}$ . Тому на ньому виділяється потужність

$$P_{кР} = I_{кР} U_{кР} \quad (3.8)$$

<sup>1</sup> Номінали розділових ємностей проводять на підставі того, що їх опір для змінного сигналу був незначним (методика буде надана далі).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/40

яка має бути розсіяна транзистором у навколишній простір. Отже, припустима постійна потужність транзистора  $P_{к\text{ макс}}$  (яка надається в довідниках) повинна задовольняти нерівності:

$$P_{к\text{ макс}} \geq K_{\text{зап } P} P_{кP}, \quad (3.9)$$

де  $K_{\text{зап } P}$  – коефіцієнт запасу за потужністю, використання якого забезпечує надійну роботу приладу в реальних умовах.

Зазвичай  $K_{\text{зап } P}$  вибирається з діапазону 1,2...1,5, хоча можуть бути й інші значення, обумовлені особливостями експлуатації та призначенням апаратури, для якої розробляють підсилювач.

Довідкове значення потужності  $P_{к\text{ макс}}$ , яку здатен розсіяти транзистор, необхідно визначити з урахуванням температури навколишнього середовища, в якому працюватиме підсилювач.

Вхідний сигнал може повністю закрити транзистор, тому припустима напруга колектор-емітер повинна задовольняти нерівності:

$$U_{к\text{е макс}} \geq K_{\text{зап } U} E_{ж}. \quad (3.10)$$

Коефіцієнт запасу за напругою  $K_{\text{зап } U}$  зазвичай беруть таким же, як і коефіцієнт запасу за потужністю.

Процес виходу транзистора з ладу при проходженні через нього значного струму інший, ніж при пробі в зв'язку з прикладанням значної зворотної напруги. Він інерційний і походить на процес руйнування транзистора від розігріву в результаті виділення електричної потужності. Тому припустимий колекторний струм зазвичай визначають, виходячи зі струму спокою:

$$I_{к\text{ макс}} = K_{\text{зап } I} I_{кP}, \quad (3.11)$$

однак коефіцієнт запасу за струмом  $K_{\text{зап } I}$  зазвичай беруть більшим, ніж для потужності та напруги. Найчастіше беруть  $K_{\text{зап } I} = 2$ .

Вибір типу транзистора дозволяє визначити і його параметри, в тому числі й коефіцієнт передачі струму бази, який згідно довідковим даним, зазвичай, має розкид від  $h_{21e\text{ мін}}$  до  $h_{21e\text{ макс}}$ . Використовуючи *середнє* значення  $h_{21e}$  встановлюють (на підставі виразу (3.5)) струм спокою бази  $I_{бP}$ . В програмі ELECTRONIC WORKBENCH/Multisim для типового біполярного транзистора, з застосуванням якого буде проводитись моделювання, використовується одне значення  $h_{21e}$ , яке прийнято рівним 100 і може бути використано при визначенні струму.

Опір резистора  $R_6$  в колі визначають на основі закону Ома:

$$R_6 = \frac{E_{\text{е}} - U_{\text{ааD}}}{I_{\text{аD}}}. \quad (3.12)$$

де  $U_{\text{бe } P}$  – постійна напруга емітерного переходу, при якій струм бази дорівнює  $I_{бP}$ . Визначається з вхідної характеристики транзистора. В програмі EWB для типового біполярного транзистора він змінюється в діапазоні (0,75...0,85) В в діапазоні робочих струмів бази. При попередніх розрахунках можна використовувати значення  $U_{\text{бe } P} = 0,85$  В.

Найважливішими технічними показниками підсилювача *за змінним струмом* є: коефіцієнти підсилення (напруги, струму і потужності), вхідний і вихідний опори,



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/41

діапазон підсилювальних частот, а також показники, що характеризують спотворення сигналу.

*Коефіцієнт підсилення* – відношення сталих значень параметрів вихідного і вхідного сигналів підсилювача. В залежності від параметру електричного сигналу, яким цікавляться, розрізняють коефіцієнти підсилення

- напруги  $K_u = U_2 / U_1$ ;
- струму  $K_i = I_2 / I_1$ ;
- потужності  $K_p = P_2 / P_1$ ,

де  $U_1, U_2, I_1, I_2$  – абсолютні значення діючої (або амплітудної) напруги чи струму сигналів на вході та виході;

$P_1, P_2$  – потужність вхідного та вихідного сигналів.

Значення вхідних та вихідних напруг і струмів *визначають за показниками амперметрів і вольтметрів* (діючі значення) або в результаті вимірів амплітуд на відповідних осцилограмах.

При розрахунку коефіцієнтів підсилення замість значень вхідних та вихідних величин можна використовувати їх прирости.

За умов діючих значень напруги та струму  $P_1 = U_1 I_1$  і  $P_2 = U_2 I_2$ , тому коефіцієнт підсилення потужності  $K_p = K_u K_i$ .

Визначення параметрів підсилювача за змінним струмом скористуємося його еквівалентною схемою для середніх частот, яка надана на рис. 3.3.

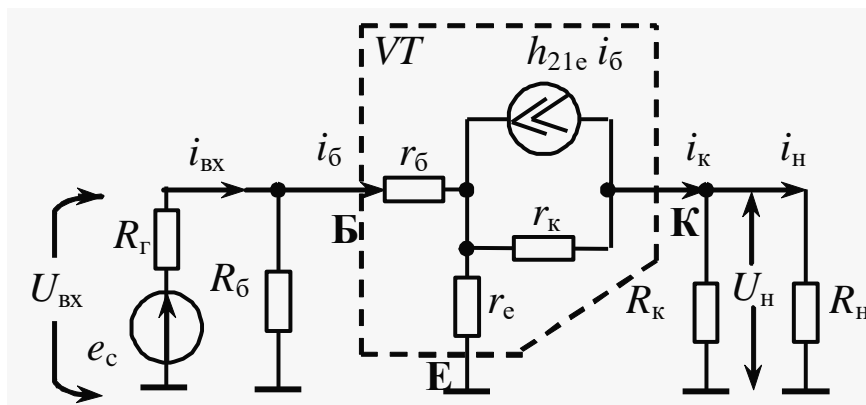


Рис.3.3. Еквівалентна схема підсилювача для середніх частот

З неї видно, що сигнал у вихідному колі обумовлений дією генератора струму, значення якого пропорційно коефіцієнту передачі струму  $h_{21e}$ . Тому коефіцієнт підсилення струму в основному визначається значенням  $h_{21e}$ . Враховуючи, що згідно з запропонованою методикою розрахунку опори  $R_H$  і  $R_K$  приблизно однакові та  $i_{BX} \approx i_6$ , коефіцієнт підсилення струму, у першому наближенні,

$$K_i = i_H / i_{BX} \approx 0,5 i_K / (i_6 + i_{R6}) \approx 0,5 h_{21e}, \quad (3.13)$$

де  $i_{R6}$  – змінний струм резистора  $R_6$ , обумовлений вхідним сигналом. Їм можна знехтувати, бо опір резистора значно більший в порівнянні з вхідним опором транзистора.

Проведемо деякі очевидні перетворення коефіцієнта підсилення напруги:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/42

$$K_u = U_n / U_{вх} = i_k R_{н экв} / (i_{вх} R_{вх під}) = h_{21e} R_{н экв} / R_{вх під}, \quad (3.14)$$

де  $R_{вх під}$  – вхідний опір підсилювача;

$R_{н экв}$  – еквівалентний опір паралельного з'єднання  $R_k$  та  $R_n$ :

$$R_{н экв} = (R_n R_k) / (R_n + R_k). \quad (3.15)$$

Вхідний опір каскаду визначається паралельним з'єднанням резисторів  $R_6$  та вхідного опору транзистора за змінним струмом  $R_{вх тр}$ :

$$1 / R_{вх під} = 1 / R_6 + 1 / R_{вх тр}, \quad (3.16)$$

Вхідний опір транзистора найчастіше є значно менший в порівнянні з опором  $R_6$  (для моделі транзистора програми це також притаманно). Тому їм визначається вхідний опір каскаду:

$$R_{вх під} \approx R_{вх тр} \quad (3.17)$$

В діапазоні струмів, які будуть характерні при дослідженнях вхідний опір типового транзистору за змінним струмом буде мінятися в діапазоні від декількох десятків до декількох сотень Ом. Усереднене значення вхідного опору підсилювача в його робочій точці можна визначити на основі закону Ома за показниками приборів, які налаштовані на виміри за змінним струмом та вставлені у відповідні ланцюги. При попередніх розрахунках можна вважати

$$R_{вх тр} = 100 \text{ Ом.}$$

В зв'язку з нелінійною залежністю значення вхідного опору транзистора від напруги емітерного переходу можна очікувати залежність  $K_u$  від величини вхідного сигналу та положення робочої точки. Це повинно призвести до зростання нелінійних спотворень сигналу при зростанні амплітуди сигналу. Особливо помітними такі викривлень будуть при виборі робочої точки з малими значеннями струму бази  $I_{бp}$ , при яких має місце значна нелінійність вхідної характеристики транзистора.

З огляду на великий диференціальний опір закритого колекторного переходу транзистора для вихідного опору підсилювача  $r_k$  маємо:

$$R_{вих під} = R_k.$$

Частотні спотворення на нижніх частотах визначаються ємностями розділових конденсаторів. З достатньою точністю можна вважати, що для схеми рис. 3.1 коефіцієнт частотних спотворень на низькій частоті дорівнює:

$$M_n = M_1 M_2,$$

де  $M_1, M_2$  – коефіцієнти частотних викривлень, які зумовлені ємностями  $C_{p1}$  і  $C_{p2}$ .

Найчастіше вважають  $M_1 = M_2$ , що при заданому коефіцієнті частотних спотворень  $M_n$  призводить до виразу:

$$M_1 = M_2 = \sqrt{M_n} \quad (3.18)$$

Нагадуємо, що коефіцієнт частотних спотворень  $M_f$  на будь-якій частоті  $f$ , визначається з виразу:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/43

$$M = \frac{K_{сер}}{K_f}, \quad (3.19)$$

де  $K_{сер}$  і  $K_f$  – коефіцієнти підсилення на середній частоті та частоті  $f$  відповідно.

Виходячи з того, що коефіцієнти частотних спотворень на нижній визначаються ланцюгами заряду/розряду ємності, маємо:

$$\begin{aligned} C_{p1} &\geq \left[ 2\pi f_n (R_r + R_{вх\ під}) \sqrt{M_1^2 - 1} \right]^{-1}, \\ C_{p2} &\geq \left[ 2\pi f_n (R_k + R_n) \sqrt{M_2^2 - 1} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (3.20)$$

де  $R_r$  – вихідний опір генератора, джерела сигналу.

Як було запропоновано раніше, при попередніх розрахунках можна прийняти значення вхідного опору підсилювача рівним 100 Ом.

Визначені номінали ємностей конденсаторів уточнюють в відповідності з рядом державного стандарту (додаток А).

Частотні спотворення на високій частоті визначаються частотними властивостями транзистора, зокрема, зменшенням коефіцієнту передачі струму при зростанні частоті. Однак в програмі EWB5 у *типового* біполярного транзистора коефіцієнт передачі  $h_{21e}$  не змінюється при зміні частоти. Тому коефіцієнти підсилення підсилювача з ростом частоти не міняються і на АЧХ, яка буде спостерігатися при дослідженнях, не буде мати спаду на високих частотах.

### 3.3. Вказівки до виконання завдання

1. Провести попередній розрахунок підсилювача з фіксованим струмом бази згідно з вхідними даними, які надані в табл. 3.1. Варіант вказує викладач.

Попередній розрахунок полягає в наступному:

- розрахувати мінімальне значення напруги живлення в припущенні максимальної напруги в навантаженні;
- використовуючи додаток Б, визначити номінальні значення напруги живлення;
- розрахувати значення опору резисторів та ємності конденсаторів схеми;
- використовуючи додаток А, визначити номінальні значення напруги живлення, опору резисторів та ємності конденсаторів схеми.

Додатково необхідно вважати, що:

- вихідний опір генератора сигналу  $R_r = 300$  Ом;
- коефіцієнти частотних спотворень на нижній частоті  $M_n \leq 1,21$ .

Приклад розрахунку схеми підсилювача наданий в наступному розділі.

2. Сформувати схему і провести дослідження, необхідні для звіту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/44

#### 4.4. Приклад розрахунку та моделювання підсилювача з фіксованим струмом бази

Таблиця 3.1

Показник	Варіант завдання						
	1	2	3	4	5	6	7
$U_H$ , В	3	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$R_H$ , Ом	150	200	240	250	300	330	300
$f_H$ , Гц	100	150	150	200	200	250	300
$K_{\text{Гар}}$	12	10	8	7	6	8	10
Показник	Варіант завдання						
	8	9	10	11	12	13	14
$U_H$ , В	3	4	4,5	5	5,5	6	6,5
$R_H$ , Ом	350	400	500	600	650	700	600
$f_H$ , Гц	300	300	250	250	100	200	150
$K_{\text{Гар}}$	12	10	8	7	6	8	10

Примітки до табл.3.1: Використані позначення:

- $f_H$  – нижня частота підсилювача, на якій коефіцієнт частотних спотворень на низькій частоті  $M_H \approx 1,21$ ;
- $U_H$  – діючі значення напруги навантаження;
- $R_H$  – опір навантаження.

3. Розрахуємо підсилювач з фіксованим струмом бази (рис. 2.1,а) згідно з наступними вхідними даними:

$$U_H = 3,2 \text{ В}; \quad R_H = 270 \text{ Ом}; \quad f_H = 300 \text{ Гц.}$$

4. Розрахунок значень номіналів елементів схеми підсилювача.

Максимальна напруга навантаження:

$$U_{H \text{ макс}} = \sqrt{2} U_H \approx 1,41 \cdot 3,2 = 4,51 \text{ В.}^2 \quad ^3$$

Значення напруги живлення:

<sup>2</sup> При виконанні обчислень спочатку пишуть формулу, потім проставляють чисельні значення символів, що входять до формули, а потім – результат зі зазначенням технічних одиниць виміру.

<sup>3</sup> Результати обчислень *округлюють*. Кількість значущих цифр повинна бути достатньою для наступних дій. Як правило в інженерних розрахунках, досить 2...3 значущих цифри.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/45

$$E_{ж} \geq 2 U_{н \max} = 2 \cdot 4,51 = 9,02 \text{ В}$$

Згідно з додатком Б вибираємо джерела живлення з номінальною напругою 10 В. Тобто в подальших розрахунках буде використовуватись значення

$$E_{ж} = 10 \text{ В.}$$

Максимальний струм навантаження:

$$I_{н \max} = U_{н \max} / R_{н} = 4,51 / 270 = 16,3 \text{ мА.}$$

З врахуванням значень коефіцієнтів виразу (4.3) обираємо значення струму спокою  $I_{кР} = 20 \text{ мА}$ .

Вважаючи що робоча точка буде знаходитись на середині лінії навантаження визначаємо опір колекторного резистора:

$$R_{к} = E_{ж} / (2 I_{кР}) = 10 / (2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 250 \text{ Ом.}$$

Згідно з додатком А, виходячи з ряду Е24, вибираємо номінальне значення опору колекторного резистора рівним 240 Ом.<sup>4</sup>

Струм спокою бази:

$$I_{бР} = I_{кР} / h_{21e} = 20 / 100 = 0,2 \text{ мА.}$$

Номінал резистора в колі бази:

$$R_{б} = \frac{E_{ж} - U_{бсР}}{I_{бР}} = \frac{10 - 0,8}{2 \cdot 10^{-4}} = 46 \text{ кОм} \Rightarrow 47 \text{ кОм.}$$

Номінали ємностей конденсаторів:

$$C_{р1} \geq \left[ 2\pi f_{н} (R_{г} + R_{вх \text{ тр}}) \sqrt{M_1^2 - 1} \right]^{-1} =$$

$$= \left[ 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot (300 + 100) \sqrt{1,21 - 1} \right]^{-1} = 3 \text{ мкФ} \Rightarrow 3,3 \text{ мкФ.}$$

$$C_{р2} \geq \left[ 2\pi f_{н} (R_{к} + R_{н}) \sqrt{M_2^2 - 1} \right]^{-1} =$$

$$\left[ 2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot (240 + 260) \sqrt{1,21 - 1} \right]^{-1} = 2,3 \text{ мкФ} \Rightarrow 3,3 \text{ мкФ.}$$

3. Схема, яка сформована на полі екрана середовища програми з введенням приборів, необхідних для проведення вимірів, має вид наданий на рис.3.4. Прибори налаштовані на виміри за постійним струмом.

<sup>4</sup> В подальшому, для скорочення обґрунтування визначення номіналу будьмо використовувати позначення  $\Rightarrow$ . Тоді визначення номіналу резистора  $R_{к}$  мало б такий вигляд:

$$R_{к} = E_{ж} / (2 I_{кР}) = 10 / (2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 250 \text{ Ом} \Rightarrow 240 \text{ Ом.}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/46

Згідно з показниками приладів є достатньо добре узгодження між отриманими показниками режиму і використаними при розрахунку:  $U_{Rk} = 4,65$  В практично співпадає з 5 В згідно розрахунку;  $I_k = 19,4$  мА і 20 мА. Практично співпадають напруга  $U_{be}$  і коефіцієнт передачі струму бази, які використовувались при попередньому розрахунку.

#### 4. Попередній розрахунок показників підсилювача за змінним струмом.

Коефіцієнти підсилення:

- струму  $K_i = 0,5 h_{21e} = 0,5 \cdot 100 = 50$ ;
- напруги  $K_u = h_{21e} R_{н екв} / R_{вх під} =$   

$$= 100 \cdot \left( \frac{240 \cdot 270}{240 + 270} \right) / 100 \approx 127$$

Вхідний опір  $R_{вх під} \approx R_{вх тр} = 100$  Ом.

Вихідний опір  $R_{вих під} = R_k = 240$  Ом.

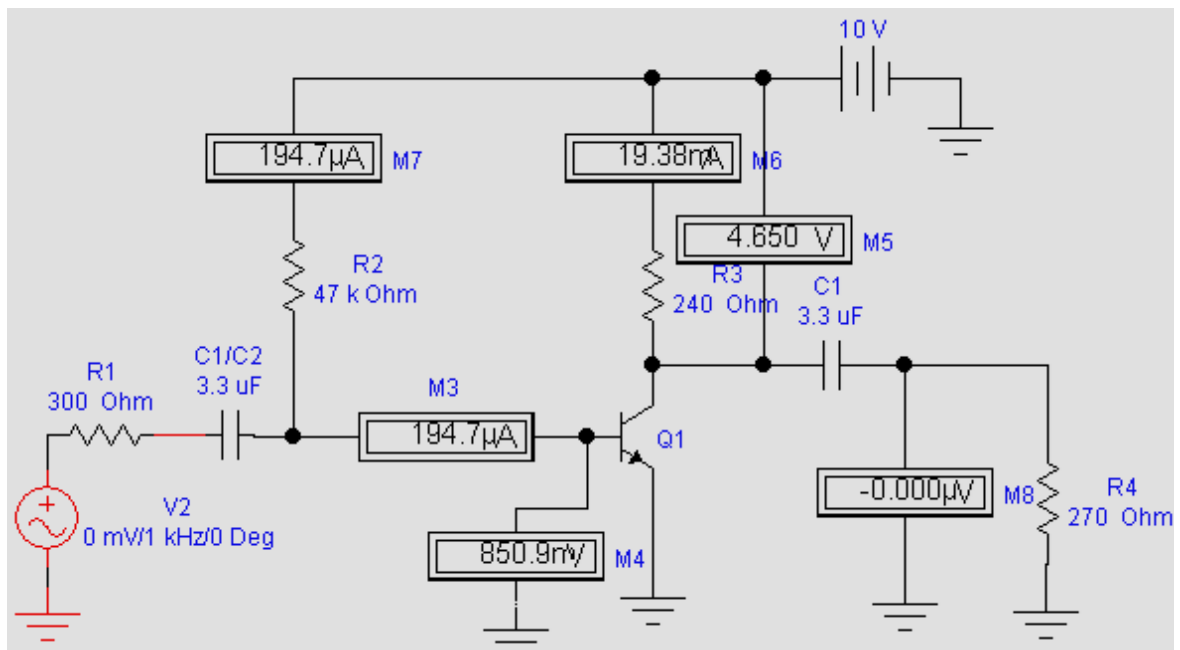


Рис. 3.4. Схема підсилювача, згідно з результатами розрахунку

та результати приборів вимірів за постійним струмом

5. На рис. 3.5 показана схема підсилювача з приборами налаштованими на вимір змінного струму при подачі на вхід сигналу незначної величини (10 мВ).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 47

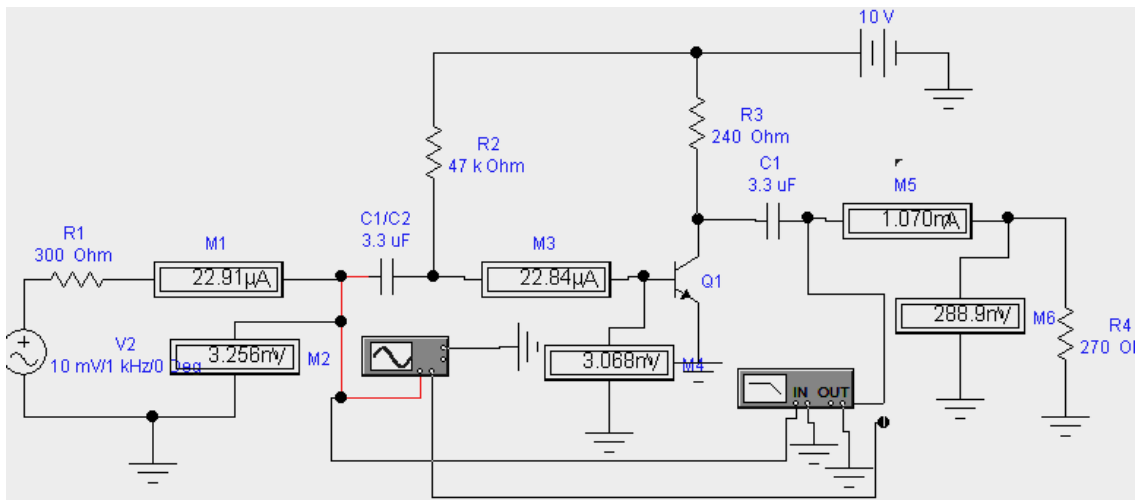


Рис. 2.5. Результати вимірів за змінним струмом

Згідно з показаннями приборів параметри підсилювача за змінним струмом дорівнюють:

- коефіцієнт підсилення струму  $K_i = I_{M5} / I_{M1} = 1,07 \cdot 10^{-3} / 22,91 \cdot 10^{-6} \approx 46,7$ ;
- коефіцієнт підсилення напруги  
 $K_u = U_{M6} / U_{M2} = 288,9 \cdot 10^{-3} / 3,256 \cdot 10^{-3} \approx 88,7$ ;
- вхідний опір  $R_{вх\ під} = U_{M2} / I_{M1} = 3,256 \cdot 10^{-3} / 22,91 \cdot 10^{-6} = 142 \text{ Ом}$ .

Отримані значення коефіцієнта підсилення струму (46,5) практично співпадають з розрахованими (50). Більші розбіжності у коефіцієнта підсилення напруги. Вони менші: 88,7 замість 127 за розрахунком. Це обумовлено більшим вхідним опором, меншим значенням коефіцієнта  $K_i$  та припущеннями, які були використані для отримання спрощених виразів для попереднього розрахунку. Менші розбіжності спостерігаються, якщо врахувати, що на частоті 1кГц, на якій проводяться виміри, значення коефіцієнта підсилення напруги не максимальні.

Згідно показникам АЧХ, яка отримана за допомогою **Bode Plotter** (АЧХометр) (рис. 3.6), максимальний коефіцієнт підсилення напруги дорівнює 95.

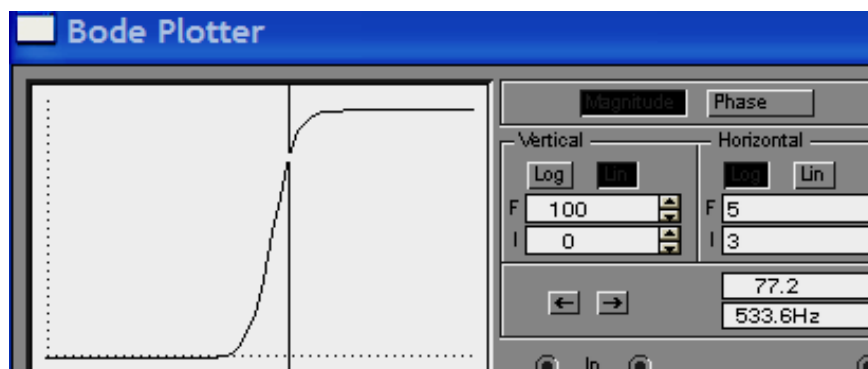


Рис. 3.6. Амплітудно частотна характеристика підсилювача

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/48

Нижча частота (визначена по зменшенню коефіцієнта підсилення за напругою в 1,21 рази), яка визначена з амплітудно-частотної характеристики (рис. 3.6) дорівнює приблизно 550 Гц, що приблизно у 1,8 перевищує розрахункову.

### 3.4. Обсяг необхідних досліджень

1. Сформувати схему з номіналами елементів згідно попереднього розрахунку. В якості транзистора використати типовий транзистор програми . ввести в схему вимірювальні прилади і на основі отриманих результатів провести порівняльний аналіз з даними розрахунку. Приклад такого порівняння надано в попередньому розділі.

Дослідження проводити на частоті 1 кГц, при незначній вхідній напрузі (5...10 мВ).

2. Визначити нелінійні спотворення вихідного сигналу. В якості показника величини спотворень використати коефіцієнт гармонік  $K_{\text{гар}}$ , якій можна отримати в результаті проведення Фур'є перетворення (**Analyst**→**Fourier**→**Simulate**→**Total harmonics...**).

Провести дослідження залежності нелінійні спотворення вихідного сигналу від величини вхідного сигналу. Визначити значення  $U_{\text{вх}}$  при яких  $K_{\text{гар}}$  дорівнює значень, вказаних в табл. 3.1.

3. Провести дослідження згідно п. 2 при різних величинах опору резистор в колі бази  $R_6$ . Величини опору резистора  $R_6$  встановлювати згідно наступних значень:

$$(0,6 \ 0,75; \ 1,25) R_{6 \text{ ном}},$$

де  $R_{6 \text{ ном}}$  – значення номінального опору резистора, яке було визначене при розрахунку елементів схеми.

Додатково при різних опорах резистора  $R_6$  в колі бази визначити максимальний коефіцієнт підсилення (за показниками плотера) та показники, які характеризують режим за постійним струмом ( $I_k$  та  $U_{\text{ке}}$  чи  $U_{Rk}$ ).

### 3.5. Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Роздруковка досліджуваних електричних схем, створених в середовищі EWB/Multisim, та опис їхньої роботи.
3. Результати вимірів (показники приборів, таблиці, графіки).
4. В додатку привести схему електричну принципову з переліком елементів відповідно до ДСТУ.
5. Висновки та коментарі.

### 3.6. Контрольні питання

1. Які класи підсилювачів Вам відомі?
2. Чому робочу точку у підсилювачів класу А намагаються розмістити посередині лінії навантаження?
3. Як зміняться характеристики підсилювача з фіксованим струмом, якщо змінити опір резистора в колі бази?
4. Як визначити коефіцієнт підсилення підсилювача за напругою, струмом, потужністю?
5. За яких умов обирають транзистор для підсилювача класу А?



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/49

## Лабораторна робота № 4

# РОЗРАХУНОК ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ОСНОВІ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

### 4.1. Мета роботи

Провести моделювання та дослідження в середовищі програми **ELECTRONIC WORKBENCH/Multisim** схем різних типів підсилювачів, які створені на основі використання операційного підсилювача.

### 4.2. Стислі теоретичні відомості

*Операційним* підсилювачем (ОП) називається підсилювач, що характеризується набором параметрів, які дозволяють йому виконувати щодо електричних сигналів математичні операції (додавання, віднімання, інтегрування, логарифмування тощо). Ця властивість й визначила найменування “операційний підсилювач”. Спочатку підсилювачі такого класу призначалися, головним чином, для виконання математичних операцій в аналогових обчислювальних машинах. На даний час вони є основними інтегральними елементами аналогової електроніки, що виготовляються як в вигляді окремих мікросхеми так і як вузли більш складних приладів.

Основними параметрами, що забезпечують “математичні здібності” ОП, є:

- великий коефіцієнт підсилення за напругою (в ідеалі  $K \Rightarrow \infty$ );
- великий вхідний опір (в ідеалі  $R_{вх} \Rightarrow \infty$ );
- нижня частота підсилювальних сигналів  $f_n = 0$ .

Останній параметр указує на те, що ОП повинен бути підсилювачем постійного струму (ППС). Ця вимога пояснюється тим, що однією з поширених математичних операцій є дія з константами, наприклад, їх додавання. У цьому випадку математична змінна реалізується сигналом, який змінюється, константа – постійним.

На даний час, коли сфера застосування ОП значно розширилася, у багатьох випадках вимога  $f_n = 0$  не є обов'язковою і навіть іноді недоцільною. Однак перетворити ППС в підсилювач змінного струму досить просто (наприклад, вводячи розділові ємності на вході та/чи виході). Тому більшість операційних підсилювачів в інтегральному виконанні випускаються як підсилювачі постійного струму.

Операційний підсилювач зазвичай має в своєму складі декілька каскадів. Вхідний каскад виконується за диференціальною схемою (ДП), що обумовлює наявність двох входів: інвертуючого і неінвертуючого (прямого). Вихідний каскад будується за схемою двотактного безтрансформаторного підсилювача потужності. Для збільшення коефіцієнтів підсилення, завдання робочих точок тощо в каскадах широко використовуються транзисторні джерела струму.

Операційний підсилювач підсилює різницю вхідних сигналів, які надходять на прямий і інвертуючий входи. Диференціальний коефіцієнт підсилення  $K_{диф}$ , як вже відзначалося вище, є досить великим. Типове його значення лежить у діапазоні 10000... 100000 (80...100 дБ), і в нових ОП має місце тенденція до збільшення. В програмі EWB5 в моделі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/50

ОП  $\mu 741$ , який буде використовуватись в лабораторній роботі,  $K_{\text{диф}} = 200\,000$  (позначення цього параметра, що використане в програмі EWB, – Open loop gain A)<sup>5</sup>.

Типова амплітудно-частотна характеристика ОП наведена на рис. 4.1. Характеристика сформована апроксимаційними прямими до реальної і надана в логарифмічних координатах. Реальна АЧХ має вид плавної кривої, яка зазвичай лежить нижче наведених на рисунку ліній. В точках зламу останніх реальна крива проходить на 3 дБ нижче.

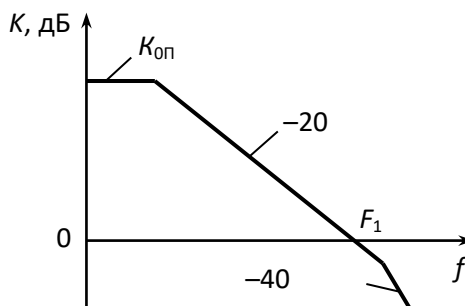


Рис. 4.1 . Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика ОП

Оскільки операційний підсилювач являє собою ППС, його АЧХ має ненульовий коефіцієнт підсилення на нульовій частоті. Зазначені вище високі коефіцієнти підсилення відповідають досить вузькому діапазону частот – від нуля до приблизно декількох десятків/сотень герц. Потім коефіцієнт підсилення починає зменшуватися з “швидкістю” мінус 20 дБ / дек. (– 6 дБ / октаву).

Швидкості спадання може підвищитись до 40 дБ / дек та навіть більше. Точки зламу відповідають верхнім частотам окремих каскадів підсилювача і встановлюються при проектуванні ОП. Точку другого зламу АЧХ зазвичай прагнуть розташувати на частотах більших так званої частоти одиничного підсилення  $F_1$  (Unity-gain bandwidth [FU]) – частоти, на якій модуль коефіцієнта підсилення дорівнює одиниці. Типове значення  $F_1$  дорівнює 1...10 МГц (для ОП  $\mu 741$   $FU \geq 2$  МГц).

Крім диференціального входного сигналу, при реальних застосуваннях на входи ОП потрапляє і синфазний (однаковий за величиною та фазою) сигнал, який через недосконалість реальних схем, також проходить на вихід. Характеристикою можливого проникнення є коефіцієнт ослаблення синфазної складової (КОСС) (Common mode rejection ratio [CMMR]), який показує у скільки разів коефіцієнт підсилення синфазного сигналу менший коефіцієнта підсилення диференціального сигналу:

$$\text{КОСС} = \frac{K_{\text{син}}}{K_{\text{диф}}} \quad (4.1)$$

Типові значення КОСС – 60...80 дБ, деякі ОП мають КОСС – не менше 120 дБ, (у ОП  $\mu 741$  КОСС дорівнює 90 дБ, тобто приблизно 31622).

Операційний підсилювач є підсилювачем постійного струму, тому для нього характерні недоліки, притаманні всім ППС. Зокрема йому властиві параметри, що відображають

<sup>5</sup> В подальшому позначення, які використовуються в програмі EWB, будуть надаватись в дужках без додаткових пояснень.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/51

можливість отримати значну вихідну напругу навіть при нульовому диференціальному вхідному сигналі. Ці властивості визначаються наступними параметрами:

- приведеною до входу напругою зміщення  $U_{ЗМ}$  (*Input offset voltage [VOS]*, яка для ОП  $\mu 741$  не перебільшує 1 мВ);
- вхідними струмами  $I_{ЗМ}$  (*Input bias current [IBC]*, які для ОП  $\mu 741$  не перебільшує 80 нА);
- різницею вхідних струмів  $\Delta I_{ЗМ}$  (*Input offset current [IOC]*, яка для ОП  $\mu 741$  не перебільшує 20 нА);
- зміною (дрейфом) вказаних вище параметрів під впливом різноманітних дестабілізуючих факторів (в програмі EWB5 ці параметри відсутні, в довідниках найчастіше наводять значення дрейфу параметрів при зміні температури).

Розкид значень перерахованих параметрів визначається, насамперед, типом використаних в ОП транзисторів. Типові значення вхідної напруги зміщення для ОП загального призначення – 1...10 мВ при побудові на біполярних транзисторах й більше 10 мВ – на польових. Погіршення цього показника обумовлене складністю забезпечити ідентичність параметрів польових транзисторів. Для прецизійних ОП, в яких використовуються спеціальні технологічні міри для балансування вхідних каскадів (наприклад, лазерне припасування резисторів диференціального каскаду) або спеціальні схемотехнічні засоби (наприклад, динамічна компенсація вхідних похибок), ця величина може бути на порядок меншою. Типові величини дрейфу нуля при зміні температури – 1...10 мкВ/ $^{\circ}$ С, а для прецизійних ОП – в десятки разів менші.

Вхідні струми ОП – це струми баз або заслонів транзисторів вхідного каскаду, які можуть бути різними. Типова величина вхідного струму складає величину порядку 0,1...1 нА для ОП з вхідним каскадом на біполярних транзисторах та 1 пА – на польових.

Амплітудна характеристика ОП при симетричному живленні надана на рис. 4.2.

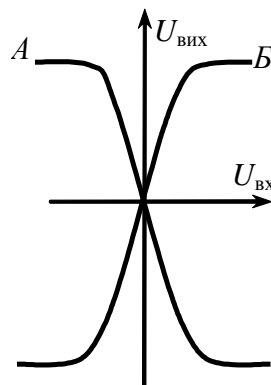


Рис. 4.2. Амплітудна характеристика ОП

Крива *A* відповідає подачі сигналу інвертуючий вхід, при заземленому прямому, *B* – на неінвертуючий. Напруги насичення зазвичай на 1...2 В менш, ніж напруга відповідного джерела живлення. Реальні криві найчастіше несиметричні.

Вхідний опір ОП розносному (диференціальному) сигналу визначається насамперед типами транзисторів, які використані у вхідному каскаді (*Input resistance, RI*). При побудові

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/52

ОП на біполярних транзисторах зазвичай лежить у діапазоні  $1 \dots 10$  МОм (у ОП  $\mu 741$   $R_{\text{вх}} = 2$  МОм).. Для ОП з польовими транзисторами на вході диференціальний опір складає сотні – тисячі мегом.

Вихідний опір ОП являє собою внутрішній опір ОП без зворотного зв'язку (*Output resistance [RO]*), який для ОП  $\mu 741$  не перебільшує  $75$  Ом). Типове значення вихідного опору –  $10 \dots 1000$  Ом, а максимального вихідного струму –  $10 \dots 20$  мА.

Використання ОП без від'ємних зворотних зв'язків (ЗЗ) в лінійних перетворювачах сигналу практично не можливо. Розгляньмо схему рис. 4.3, на якій схематично показаний, ОП, що охоплений колом від'ємного ЗЗ.

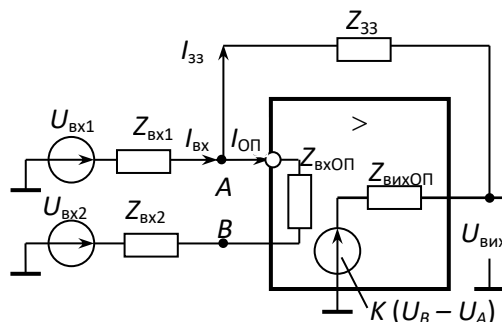


Рис. 4.3. Структурна схема ОП, охопленого від'ємним ЗЗ

Елемент  $Z_{33}$  забезпечує повернення частини енергії сигналу з виходу ОП на його інвертуючий вхід. Тому  $Z_{33}$  формує від'ємний зворотний зв'язок, який відносно кіл вхідного сигналу  $U_{\text{вх1}}$  виявляється підключеним паралельно. Оскільки вхідним сигналом кола ЗЗ є вихідна напруга (напруга навантаження), то зазначений зворотний зв'язок є зворотним зв'язком за напругою. Через це вихідний опір утвореного підсилювача буде значно менший, ніж вихідний опір використаного операційного підсилювача:

$$Z_{\text{вих ЗЗ}} = Z_{\text{вих ОП}} / (1 + \gamma K), \quad (4.2)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт передачі кола ЗЗ;

$K$  – коефіцієнт підсилення ОП.

Таким чином, порівняно мале значення вихідного опору ОП ще більше зменшується.

Одержимо кілька виразів, що будуть використані надалі.

Оскільки вихідна напруга знаходиться у фазі з сигналом, що подається на прямий вхід і протифазі з сигналом на інвертуючому вході, його вихідна напруга визначається виразом:

$$U_{\text{вих}} = K (U_B - U_A). \quad (4.3)$$

де  $U_A$ ,  $U_B$  – напруги в точках  $A$  та  $B$  (на інвертуючому і прямому входах ОП).

Звідки

$$U_B - U_A = \frac{U_{\text{вих}}}{K}.$$

З огляду на те, що  $K$  значне (в ідеальному ОП  $K \rightarrow \infty$ ), а величина вихідної напруги обмежена (принаймні, значеннями напруги джерела живлення), одержуємо:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/53

$$U_B - U_A \approx 0, \text{ тобто } U_B \approx U_A. \quad (4.4)$$

Для вузла в точці  $A$  можна записати:

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{ОП}} + I_{\text{зз}}.$$

Якщо  $R_{\text{вх}} \gg R_{\text{зз}}$  (в ідеальному ОП  $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ ), то

$$I_{\text{вх}} \approx I_{\text{зз}}. \quad (4.5)$$

Надалі крім цих виразів, отриманих на основі показників ідеальності ОП, при аналізі окремих схем будемо нехтувати напругою зміщення (зсуву) нуля ( $U_{\text{зм}}$ ), вхідними струмами ( $I_{\text{вх}}$ ,  $\Delta I_{\text{вх}}$ ) та їхніми дрейфами.

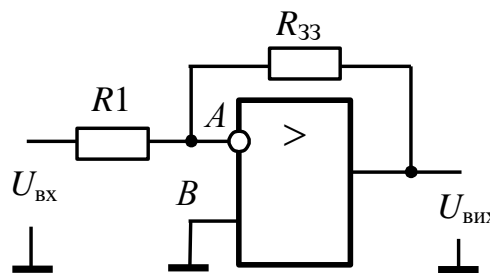


Рис. 4.4. Інвертуючий підсилювач

На рис. 4.4 наведена схема *інвертуючого* підсилювача. Прямий вхід заземлений, тобто знаходиться під нульовою напругою (напруга  $U_B$  рис. 4.3 дорівнює нулю). Операційний підсилювач охоплений паралельним від'ємним зворотним зв'язком за напругою через резистор  $R_{\text{зз}}$ .

Знайдемо вираз для коефіцієнта підсилення утвореного підсилювача. Відповідно до виразу (4.4)

$$U_A = U_B = 0 \quad (4.6)$$

Отже, потенціал точки  $A$  в першому наближенні, дорівнює потенціалу загальної шини – “землі”. Тому ця точка одержала назву “*віртуальної землі*”.

Використовуючи отримане значення  $U_A$ , знаходимо для струмів, що входять в (4.4):

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_A}{R1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R1}; \quad (4.7)$$

$$I_{\text{зз}} = \frac{U_A - U_{\text{вих}}}{R_{\text{зз}}} = -\frac{U_{\text{вих}}}{R_{\text{зз}}}. \quad (4.8)$$

Прирівнюючи праві частини (4.7) та (4.8) і враховуючи, що  $K = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}}$ , одержуємо для коефіцієнта підсилення інвертуючого підсилювача:

$$K_{\text{інпід}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{R_{\text{зз}}}{R1}, \quad (4.9)$$

де знак мінус вказує на зміну фази вихідного сигналу на  $180^\circ$  в порівнянні з фазою вхідного (вихідна напруга знаходиться в протифазі з вхідною напругою, тобто інверсна їй). У зв'язку з цим, якщо вхідний сигнал зростає, то *підсилений* вихідний – спадає, і навпаки, зі спадом вхідного сигналу збігається зростаючий вихідний. Подібне явище вже зустрічалося при розгляді підсилювачів зі СЕ (лаб. № 3).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/54

Паралельний від'ємний зворотний зв'язок за напругою зменшує вихідний та вхідний опори інвертуючого підсилювача (див. вираз (4.2)) в порівнянні з такими ж параметрами у ОП. Величину останнього, у першому наближенні, можна визначити, використовуючи поняття “віртуальна земля”. Оскільки напруга в точці  $A$  дорівнює нулю, то для джерела вхідного сигналу “здається”, що між його виходами включений резистор  $R1$ , тобто

$$R_{\text{вх ін під}} = R1. \quad (4.10)$$

Введення ВЗЗ розширює смугу пропускання підсилювача. На рис. 4.5 надана логарифмічна амплітудно-частотна характеристика ОП (штрихові лінії). Амплітудно-частотна характеристика інвертуючого підсилювача утворена лінією, яка паралельна осі  $f$  з ординатою  $K_{\text{ін під}}$ , і частиною спадаючої ділянки АЧХ ОП (на рисунку зображені неперервними лініями).

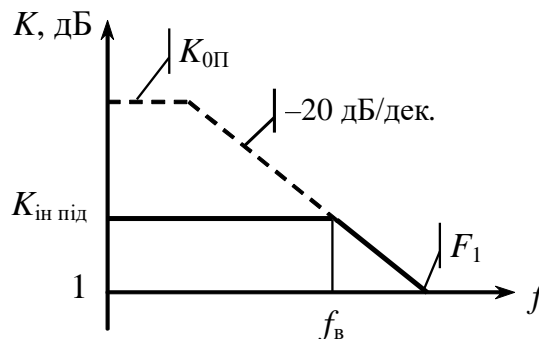


Рис. 4.5. Логарифмічна амплітудно-частотна характеристики ОП і інвертуючого підсилювача

Великі значення коефіцієнту підсилення ОП без зворотного зв'язку (з розірваним ЗЗ) відповідають досить вузькому діапазону частот – від нуля до приблизно декількох десятків/сотень герц. Рівномірний коефіцієнт підсилення підсилювача з від'ємним зворотнім зв'язком простирається до верхньої частоти, яка дорівнює

$$f_{\text{а}} = F_1 / K_{\text{зі зв'яз}}. \quad (4.11)$$

Схема підсилювача, що не інвертує вхідний сигнал (неінвертуючий підсилювач), наведена на рис. 4.6.

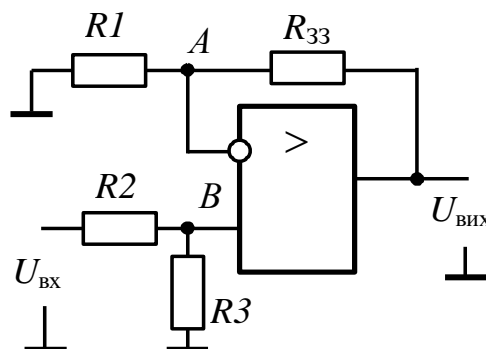


Рис. 4.6. Неінвертуючий підсилювач

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/55

Вхідний сигнал надходить на прямій вхід ОП через дільник  $R2$ ,  $R3$ . Напряга на прямому вході

$$U_B = U_{\text{вх}} \frac{R3}{R2 + R3} = K_{\text{діл}} \cdot U_{\text{вх}},$$

де  $K_{\text{діл}}$  – коефіцієнт ділення дільника  $R2$ ,  $R3$ .

На інвертуючий вхід ОП подається напруга з дільника, сформованого на резисторах  $R1$  і  $R3$ . Один його вхід через резистор  $R1$  заземлений, а другий – через  $R3$  приєднаний до виходу ОП. Тому напруга сигналу, яка виникає на інвертуючому вході (точка  $A$  рис 4.6), є часткою вихідної:

$$U_A = U_{\text{вих}} \frac{R1}{R1 + R3}.$$

Дорівнюючи (на підставі (4.4)) напруги в точках  $A$  та  $B$ , одержуємо:

$$K_{\text{ні під}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = K_{\text{діл}} \left( 1 + \frac{R3}{R1} \right). \quad (4.12)$$

В неінвертуючих підсилювачах вихідна напруга збігається за фазою з вхідною, тому коефіцієнт позитивний. З (4.12) випливає, що коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача може бути менше одиниці тільки при використанні дільника з  $K_{\text{діл}} < 1$ . При відсутності вхідного дільника ( $R2 = 0$ ) коефіцієнт підсилення завжди більше одиниці.

Вхідний опір ОП завдяки послідовному від'ємному зворотному зв'язку збільшується навіть у порівнянні з вхідним диференціальним опором ОП. Його значення визначається опором синфазному сигналу. При наявності ж вхідного дільника

$$R_{\text{вх ні під}} = R2 + R3. \quad (4.13)$$

Вихідний опір неінвертуючого підсилювача через негативний зворотний зв'язок за напругою можна вважати близьким до нуля аналогічно інвертуючому підсилювачу (див. (4.2)).

Амплітудно-частотна характеристика неінвертуючого підсилювача подібна АЧХ інвертуючого підсилювача (див. рис. 4.5) тільки горизонтальна пряма проводиться при значенні  $K_{\text{ні під}}$  на вісі ординат.

Віртуальна земля дозволяє утворити декілька практично незалежних інвертуючих входів, з незалежним коефіцієнтом підсилення кожного з сигналів, які подаються на них.

Вихідний сигнал такого пристрою буде дорівнювати:

$$U_{\text{вих}} = - \sum_{i=1}^N U_i \frac{R_{33}}{R_i}, \quad (4.14)$$

де  $U_i$  – вхідний сигнал, що поступає на  $i$ -тий вхід;

$R_i$  – опір резистора у колі  $i$ -того входу.

Тобто можна сформувати суматор декількох сигналів, кожний з яких буде мати свій незалежний ваговий коефіцієнт. На рис. 4.7 наданий суматор на два входи, однак можна використати і більшу кількість, підключаючи їх через резистори до точки віртуальної землі  $A$ .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/56

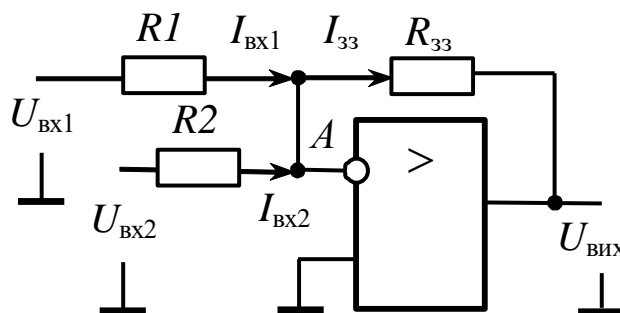


Рис. 4.7. Суматор на ОП

Якщо подати два сигнали – один на інвертуючий другий на прямий, – то буде отримано різницевий, віднімаючий підсилювач (рис. 4.8), вихідний сигнал якого визначається виразом:

$$U_{\text{вих}} = U_2 \cdot K_{\text{диф}} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R1}\right) - U_1 \cdot \frac{R_{33}}{R1} \quad (4.15)$$

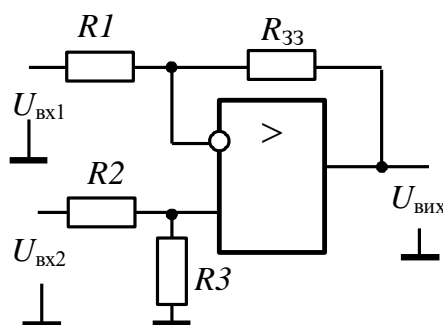


Рис. 4.8. Віднімаючий (диференціальний) підсилювач на ОП

Якщо виконується співвідношення  $R3 \cdot R1 = R_{33} \cdot R2$ , яке рівнозначно

$$\frac{R3}{R2} = \frac{R_{33}}{R1} = K, \quad (4.16)$$

то (4.15) перетвориться в

$$U_{\text{вих}} = K \cdot (U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}), \quad (4.17)$$

що відповідає поняттю диференціального підсилювача, у той час як вираз (5.15) описує різницевий (віднімаючий) підсилювач з власними ваговими коефіцієнтами для кожного сигналу.

З виразу (4.17) слідує, якщо на входи буде надходити напруги, які будуть мати дві складові: одну різницеву  $U_{\text{диф}}$  (диференціальну) та однакову  $U_{\text{син}}$  (синфазну), то вихідний сигнал буде змінюватись відповідно тільки диференціальній складовій. Наприклад, нехай

$$U_1 = -0,5 U_{\text{диф}} + U_{\text{син}}; \quad U_2 = +0,5 U_{\text{диф}} + U_{\text{син}}.$$

Підставляючи їх у (4.17), маємо:

$$U_{\text{вих}} = K [(+0,5 U_{\text{диф}} + U_{\text{син}}) - (-0,5 U_{\text{диф}} + U_{\text{син}})] = K U_{\text{диф}}.$$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/57

Якщо полярність диференціального сигналу протилежна відносно вищезастосованої (плюс – на прямій, мінус – на інверсній), то це тільки змінить фазу (тобто знак) вихідного сигналу. Зміна ж полярності синфазного сигналу не вплине на кінцевий результат – у вихідному не буде спостерігатись складові, обумовлені цим синфазним сигналом. Чим точніше буде виконуватись співвідношення (4.16), тим з більшої точністю вихідний сигнал можна вважати обумовленим тільки диференціальною складовою.

В реальних схемах диференційних підсилювачів практично неможливо позбутись проникнення синфазної складової у вихідний сигнал. В основному це пов'язано з неоднаковістю коефіцієнтів підсилення сигналів, які приходять на прямий та інвертуючий входи ОП. Ця неоднаковість обумовлена

- різними шляхами проходження по ланцюгам ОП сигналів, поданих на прямий та інверсній входи;
- розкидом опорів реальних резисторів, що призводить до порушення співвідношення (4.16).

#### 4.3. Вказівки до виконання завдання<sup>6</sup>

1. При формуванні схем використовувати ОП  $\mu 741$  (набір інструментів ANA  $\Rightarrow$  друге зображення). Його типові довідкові параметри були наведені в попередньому розділі та можуть бути додатково уточнені (подвійне клацання на зображенні ОП  $\Rightarrow$  Edit). Значення реальних параметрів використаного ОП, які необхідні для визначення похибок сформованих схем, можна визначити на основі схеми неінвертуючого повторювача (рис. 4.9).

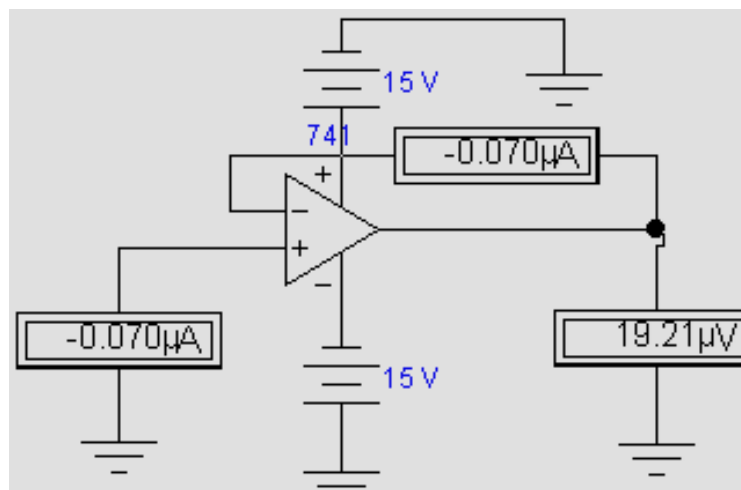


Рис. 4.9. Схема дослідження параметрів ОП  $\mu 741$

*Коментар.* Показники амперметрів надають значення вхідних струмів ( $7 \cdot 10^{-8}$  А), вольтметра – напруги зміщення нуля (приблизно  $19 \cdot 10^{-6}$  В). Це відповідає типовим значенням за струмом ( $\leq 80 \cdot 10^{-9}$  А) і значно краще за напругою зміщення ( $\leq 1 \cdot 10^{-3}$  В). Треба пам'ятати, що отримане значення напруги зміщення буде завжди прикладене до входу ОП, що призведе до появи деякої напруги на виході навіть при нульовому значенні вхідного сигналу.

<sup>6</sup> Об'єм виконаних досліджень уточнює викладач

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/58

Полярність вихідної напруги вказує на те, що вихідний сигнал буде мати постійне позитивне зміщення.

2. Сформувати схему інвертуючого підсилювача (рис. 4.4) згідно даним перших двох показників табл. 4.1. Варіант вказує викладач.

Таблиця 4.1

Показник	Варіант завдання						
	1	2	3	4	5	6	7
$R_{вх}$ , кОм	20	12	7,5	10	11	18	15
$K$	10	20	20	30	20	20	20
$K_{дод}$	20	24	10	10	10	30	30
Розкид опору, %	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 0,5$	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 0,5$	$\pm 2$
Показник	Варіант завдання						
	8	9	10	11	12	13	14
$R_{вх}$ , кОм	10	15	7,5	10	25	20	15
$K$	20	30	10	30	20	20	10
$K_{дод}$	15	20	20	20	20	25	20
Розкид опору, %	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 1$

Зафіксувати значення постійного струму в усіх ланцюгах та колах підсилювача. Визначити величину постійної напруги на виході – напруги зміщення вихідного сигналу. Порівняти отримані значення зі значеннями, отриманими за п. 1. Пояснити (в звіті) розходження. До виходу приєднати навантаження опором рівним  $R_{вх}$ .

Подати на вхід змінний сигнал, визначити значення постійного та змінного струму в усіх ланцюгах та колах підсилювача. Розрахувати коефіцієнти підсилення за напругою.

Дослідження за змінним струмом проводити на частоті 1 кГц при амплітуді вхідного сигналу не більш 50 мкВ. При дослідженнях використовувати не тільки показники амперметрів і вольтметрів, а також і осцилографа.

Визначити верхню частоту пропускання підсилювача за рівнем спаду АЧХ на 3 дБ. Визначити на цій частоті зсув фази вихідного сигналу відносно вхідного, використовуючи як **Bode plotter** так і осцилограф.

2.3. Сформувати схему неінвертуючого підсилювача (рис. 4.6), використовуючи значення опорів резисторів згідно п. 2.2 при формуванні ланцюга зворотного зв'язку та прийнявши  $R2 = R1$  і  $R3 = R_{зз}$ .

Провести дослідження згідно п. 2.2.

2.4. Сформувати схему диференціального підсилювача (рис. 4.8), використовуючи значення опорів резисторів згідно п. 2.3. Використавши два генератори вхідного синусоїдного сигналу з однаковою частотою але різними амплітудами виміряти амплітуду сигналу на виході і визначити яким вхідним сигналом вона обумовлена (рис. 4.11).

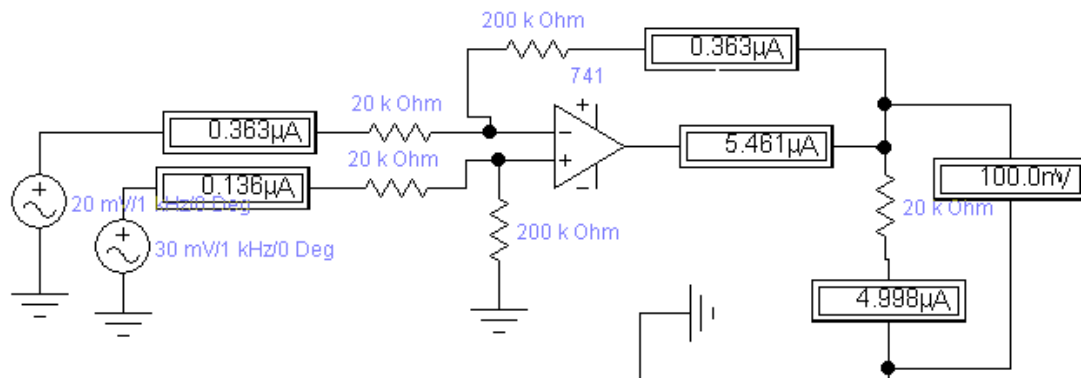


Рис. 4.11. Схема дослідження диференційного підсилювача

2.5. З'єднавши входи диференціального підсилювача і подавши на них нульову напругу визначити постійну напругу зсуву на виході.

Приєднавши до з'єднаних входів генератор змінного сигналу (рис. 4.12), визначити коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу як у разях, так і у децибелах. Порівняти отримані значення з довідковими на використаний ОП. Пояснити (в звіті) розходження.

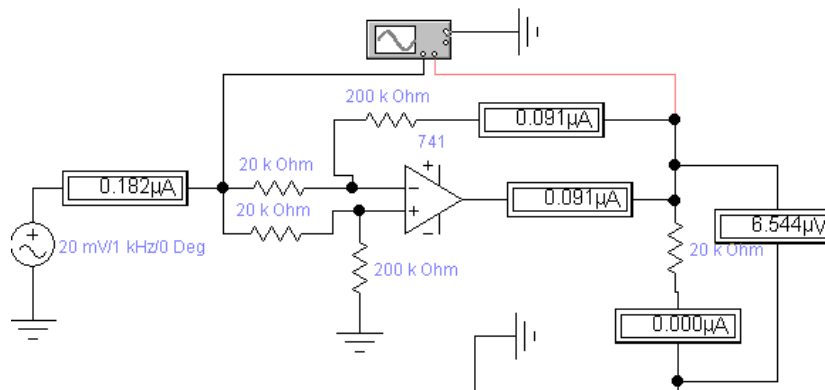


Рис. 4.12. Схема дослідження для визначення КОСС

2.6. Послідовно змінюючи значення опорів резисторів у прямому та інвертуючому входах, визначити вплив цих змін на КОСС. Значення опорів змінювати на величину вказану в четвертій строчці табл. 4.1.

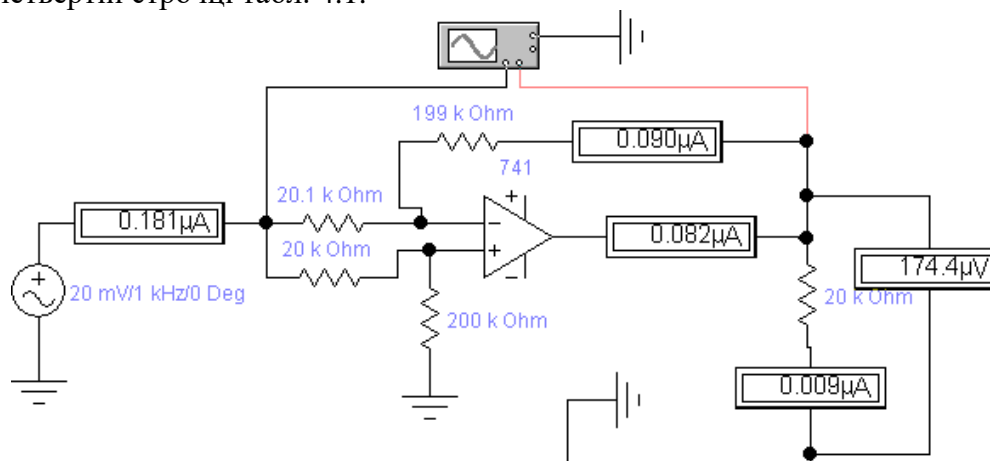


Рис. 4.13. Схема дослідження впливу розкиду опорів резисторів на КОСС

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/60

2.7. Сформувати схему суматора (рис. 4.7), використовуючи значення опору резисторів одного з входів згідно п. 2.2, а вхідний резистор другого входу повинен забезпечити отримання значення коефіцієнту підсилення, що вказаний в третій строчці показників табл. 4.1.

Перевірити значення коефіцієнтів підсилення кожного входу, подавши на один з входів пілкоподібний сигнал, а на другий – синусоїдний. Частота пілкоподібного сигналу повинна у 5 – 10 разів бути меншою за частоту синусоїди. Зафіксувати форму вихідного сигналу.

#### 4.4. Зміст звіту

1. Найменування та мета роботи.
2. Роздруковка досліджуваних електричних схем, створених в середовищі EWB/Multisim, та опис їхньої роботи.
3. Результати вимірів (таблиці, графіки).
4. В додатку привести схему електричну принципову з переліком елементів відповідно до ДСТУ.
5. Висновки та коментарі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 61

## Лабораторна робота № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

### 5.1 Мета роботи:

Вивчення принципу дії та дослідження пристроїв на операційних підсилювачах.

### 5.2. Загальні теоретичні відомості

*Операційний підсилювач* – це підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, який охоплений колом ВЗЗ, що визначає основні якісні показники і характер операцій, які виконує підсилювач.

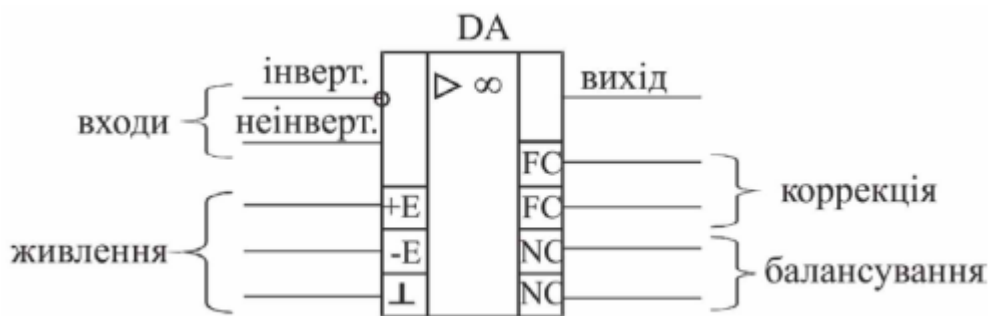


Рис. 5.1 – Умовне позначення операційного підсилювача

Один з входів підсилювача називається інвертуючим, а другий- неінвертуючим. При подачі сигналу на неінвертуючий вхід прирощення вихідного сигналу співпадає за знаком (фазою) з прирощенням вхідного сигналу. Якщо ж сигнал поданий на інвертуючий вхід, то прирощення вихідного сигналу має зворотний знак (протилежний за фазою) в порівнянні з прирощенням вхідного сигналу. Інвертуючий вхід часто використовують для введення в ОП зовнішніх ВЗЗ.

Сучасний операційний підсилювач виконується на базі інтегральної мікросхеми операційного підсилювача ІМС ОП, до виводів якої, окрім кола ВЗЗ, приєднуються джерела живлення, джерела вхідних сигналів, опір навантаження, кола корекції частотних характеристик ОП і інші кола.

Операційні підсилювачі застосовуються в підсилювальній техніці, пристроях генерації сигналів синусоїдальної і імпульсної форми, в стабілізаторах напруги, активних фільтрах і т.п.

Основні параметри ОП:

- коефіцієнт підсилення напруги  $K_{U\text{ ОП}} = \frac{\Delta U_{\text{ВИХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$ ;
- вхідна напруга зміщення нуля – значення напруги на вході ОП, при якому  $U_{\text{ВИХ}} = 0$ ;
- вхідний опір  $R_{\text{ВХ}}$ ;
- вихідний опір  $R_{\text{ВИХ}}$ ;
- максимальна вихідна напруга  $U_{\text{ВИХ max}}$ ;
- максимальний вихідний струм  $I_{\text{ВИХ max}}$ ;
- максимальний споживаний струм  $I_{\text{СПОЖ max}}$ ;

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 62

- напруга живлення  $U_{\text{жив}}$  ( $U_{\text{жив}} = \pm 3 \dots \pm 15 \text{В}$ );
- споживана потужність  $P_{\text{спож}}$ .

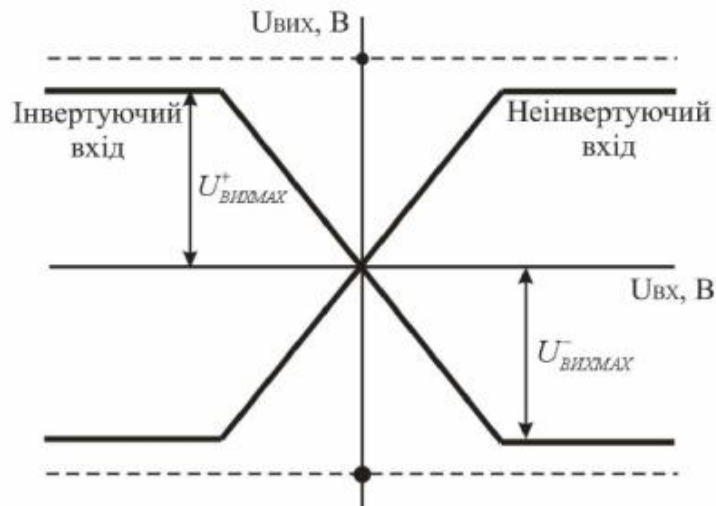


Рис. 5.2 – Амплітудна характеристика  $U_{\text{ВИХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  операційного підсилювача

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП наведена на рисунку 5.3.

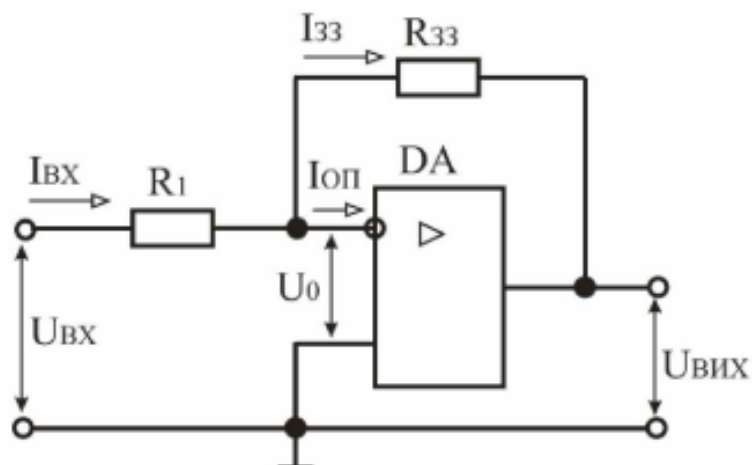


Рис. 5.3 – Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП

У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід ОП, а його неінвертуючий вхід зв'язується із спільною точкою входу і виходу схеми (заземлюється). Підсилювач називається інвертуючим, оскільки вихідна напруга інвертована (знаходиться в протифазі) по відношенню до вхідної напруги  $U_{\text{ВХ}}$ . Від'ємний зворотний зв'язок (паралельний за напругою) створюється за допомогою резистора  $R_{\text{ЗЗ}}$ .

Коефіцієнт підсилення за напругою інвертуючого підсилювача з паралельним зворотним зв'язком визначається параметрами тільки пасивної частини схеми:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 63

$$K_U = \frac{U_{ВИХ}}{U_{ВХ}} = -\frac{R_{33}}{R_1} = -\frac{1}{\beta}$$

де  $\beta = \frac{R_1}{R_{33}}$  – коефіцієнт передачі кола ЗЗ.

Неінвертуючий підсилювач (рисунок 4) містить послідовний ВЗЗ за напругою (резистор  $R_{33}$ ), який поданий за інвертуючим входом; вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід ОП.

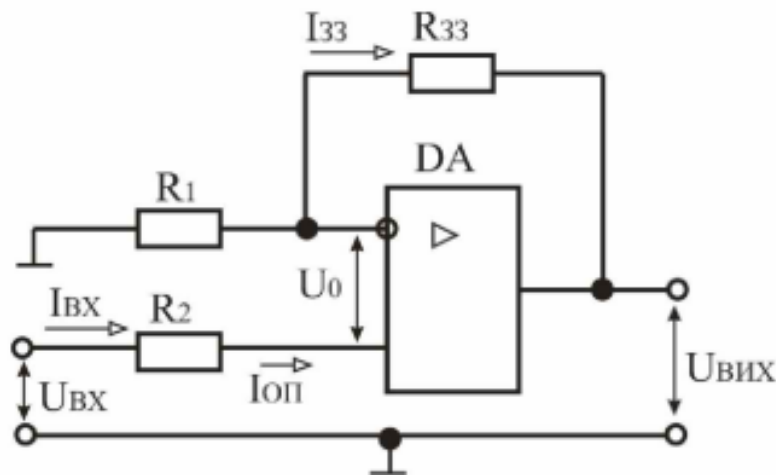


Рис. 5.4 – Схема неінвертуючого підсилювача на основі ОП

Коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача:

$$K_U = \frac{U_{ВИХ}}{U_{ВХ}} = 1 + \frac{R_{33}}{R_1}$$

### 5.3. Завдання для виконання

1.Привести визначення та умовне графічне позначення операційного підсилювача (ОП).

2.Привести схему інвертуючого підсилювача на ОП. Визначити величину опору резистора  $R_{ВХ}$  на інвертуючому вході ОП при заданих значеннях коефіцієнта підсилення  $K_U$  і опору резистора в колі зворотного зв'язку  $R_{33}$ . Побудувати графік залежності  $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ .

Варіанти завдань наведені в таблиці 5.1. Максимальну вихідну напругу ОП прийняти  $U_{ВИХ \max} = \pm 11В$ .

3.Привести схему неінвертуючого підсилювача на ОП. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача при величині опорів резисторів  $R_{ВХ}$  і  $R_{33}$  з п. 2. Побудувати графік залежності  $U_{ВИХ \max}$ .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 64

#### 5.4. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму. Набрати схему для дослідження операційного підсилювача (рисунок 5.5).
2. Установити наведені на рис. 5 параметри елементів схеми і віртуального генератора.

Таблиця 5.1– Завдання для розрахунку операційного підсилювача

№ вар.	$K_U$	$R_{33}, \text{кОм}$	№ вар.	$K_U$	$R_{33}, \text{кОм}$
1	8	50	16	10	125
2	9	55	17	11	130
3	10	60	18	12	135
4	11	65	19	13	140
5	12	70	20	14	145
6	13	75	21	15	150
7	14	80	22	16	155
8	15	85	23	17	160
9	16	90	24	18	165
10	17	95	25	19	170
11	18	100	26	20	175
12	19	105	27	8	180
13	20	110	28	9	185
14	8	115	29	10	190
15	9	120	30	11	195

3. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з контрольною точкою схеми, установити кольоровою.

4. Включити схему. Перемикачі  $S_1$  і  $S_2$  установити в нижнє положення. Якщо напруга на виході ОП відмінна від нульової  $U_{\text{вих}} \neq 0$ , то необхідно перемикач  $S_2$  установити у верхнє положення та за допомогою резистора  $R_1$  добитися  $U_{\text{вих}} = 0$ .

Таблиця 5.2– Результати експериментальних досліджень операційного підсилювача

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	Інвертуючий підсилювач	Неінвертуючий підсилювач
	$U_{\text{вих}}, \text{В}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
0,1		
0,2		
0,3		
0,4		
0,5		
0,6		
0,7		
0,8		
0,9		
1,0		
1,1		
1,2		



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 65

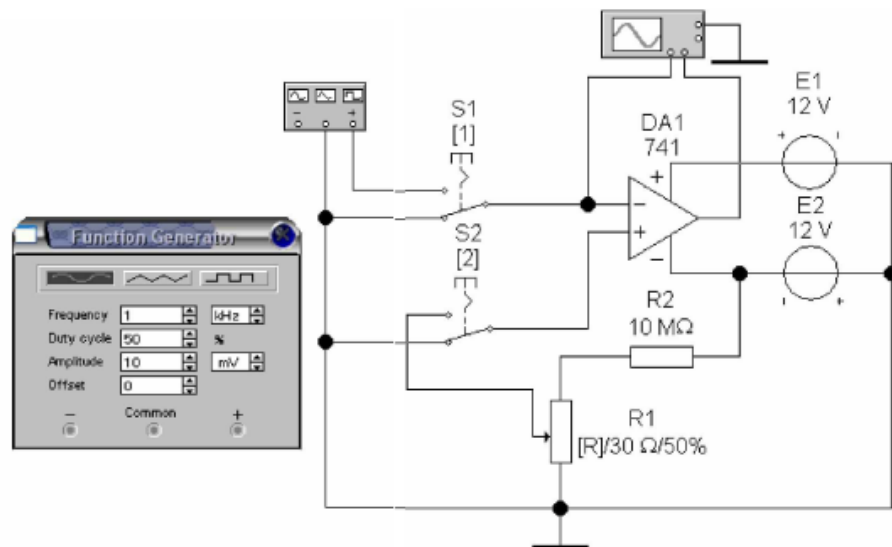
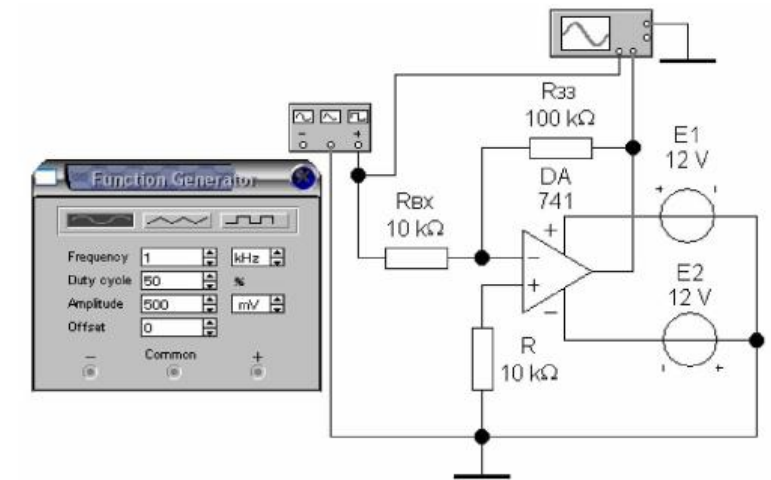


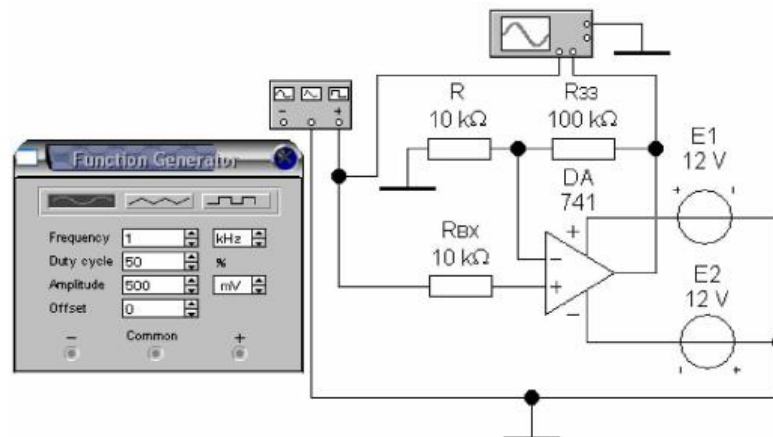
Рис. 5.5 – Схема для дослідження операційного підсилювача

5. Перемикач S1 установити у верхнє положення і зняти осцилограми вхідної  $U_{ВХ} = f(U_{ВХ})$  і вихідної  $U_{ВІХ} = f(U_{ВХ})$  напруг ОП. За допомогою візирної лінії віртуального осцилографа виміряти амплітуди напруг і обчислити коефіцієнт підсилення ОП.
6. Набрати схему для дослідження інвертуючого підсилювача (рисунок 5.6,а).
7. Установити задані в таблиці 1 і розраховані в п.2 параметри елементів схеми.
8. Лінію, що з'єднує вхід "В" віртуального осцилографа з виходом ОП, установити кольоровою.
9. Включити схему. За допомогою віртуального осцилографа зняти залежність вихідної напруги операційного підсилювача від вхідної:  $U_{ВІХ} = f(U_{ВХ})$ . Результати вимірів занести в таблицю 2.
10. Привести осцилограми напруг (див. рисунок 5.7). Визначити коефіцієнт підсилення ОП за напругою  $K_U$ .
11. Набрати схему для дослідження не інвертуючого підсилювача (рисунок 5.6,б).
12. Виконати пп. 7-10.
13. За даними таблиці 5.2 побудувати графіки залежності  $U_{ВІХ} = f(U_{ВХ})$  для інвертуючого і неінвертуючого підсилювачів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 66



а)



б)

Рис. 5.6 – Схеми для дослідження операційного підсилювача:  
а) інвертуючого; б) неінвертуючого

### 5.5. Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання п.2.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень підсилювачів.
4. Висновки по роботі. Аналіз теоретичних і експериментальних результатів.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 67

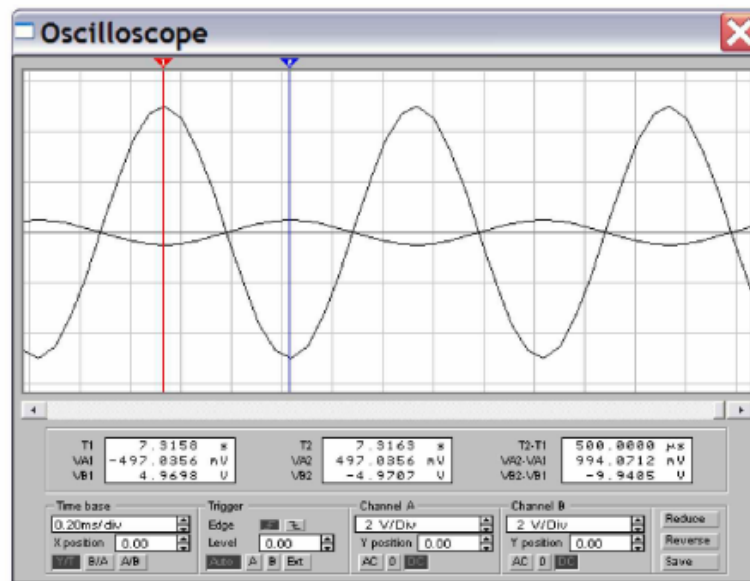


Рис. 5.7 – Осцилограми напруг інвертуючого операційного підсилювача

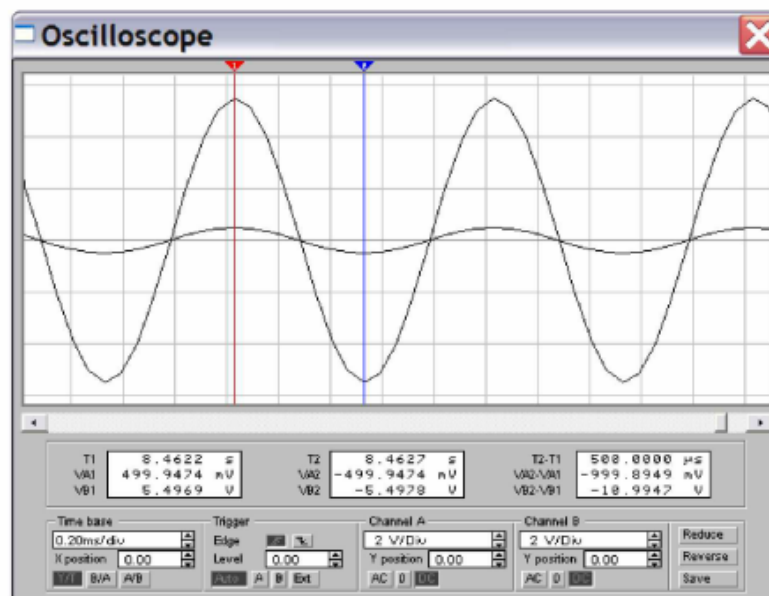


Рис. 5.8 – Осцилограми напруг неінвертуючого операційного підсилювача

### 5.6. Контрольні питання

1. Поясніть призначення підсилювачів постійного струму.
2. Поясніть, що таке операційний підсилювач і як він побудований?
3. Поясніть призначення операційних підсилювачів.
4. Наведіть умовне графічне позначення та поясніть призначення виводів операційного підсилювача.
5. Наведіть основні параметри і характеристики операційного підсилювача.
6. Наведіть схему та поясніть принцип дії інвертуючого підсилювача на ОП.
7. Наведіть схему та поясніть принцип дії неінвертуючого підсилювача на ОП..

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 86/68</i>

8. Поясніть, яку роль виконує зворотний зв'язок в операційному підсилювачі?
9. Поясніть, як впливає зворотний зв'язок в операційному підсилювачі на його передатну характеристику?
10. Поясніть, у чому полягає відмінність операційних підсилювачів від звичайних?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/69

## Лабораторна робота № 6 ПАРАМЕТРИЧНІ СТАБІЛІЗАТОРИ НАПРУГИ

### 6.1. Мета роботи

Вивчення принципу роботи і дослідження параметричних стабілізаторів напруги.

### 6.2. Основні теоретичні відомості

**Стабілізатори напруги** - це електронні пристрої, призначені для автоматичної підтримки незмінного значення напруги з необхідною точністю в заданому діапазоні зміни напруги джерела або опору (струму) навантаження.

За принципом роботи стабілізатори напруги підрозділяються на параметричні та компенсаційні.

Параметричний метод стабілізації базується на зміні параметрів нелінійного елемента стабілізатора в залежності від зміни дестабілізуючого чинника, а стабілізатор називають параметричним.

Схема параметричного стабілізатора напруги наведена на рисунку 6.1, а. Вона складається з баластного резистора  $R_B$  і стабілітрона VD. Стабілізатор підключається до виходу випрямляча з фільтром. Навантаження увімкнене паралельно стабілітрону.

Особливості роботи такого стабілізатора напруги засновані на тому, що напруга стабілітрона на зворотній гілці його вольт-амперної характеристики змінюється незначно в широкому діапазоні зміни зворотного струму стабілітрона. Зміна напруги на вході стабілізатора зумовлює значну зміну струму стабілітрона при незначній зміні напруги на ньому.

Стабілізатори характеризуються коефіцієнтом стабілізації:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{ВНХ} / U_{ВНХ}} \quad (6.1)$$

який для параметричних стабілізаторів складає  $K_{CT} = 20 \div 50$ .

Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд:

$$U = U_H + IR_B \quad (6.2)$$

де  $R_B$  - баластний резистор, необхідний для зменшення впливу дестабілізуючих чинників на напругу навантаження.

Опір баластного резистора  $R_B$  вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела  $U$ , напруга і струм стабілітрона також відповідали номінальним значенням  $I_{CT.H}$ . Величину  $I_{CT.H}$  визначають за паспортними даними стабілітрона за виразом:

$$I_{CT.H} = \frac{I_{CT.min} + I_{CT.max}}{2} \quad (6.3)$$

Тоді з рівняння (6.2), визначаємо опір баластного резистора:

$$R_B = \frac{U - U_{CT.H}}{I_{CT.H} + I_H} \quad (6.4)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/70

де  $I_H = P_H / U_H$ ;  $U \approx U_a$ ;  $I = I_{CT.H} + I_H$ .

Роботу параметричного стабілізатора розглянемо за допомогою вольт-амперної характеристики стабілітрона і прямої навантаження (рисунок 6.1, б). Характеристика навантаження будується (при номінальній напрузі джерела) по двох точках, а саме: точка А з координатами  $U_{CT.H}$ , і точка Б на осі ординат, яка визначається за виразом  $I = U / R_B$ . Через ці точки будують пряму навантаження. Якщо напруга  $U$ , що подається на вхід стабілізатора, збільшиться на  $\Delta U$  із-за підвищення, наприклад, напруги мережі, тоді характеристика навантаження баластного резистора  $R_B$  переміститься паралельно самій собі і займе положення, що відповідає струму  $I_{CT.max}$  і напрузі  $U'_H$ . Напруга  $U_{CT} = U_H$  залишиться практично незмінною. Напруга на стабілітроні залишиться незмінною також при зниженні вхідної напруги стабілізатора та при змінах струму навантаження.

Переваги параметричних стабілізаторів - простота конструкції і надійність роботи, недолік - низькі коефіцієнт стабілізації та к.к.д., а також вузький і нерегульований діапазон напруги, що стабілізується.

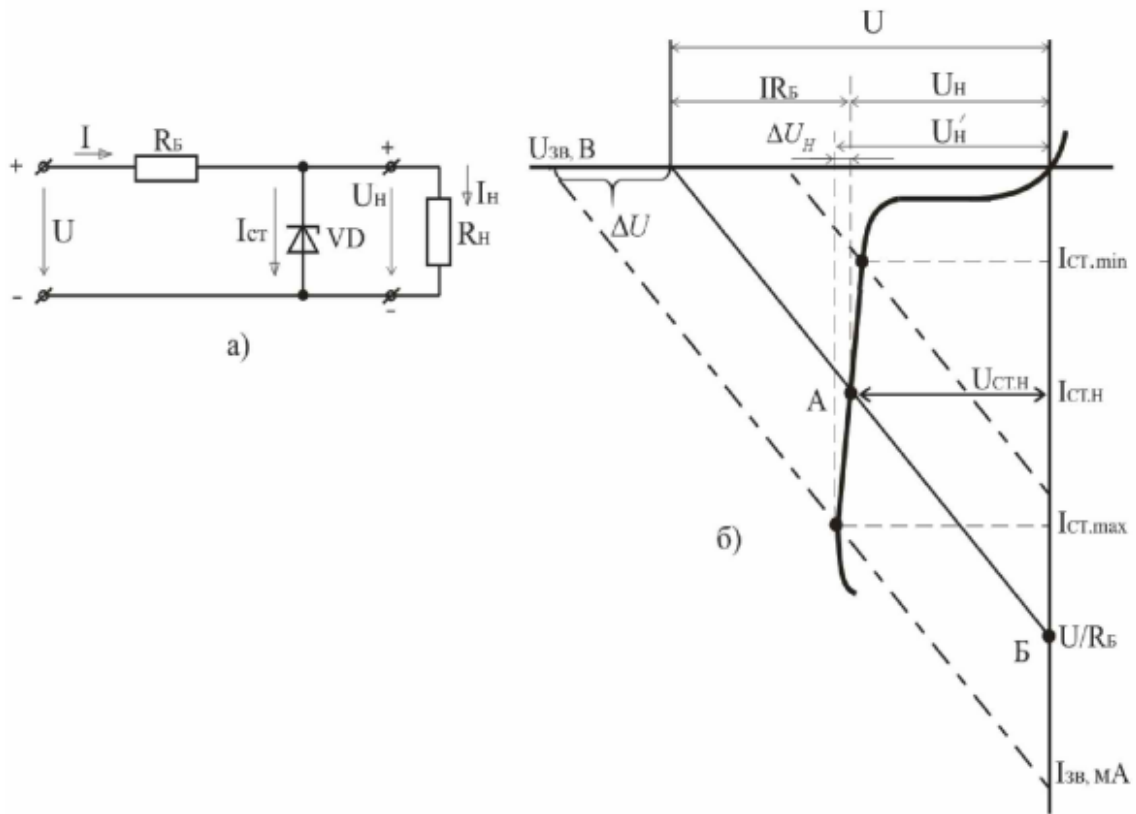


Рис. 6.1 - Параметричний стабілізатор напруги: а - схема; б - графічна інтерпретація принципу роботи

### 6.3 Завдання для виконання

1. Привести визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Привести схему параметричного стабілізатора напруги.
3. Описати призначення елементів схеми і принцип роботи параметричного

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/71

стабілізатора напруги.

Таблиця 6.1. Варіанти завдань для розрахунку стабілізатора

№ вар.	$P_H$ , мВт	$U_H$ , В	$U_{ВХ}$ , В	№ вар.	$P_H$ , мВт	$U_H$ , В	$U_{ВХ}$ , В
1	100	5	10	16	190	14	40
2	80	6	15	17	220	16	45
3	60	7	20	18	240	18	50
4	200	10	25	19	70	4	10
5	160	12	30	20	110	7	15
6	140	14	35	21	150	10	20
7	120	16	40	22	190	13	25
8	170	18	45	23	230	16	30
9	190	22	50	24	270	19	35
10	50	3	10	25	310	22	40
11	90	4	15	26	350	25	45
12	110	5	20	27	390	28	50
13	130	7	25	28	90	4	10
14	150	10	30	29	120	6	15
15	170	12	35	30	140	8	20

Виконати розрахунок параметричного стабілізатора напруги (визначити струм  $I_H$  і опір  $R_H$  навантаження; вибрати тип стабілітрона і його паспортні дані:  $U_{СТ.Н}$ ,  $I_{СТ.МІН}$ ,  $I_{СТ.МАХ}$ ,  $R_D$ ; визначити номінальний струм стабілізації стабілітрона  $I_{СТ.Н}$  і опір баластного резистора  $R_B$ ).

**Вихідні дані:** потужність  $P_H$  і напруга  $U_H$  навантаження; напруга на вході стабілізатора  $U_{ВХ}$ . Варіанти завдань наведені в таблиці 6.1.

Порядок розрахунку параметричного стабілізатора напруги:

- визначають параметри навантаження:

$$I_H = P_H / U_H, \quad R_H = U_H / I_H.$$

- залежно від напруги навантаження  $U_H$  вибирають тип стабілітрона і його паспортні дані  $U_{СТ.Н}$ ,  $I_{СТ.МІН}$ ,  $I_{СТ.МАХ}$ ,  $R_D$

- визначають номінальний струм стабілізації стабілітрона:

$$I_{СТ.Н} = (I_{СТ.МІН} + I_{СТ.МАХ}) / 2.$$

- визначають опір баластного резистора:

$$R_B = (U_{ВХ} - U_{СТ.Н}) / (I_{СТ.Н} + I_H).$$

#### 6.4 Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB/Multisim і набрати схему для дослідження параметричного стабілізатора напруги (рис.6.2).
2. Установити задані параметри елементів схеми.
3. Включити схему. Змінюючи величину опору навантаження  $R_H = (500 \text{ Ом}; 1 \text{ кОм};$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/72

1,5 кОм; 2,0 кОм; 2,5 кОм) при входній напрузі  $U_{ВХ} = 20В$ , зняти показання приладів. Результати вимірів занести в таблицю 6.2.

4. За даними табл. 6.1 побудувати вихідну характеристику стабілізатора  $U_{ВИХ} = f(I_H)$ . Основні параметри стабілітронів у таблиці 6.4.

5. Змінюючи величину входньої напруги  $U_{ВХ} = (10 В; 15 В; 20 В; 25 В; 30 В)$  при величині опору навантаження  $R_H = 500 Ом$  зняти показання приладів. Результати вимірів занести в табл. 6.3.

Таблиця 6.2. Результати експериментальних досліджень параметричного стабілізатора напруги при  $R_H = var, U_{ВХ} = const$

$R_H, Ом$	$I_1, mA(PA1)$	$I_{CT}, mA (PA2)$	$I_H mA (PA3)$	$U_{ВИХ}, В (PV2)$

6. Визначити коефіцієнт стабілізації

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{ВХ} / U_{ВХ}}{\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}}$$

7. Визначити диференціальний опір стабілітрона на ділянці стабілізації

$$R_D = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}$$

Таблиця 6.3

Результати експериментальних досліджень параметричного стабілізатора напруги при  $U_{ВХ} = var, R_H = const$

$U_{ВХ}, В$	$I_1, mA(PA1)$	$I_{CT}, mA (PA2)$	$I_H mA (PA3)$	$U_{ВИХ}, В (PV2)$



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/73

Таблиця 6.4 Основні параметри стабілітронів

Тип стабілітрона	Напруга стабілізації Уст.н, В	Допустимий струм		Динамічний опір R <sub>д</sub> , Ом
		Мінімальний Іст.мін., мА	Максимальний Іст.макс, мА	
КС133А	3	3	10	14
КС139А	3,9	3	10	16
КС147А	4,7	3	10	15
КС156А	5,6	3	10	28
КС168А	6,8	3	10	46
Д814 А	8	3	40	6
Д814Б	9	3	36	10
Д814В	10	3	32	12
Д814Г	11	3	29	15
Д814Д	13	3	24	18
Д815Г	10	25	800	1,8
Д815Е	15	25	550	2,5
КС520 В	20	3	22	20
Д816 А	22	10	230	7
2С524 А	24	1	33	30
2С530 А	30	1	27	45
Д816В	33	10	150	10
Д816Д	40	10	ПО	300
Д817 А	56	5	35	400
Д817Г	100	5	25	800
2С920 А	120	5	42	100
КС630А	130	5	50	180
КС650А	150	2,5	25	255
КС680А	180	2,5	25	255

### 6.5 Зміст звіту

1. Найменування роботи.
2. Відповіді на завдання для виконання.
3. Схеми і результати експериментальних досліджень.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 74

#### 4. Висновки по роботі. Аналіз експериментальних результатів.

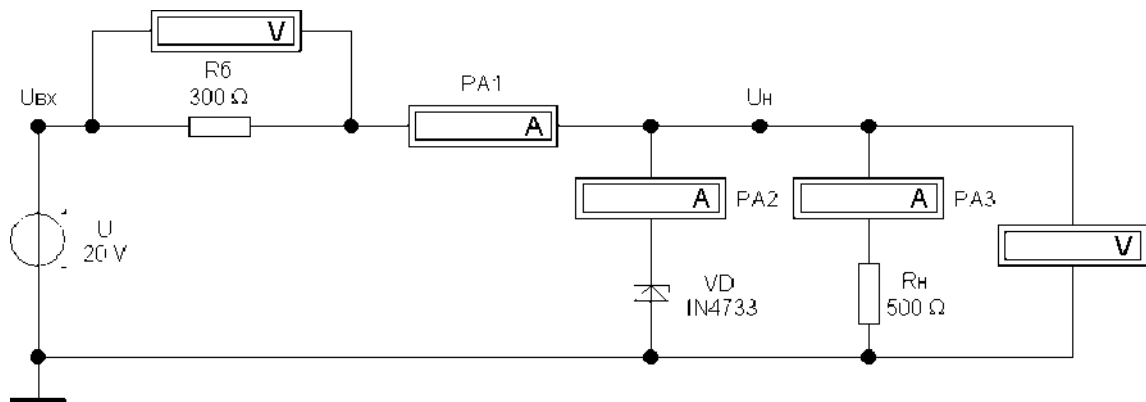


Рис. 6.2 - Схема для дослідження параметричного стабілізатора напруги

### 6.6 Контрольні питання

1. Наведіть визначення і класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Поясніть призначення стабілізаторів напруги.
3. Поясніть, на чому базується параметричний метод стабілізації?
4. Наведіть схему і поясніть принцип роботи параметричного стабілізатора напруги.
5. Наведіть порядок розрахунку параметричного стабілізатора напруги.
6. Наведіть умови вибору стабілітрона для параметричного стабілізатора напруги.
7. Наведіть графічну інтерпретацію роботи параметричного стабілізатора напруги.
8. Назвіть основні параметри стабілізаторів напруги.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/75

## Лабораторна робота № 7

### ДОСЛІДЖЕННЯ МУЛЬТИВІБРАТОРА

#### 7.1. Мета роботи

Вивчення принципів, методів розрахунку і особливостей настроювання автоколивальних та ждучих мультівібраторів на операційних підсилювачах, набуття навичок реалізації їх на операційних підсилювачах навичок конструювання та дослідження їх в реальних умовах.

#### 7.2 Теоретичні відомості

Розглянемо принцип дії автоколивального мультівібратора (АМ) на ОП. АМ - це генератор сигналів прямокутної форми. Його схема (рис.7.1) схожа на схему компаратора з гістерезисом, тільки на відміну від останнього тут замість генератора входної напруги стоїть конденсатор.

Резистори  $R_1$  і  $R_2$  створюють подільник напруги, частина вихідної напруги з якого подається зворотно на неінвертувальний вхід.

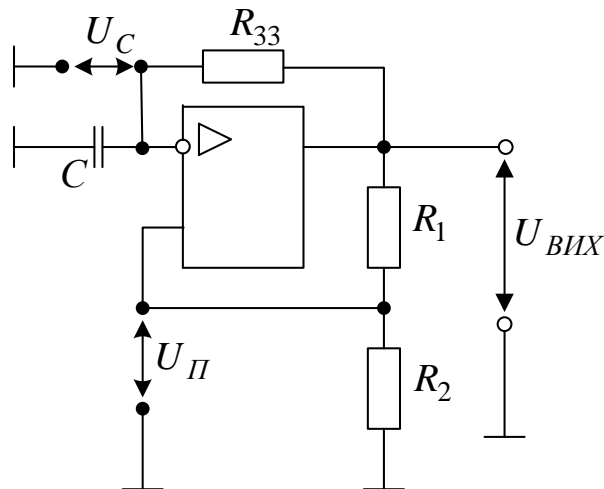


Рис. 7.1 - Схема мультівібратора на ОП

При  $U_{\text{вих}} = +U_{\text{нас}}$  напруга зворотного зв'язку називається верхньою пороговою напругою і визначається за формулою:

$$U_{\text{ПВ}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+U_{\text{нас}}). \quad (7.1)$$

Коли  $U_{\text{вих}} = +U_{\text{нас}}$ , тоді струм  $I$  через  $R_{33}$  заряджає конденсатор  $C$ . Заряд відбувається до того часу поки  $U_c < U_{\text{п.в.}}$ , а на виході зберігається напруга  $+U_{\text{нас}}$ .

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/76

В момент заряду конденсатора до величини  $U_c$  дещо більшої  $U_{п.в.}$  напруга на інвертувальному вході стає позитивною по відношенню до напруги на неінвертувальному вході. При цьому схема перемикається і  $U_{вих}$  змінюється від рівня  $+U_{нас}$  до  $-U_{нас}$  рівня, на неінвертувальному вході у цьому випадку буде підтримуватися від'ємний потенціал

$$U_{пв} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (-U_{нас}). \quad (7.2)$$

В момент перемикавання схеми в стан  $U_{вих} = -U_{нас}$  (рис.13.2) початкова напруга на конденсаторі  $U_{п.в.}$  і через нього буде протікати струм, перезаряджаючий його до  $U_{п.н.}$

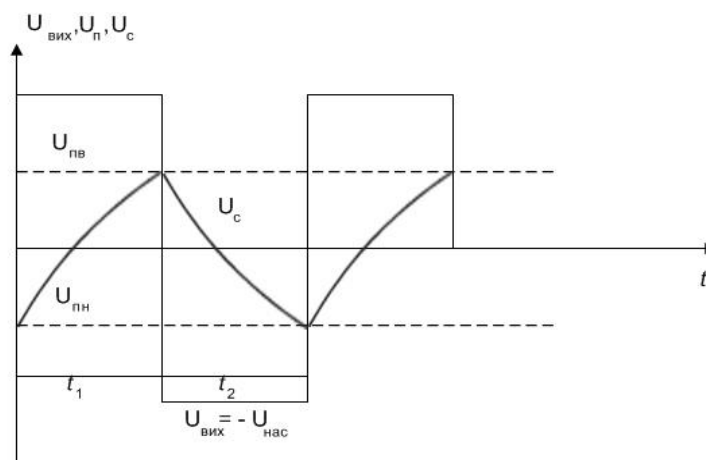


Рис. 7.2 – Часова діаграма роботи мультивібратора на ОП

В момент коли  $U_c$  стає нижче напруги зворотного зв'язку  $U_{п.н.}$  схема перемикається в стан  $U_{вих} = +U_{нас}$ . Схема повертається в початковий стан. Конденсатор  $C$  має початковий заряд  $U_{п.н.}$ , він буде розряджатися від  $U_{п.н.}$  до нуля і перезаряджатися знову до  $U_{п.в.}$

Для визначення періоду коливань скористаємося рівнянням для часу переривання експоненційного процесу

$$t_{II} = r \ln \frac{X_0 - X_{\infty}}{X_{II} - X_{\infty}}, \quad (7.3)$$

де  $X_0$ ,  $X_{II}$  - відповідно початкове і кінцеве значення фізичної величини на інтервалі  $t_{II}$ ,  $X_{\infty}$  - асимптотичне значення фізичної величини.

Оскільки  $t_1 = t_2$  то період коливань

$$T = 2t_2 = 2CR_{33} \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right). \quad (7.4)$$

Частота генерації:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/77

$$f = \frac{1}{T} \approx 0.4545 \frac{1}{R_{33}C}. \quad (7.5)$$

Принцип роботи ждучого мультивібратора (ЖМ). Як відомо, тривалість імпульсу ЖМ залежить тільки від зовнішніх елементів, увімкнених до ОП. З рис.7.3 видно, що ЖМ спрацьовує по негативному фронту вхідного імпульсу  $E_{вх.}$ , тривалість якого може бути більшою або меншою власної тривалості  $\tau$  вихідного імпульсу одновібратора.

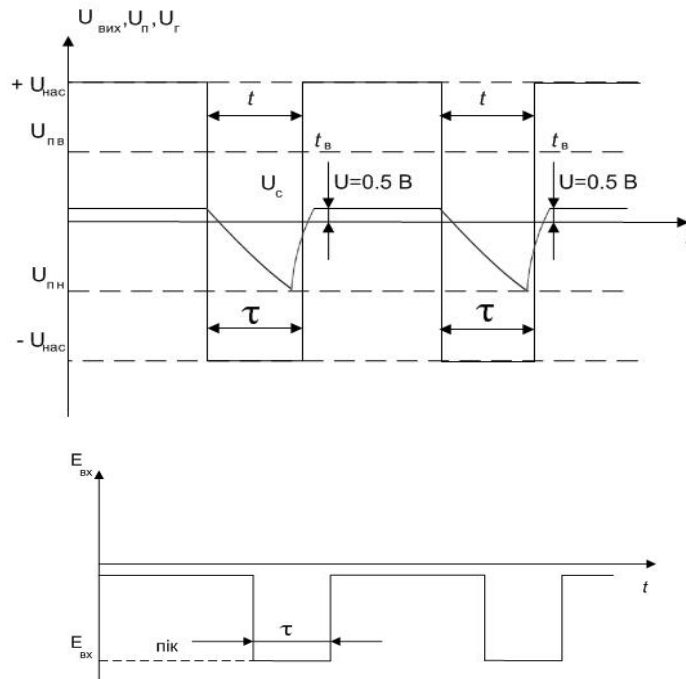


Рис. 7.3 – Часові діаграми роботи одновібратора на ОП

Розглянемо режими роботи ЖМ, схема якого зображена на рис.7.4.

Режим очікування. На неінвертувальний вхід ОП з подільника  $R_1, R_2$  потрапляє напруга зворотного зв'язку  $U_{п.в.}$  значення якої визначається рівнянням:

$$U_{пв} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+U_{нас}). \quad (7.6)$$

Діод VD1- фіксує на вході позитивну напругу на рівні 0,5В. При цьому напруга на неінвертувальному вході позитивна по відношенню до напруги на інвертувальному вході і ОП підсилює цю диференційну вхідну напругу,  $U_{вих}=+U_{нас}$

Перехід в стан витримки. Якщо вхідний сигнал являє собою постійну напругу з встановленим значенням, то на неінвертувальному вході зберігається позитивний відносно інвертувального входу потенціал і  $U_{вих}=+U_{нас}$ . Якщо ж  $E_{вх}$  стрибком стає негативним і приймає пікове значення  $E_{вх}$  і  $|E_{вхпик}| > |U_{п.в}|$  на неінвертувальному вході падає нижче рівня напруги на інвертувальному вході. Вихід схеми перемикається  $U_{вих}=-U_{нас}$  і ЖМ переходить в режим витримки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/78

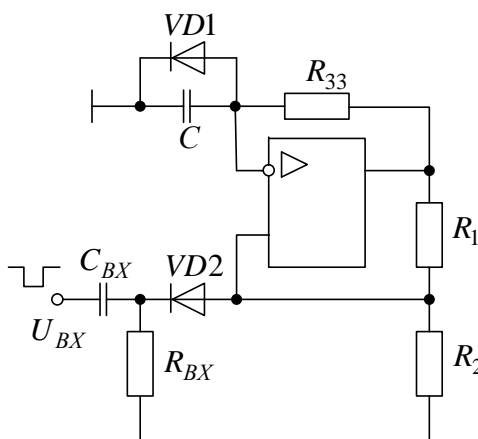


Рис. 7.4 – Схема одновібратора на ОП

Режим витримки - нестійкий стан у якому ЖМ не може довго перебувати. Розглянемо особливості цього режиму. З подільника R1, R2 на неінвертувальний вхід потрапляє від'ємна напруга  $U_{\text{пн}}$ . Схема перемикається в стан  $U_{\text{вих}} = +U_{\text{нас}}$ . Це момент закінчення циклу роботи ЖМ; вихідний імпульс закінчився і схема повернулася до стійкого стану. Діод VD1 від'єднав коло запуску від одновібратора на час генерування імпульсу. Щоб отримати одновібратор генеруючий позитивний імпульс при збудженні позитивним вхідним сигналом, достатньо змінити полярність увімкнення діодів.

Для визначення тривалості імпульсу і часу відновлення скористаємося формулою для визначення часу переривання експоненційного процесу. За час генерування імпульсу на C змінюється від 0,5В до  $U_{\text{пн}}$ , тоді

$$t_{\text{п}} = CR_{33} \ln \frac{0.5 - (-U_{\text{нас}})}{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (-U_{\text{нас}}) - (-U_{\text{нас}})} = CR_{33} \ln \left( 1 + \frac{2R_2}{R_1} \right), \quad (7.7)$$

$$t_{\text{відн.}} = CR_{33} \ln \left( \frac{-U_{\text{пн}} - U_{\text{нас}}}{0.5 - U_{\text{нас}}} \right) \approx CR_{33} \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right).$$

### 7.3 Порядок виконання роботи

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

3. Зібрати схему мультивібратора, приведену на рис.7.5, де  $R_1=30\text{кОм}$ ,  $R_2=2.4\text{кОм}$ ,  $R_{33}=150\text{кОм}$ ,  $C=0,47\text{мкФ}$ .

4. Зібрати схему одновібратора, приведену на рис.7.6.  $R_1=30\text{кОм}$ ,  $R_2=2,4\text{кОм}$ ,  $R_{33}=220\text{кОм}$ ,  $C=0,47\text{мкФ}$ ,  $C_{\text{ВХ}}=22\text{нФ}$ ;  $R_{\text{ВХ}}=2,2\text{кОм}$ .

5. Коли схема зібрана і готова до запуску, натисніть кнопку ввімкнення живлення на панелі інструментів. У випадку серйозної помилки в схемі (замикання елемента

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/79

живлення накоротко, відсутність нульового потенціалу в схемі) буде видано попередження.

6. Зробіть аналіз схеми, використовуючи інструменти індикації. Виклик терміналу здійснюється подвійним натисканням клавіші миші на елементі. У випадку потреби можна скористатися кнопкою Pause.

7. При необхідності зробіть доступні аналізи в розділі меню Analysis.

8. Занесіть пояснення щодо створення схем у звіт.

9. Зробіть висновки.

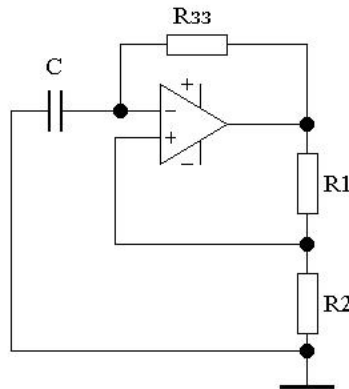


Рис. 7.5 – Схема мультивібратора на ОП

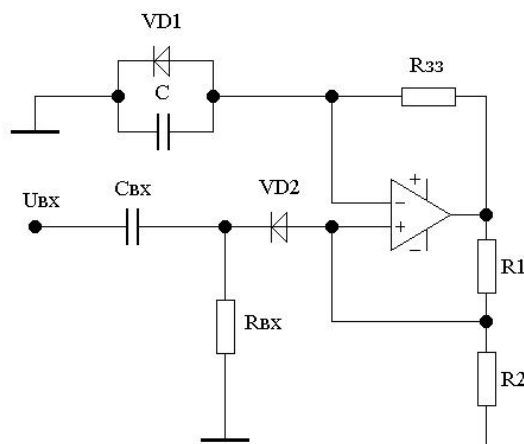


Рис. 7.6 – Схема одновібратора на ОП

#### 7.4 Контрольні запитання

1. Приведіть часові діаграми автоколивального і ждучого мультивібратора на ОП в різних точках схеми.

2. Поясніть призначення ланки  $C_{вх}$ - $R_{вх}$  ждучого мультивібратора на ОП.

3. Як змінити полярність генерованих імпульсів в схемі ЖМ на ОП.

4. Як пояснити присутність  $t_{\phi}$  і  $t_c$  в генерованих імпульсах.

5. Як можна змінити тривалість генерованих позитивних імпульсів в схемі МВ на ОП, не змінюючи при цьому тривалість негативного імпульсу.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/80

## Лабораторна робота № 8 ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ІМПУЛЬСІВ

### 8.1. Мета роботи

Вивчення принципів дії та основних властивостей автогенераторів, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

### 8.2. Основні теоретичні відомості

Високі технічні показники мають  $LC$  - автогенератори гармонійних коливань, в яких використані як підсилювальні ланки операційні підсилювачі. В зв'язку з надлишковістю коефіцієнта підсилення таких підсилювачів є можливість, крім позитивного зворотного зв'язку через частотно-вибірковий резонансний контур, вводити досить глибокий негативний зворотній зв'язок, що суттєво підвищує стабільність частоти вихідних коливань.

$LC$ -генератори (рис. 8.1) містять резонансний контур  $LC$ , який визначає частоту коливань вихідної напруги:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (8.1)$$

Практично задану частоту коливань отримують шляхом налаштування контуру в резонанс струмів, який визначається рівністю реактивних провідностей  $b_L = b_C$ .

Технічні характеристики  $LC$  -автогенераторів у діапазоні низьких частот суттєво знижуються, оскільки непомірно збільшуються індуктивність і ємність коливального контуру. Це призводить до збільшення омичного опору обмотки котушки і струмів витoku конденсатора, зниженню добротності коливального контуру і стабільності частоти автогенератора. Тому в автогенераторах гармонічних коливань низькочастотного діапазону використовують частотно - вибіркові кола з елементів  $R$  та  $C$  і, залежно від створюваного ними зсуву фази на квазірезонансній частоті, інвертуючі або неінвертуючі підсилювачі.

На відміну від резонансної частоти  $\omega_0$  коливального  $LC$  - контура для частотно-вибіркових  $RC$ -кіл частоту  $\omega_0$ , кратну  $\pi n$ , де  $n = 0$  або  $1$ , називають квазірезонансною частотою. Такі автогенератори й називають  $RC$ -генераторами. За габаритними і ваговими характеристиками в області частот від частин герца до десятків кілогерц вони мають значні переваги перед  $LC$  -автогенераторами.

Для того, щоб із всього можливого спектра частот автогенератор генерував лише одну гармонічну складову, умови самозбудження генератора ( $K_{nU}\beta_U = 1$ ,  $\varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi n$ ) повинні виконуватися на цій частоті.

Як фазуючі використовують кола, що складаються з простих  $\Gamma$ -подібних  $RC$  - ланок (звичайно трьох або чотирьох). На рисунку 8.2 а зображений триланковий ланцюжок, так звана  $R$ -паралель, а на рисунку 8.2 б - його частотна і фазова характеристики. Як видно з рисунка 8.3 б на квазірезонансній частоті фазовий зсув  $\varphi_\beta$  для цього ланцюжка дорівнює  $180$  ел. град., а коефіцієнт передачі напруги має дійсне значення  $\beta_0$ , що дорівнює  $1/29$ .

При цьому квазірезонансна частота ланцюжка  $\beta_U = \dot{U}_{ax} / \dot{U}_{ax}$ , визначається параметрами  $R$  і  $C$ .



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/81

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1 / 2\pi RC\sqrt{6}. \quad (8.2)$$

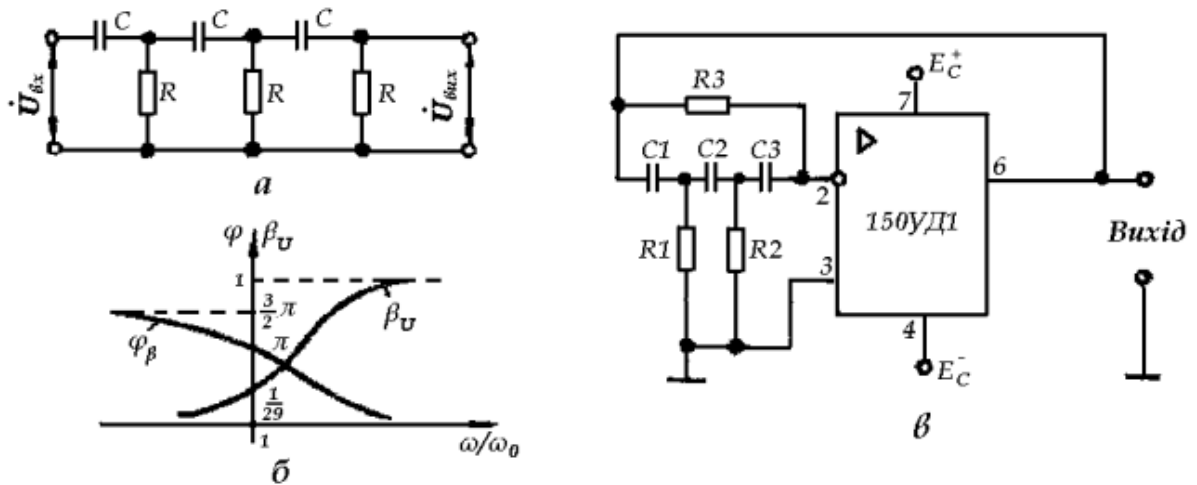


Рис. 8.2. Схема RC генератора на операційному підсилювачі

Таким чином, підсилювальний каскад із зсувом фази напруги підсилюваного сигналу на 180 ел. град, за допомогою триланкового ланцюжка  $R$ -паралель може генерувати гармонічні коливання з частотою  $f_0$  (8.2), якщо його коефіцієнт підсилення перевищує 29, що відповідає також виконанню умови балансу амплітуд.

Для чотириланкового ланцюжка  $R$ -паралель  $\beta_0 = 1/18,4$ . Тому коефіцієнт підсилення підсилювальної ланки  $RC$ -генератора не може бути меншим ( $K_{nU} \geq 18,4$ ). Подальше збільшення числа ланок фазуючого ланцюжка не дає суттєвого зменшення затухання, ускладнюючи схему.

На рисунку 8.2 в показана схема  $RC$ -генератора на ОП 153УД1 з фазуючим ланцюжком. Оскільки фазуючий  $RC$ -ланцюжок увімкнений між виходом і інвертуючим входом ОП, загальний фазовий зсув у замкнутій петлі дорівнює 360 ел. град., що забезпечує виконання балансу фази без утруднення в зв'язку з надлишковістю коефіцієнта підсилення ОП. Великий вхідний і малий вихідний опори ОП дозволяють здійснювати режим практично ідеального узгодження фазуючого ланцюжка з підсилювальною ланкою.

Найбільш часто застосовують  $RC$ -автогенератори, що використовують послідовно-паралельний частотно-вибірковий  $RC$ -ланцюжок (рис. 8.3 а). Квазірезонансна частота для цього ланцюжка,

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1 / 2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}. \quad (8.3)$$

і коефіцієнт передачі напруги на квазірезонансній частоті

$$\beta = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + R_1 / R_2 + C_1 / C_2}. \quad (8.4)$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 82

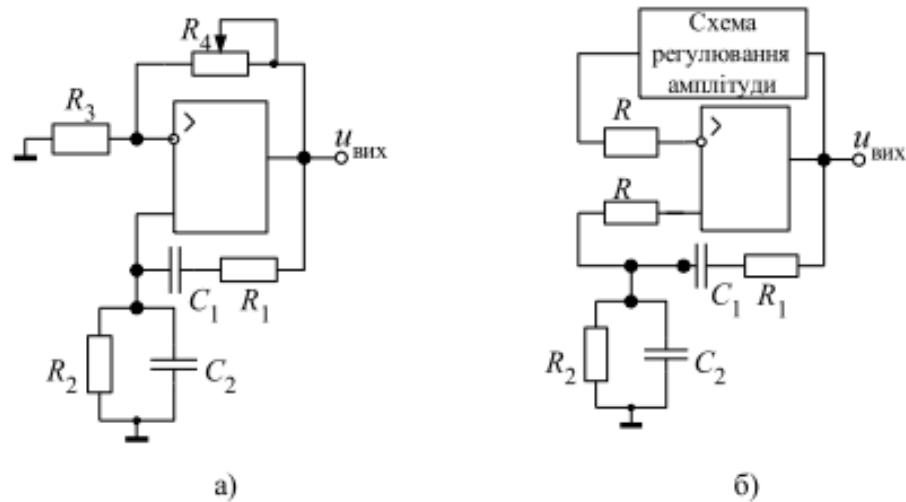


Рис. 8.3. Схеми RC-генераторів

Через те, що дуже часто  $R_1 = R_2 = R$  і  $C_1 = C_2 = C$ , співвідношення (8.3) і (8.4) для цього випадку відповідно мають вигляд

$$\beta = \frac{1}{3}, f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (8.5)$$

Широко використовують RC-генератори за схемою Віна (генератор Віна), (рис. 8.3 б). Цей генератор має схему регулювання амплітуди, що надає йому ширші можливості.

### 8.3 Порядок виконання роботи

1. Електрична схема RC-автогенератора наведена на рисунку 8.4. Операційний підсилювач охоплений колом додатного зворотного зв'язку (ДЗЗ) резисторів  $R$  і конденсаторів  $C$ , а також колом від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ), утвореного діодами  $D1$  і  $D2$  і резистором  $R1$ . Нелінійний ВЗЗ призначений для обмеження амплітуди автоколивань.

2. Частота коливань автогенератора дорівнює  $N$  кГц, де  $N$  - номер згідно зі списком. Опори резисторів і ємності конденсаторів розраховуються з формулою

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, \text{ при цьому вважаємо: } R_2=R_3=R=1\dots 10 \text{ кОм і } C_1=C_2=C.$$

3. Отримайте стабільний режим роботи автогенератора. Визначте з отриманої осцилограми основні показники: частоту і амплітуду автоколивань. Порівняйте отриману частоту автоколивань з заданою.

4. Збільшити або зменшити опори чи ємності в колі ДЗЗ. Визначте нову частоту коливань. За отриманими результатами зробіть висновки.

5. Аналізуючи початок осцилограми, визначити тривалість перехідного процесу встановлення автоколивань. Коливання вважається встановленим, якщо його амплітуда відрізняється від стаціонарної не більш як на 10%.

6. Включіть паралельно діодам змінний резистор з опором 60 кОм (рис. 8.5) збільшуючи і зменшуючи його опір, спостерігайте за процесом виникнення і зриву автоколивань. Визначте опір резистора, при якому відбувається самозбудження, і розрахуйте коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача (опори діодів не враховуємо). Перевірте умови виникнення автоколивань/

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 83

7. Від'єднайте коло позитивного зворотнього зв'язку від автогенератора. Подайте гармонійний сигнал на неінвертуючий вхід підсилювача. Отримайте на частоті автоколивань на виході операційного підсилювача таку ж амплітуду вихідного сигналу, як і у випадку автоколивань. Розрахуйте коефіцієнт підсилення підсилювача, який відповідає стаціонарному стану автогенератора.

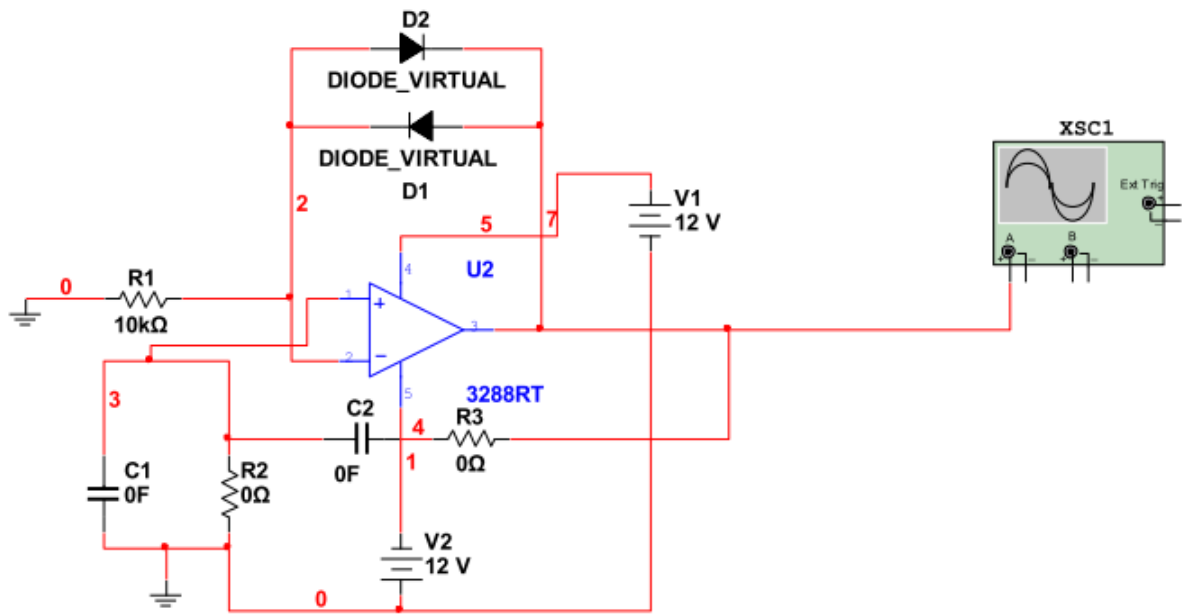


Рис. 8.4. Схема RC-автогенератора

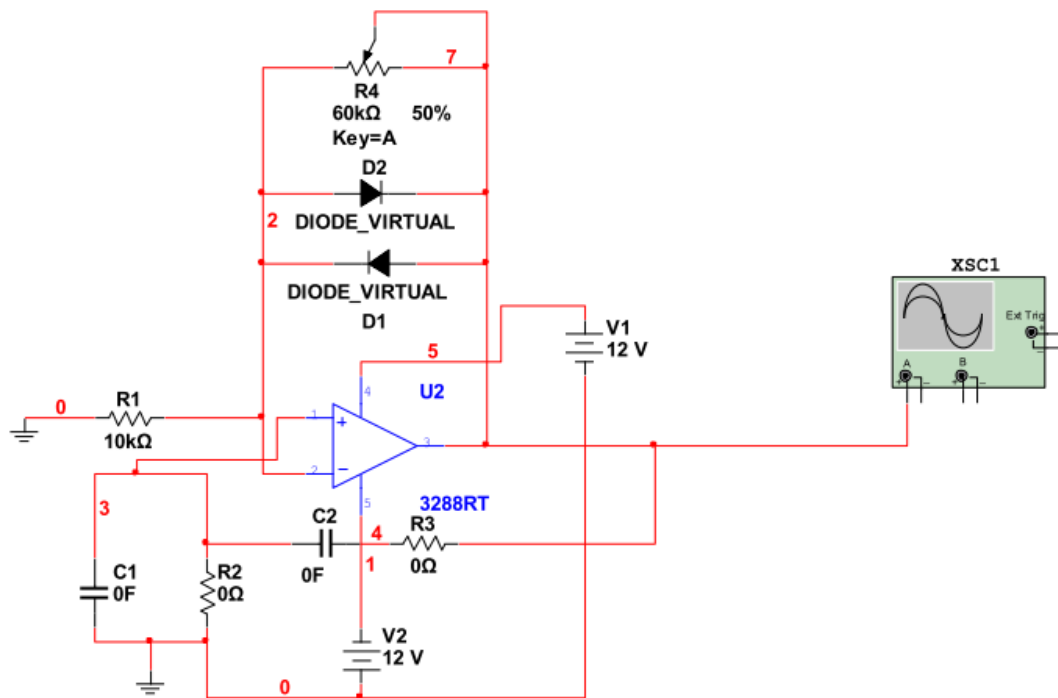


Рис.8.5 Схема автогенератора з регулюванням амплітуди коливань

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/ 84

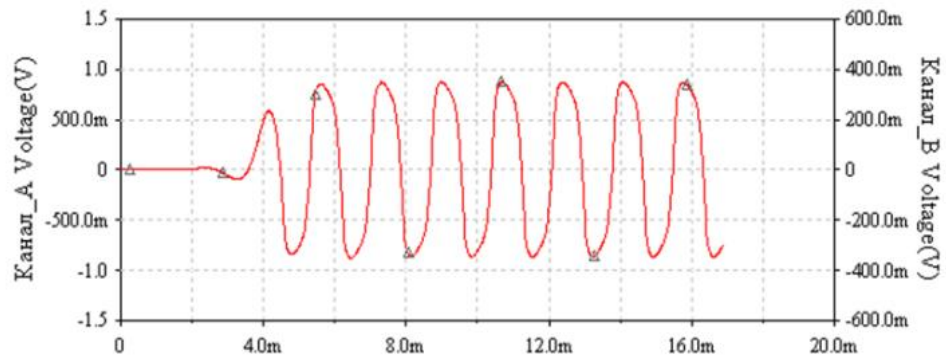


Рис. 8.6. Часова залежність вихідного сигналу автогенератора

#### 8.4 Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) розрахунки параметрів автогенератора, на які вказано в порядку виконання роботи;
- 5) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

#### 8.5 Контрольні запитання

1. Які обов'язкові структурні елементи входять до складу автогенератора і в чому полягає їх принцип взаємодії?
2. Які умови самозбудження треба задовольнити для одержання незатухаючих коливань?
3. Як можна змінювати амплітуду і фазу коливань у колі зворотного зв'язку автогенератора?
4. У чому особливості самозбудження ЯС-схем автогенераторів?
5. Чим зумовлені спотворення сигналу в автогенераторах? Яким чином можна усунути причини спотворень?

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/85

## ДОДАТОК А РЯДИ НОМІНАЛЬНИХ ОПОРІВ (ЄМНОСТЕЙ) ТА ЇХ ДОПУСКІВ

Номінальний опір (ємність) - значення опору резистора (ємності конденсатора), на які розрахований відповідний виріб і яке на ньому позначене або вказане у нормативній документації, що супроводжує його. Номінальні значення опорів (ємностей), які випускає вітчизняна промисловість та зарубіжні фірми, стандартизовані і зведені у сім рядів: E3; E6; E12; E24; E48; E96; E192. Для конденсаторів значної ємності (більш 1...10 мкФ) номінали можуть встановлюватись поза рядів E і залежати від типу конденсатора.

Ряди E являють собою десяткові ряди геометричної прогресії із знаменником прогресії, що дорівнює  $q^{1/N}$ , де N - номер ряду. Цифра після букви E (номер ряду) вказує кількість номінальних величин у кожному десятковому інтервалі. Наприклад, ряд E6 містить шість значень номінальних опорів (ємностей) у кожній декаді, які відповідають числам 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 або числам, які отримані шляхом ділення або множення цих чисел на  $10^n$ , де n - ціле додатне або від'ємне число. Значення номінальних чисел для рядів, які найбільш використовуються, наведені у табл. А1.

Таблиця А.1.

E3	E6	E12	E24	E3	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	1,0		3,3	3,3	3,3
			1,1				3,6
		1,2	1,2			3,9	3,9
			1,3				4,3
	1,5	1,5	1,5	4,7	4,7	4,7	4,7
			1,6				5,1
		1,8	1,8			5,6	5,6
			2,0				6,2
2,2	2,2	2,2	2,2		6,8	6,8	6,8
			2,4				7,5
		2,7	2,7			8,2	8,2
			3,0				9,1

Фактичні значення опорів (ємностей) можуть відрізнятися від номінальних у межах допустимих відхилень. Ряд допустимих відхилень також нормований. Допуски на номінали опорів наводяться у відсотках і обираються у відповідності з рядом:

$\pm 0,001$ ;  $\pm 0,002$ ;  $\pm 0,005$ ;  $\pm 0,01$ ;  $\pm 0,02$ ;  $\pm 0,05$ ;  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1,0$ ;  $\pm 2,0$ ;  $\pm 5,0$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 20$ ;  $\pm 30$ .

Для резисторів ряду E3 допуск  $\pm 30\%$ ; E6 -  $\pm 20\%$ ; E12 -  $\pm 10\%$ ; E24 -  $\pm 5\%$

Допуски на номінали ємностей конденсаторів вказуються у відсотках і обираються із ряду:  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$ ;  $\pm 1$ ;  $\pm 2$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 20$ ;  $\pm 30$ ;  $0 + 50$ ;  $-10 + 30$ ;  $-10 + 50$ ;  $-10 + 100$ ;  $-20 + 50$ ;  $-20 + 80$ .

Величина допуску, яка використовується, визначається не лише рядом номіналів (рядом E), а також і типом конденсатора. Для конденсаторів із номінальними ємностями нижче 10 пФ відхилення, які допускаються, вказуються у абсолютних значеннях:  $\pm 0,1$ ;  $\pm 0,25$ ;  $\pm 0,5$  та  $\pm 1$  пФ.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.02/2/152.00.1Б/ОК14- 2020
	Екземпляр № 1	Арк 86/86

## ДОДАТОК Б

### ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Номінальне значення напруги живлення постійного струму (у вольтах - В) повинне обиратися із слідує чого ряду:

0,25; 0,4; 0,6; 1,2; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 6,3; 9,0; 10,0;  
12,0 (12,6); 15,0; 20,0; 24,0; 27,0; 30,0; 40,0; 48,0; 60,0;  
80,0; 100 (125); 150; 200; 250 (300); 400 (500); 600; 800;  
1000; 1250; 1500; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6000; 8000.

За вихідною потужністю джерела поділяють на мікропотужні (до 1 Вт), малої потужності (1...10 Вт), середньої потужності (10...200 Вт), підвищеної потужності (100... 1000 Вт) та великої потужності (більше 1000 Вт). Вихідні напруги до 100 В називають низькими, від 100 до 1000 В - середніми та більше 1000 В - високими.