

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК**

до лабораторних робіт з дисципліни

**ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ  
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**Одеса – 2016**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК**

до лабораторних робіт з дисципліни

**ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ  
НАВКОИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

Узгоджено  
на факультеті магістерської  
та аспірантської підготовки

Одеса – 2016

Збірник методичних вказівок до лабораторних робіт з дисципліни «Проектування інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища» для магістрів I курсу денної форми навчання за спеціальністю - 122 "Компютерні науки та інформаційні технології", спеціалізацією "Компютерний еколого-економічний моніторинг". /Гор'єв С.А., – Одеса, ОДЕКУ, 2016 р. – 89 с.

Збірник методичних вказівок до лабораторних робіт з дисципліни «Проектування інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища» для магістрів I курсу денної форми навчання за спеціальністю - 122 "Компютерні науки та інформаційні технології", спеціалізацією "Компютерний еколого-економічний моніторинг". /Гор'єв С.А., – Одеса, ОДЕКУ, 2016 р. – 89 с.

Підп. до друку  
Умовн. друк. арк.

Формат  
Тираж

Папір  
Зам. №

Надруковано з готового оригінал-макета

---

Одеський державний екологічний університет  
65016 Одеса, вул. Львівська, 15

---

# **ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК**

до лабораторних робіт з дисципліни

## **ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

для магістрів 1 курсу навчання  
спеціальність - 122 "Компютерні науки та інформаційні технології"  
спеціалізація "Компютерний еколого-економічний моніторинг"

**„Узгоджено”**

Декан факультету магістерської та  
аспірантської підготовки

\_\_\_\_\_ Боровська Г.О.

## ЗМІСТ

Передмова .....	4
Лабораторна робота №1 «Придбання навичок роботи з програмою моделювання Electronics Workbench».....	7
Лабораторна робота №2 «Дослідження лінійних електричних ланцюгів постійного струму».....	24
Лабораторна робота №3 «Дослідження операційного підсилювача Ч-1».....	35
Лабораторна робота №4 «Дослідження операційного підсилювача Ч-2».....	42
Лабораторна робота №5 «Дослідження компараторів та одновібраторів на операційних підсилювачів».....	57
Лабораторна робота №6 «Аналіз роботи аналого-цифрового перетворювача».....	69
Список використаної літератури.....	89

## **ПЕРЕДМОВА**

Дисципліна “ Проектування інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища ” є вибірковою дисципліною підготовки магістрів за спеціальністю комп’ютерний еколого-економічний моніторинг, шифр 8.05010105 \_і відноситься до циклу професійної та практичної підготовки.

Метою курсу є підготовка фахівців, які володіють знаннями в галузі проектування та розробка інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища.

Завдання дисципліни полягає у вивченні принципів побудови та аналізу роботи інформаційних моделей систем моніторингу навколишнього середовища.

Дисципліна “ Проектування інформаційних систем моніторингу навколишнього середовища ” є дисципліною, що дозволяє спеціалістам вивчити проектування та розробка інформаційних систем та принципи моделювання систем обробки метеорологічної інформації.

В результаті вивчення дисципліни студент повинен:

*Знати:*

- сучасних підходів до засобів та методів проектування, експлуатації та дослідження інформаційно-вимірювальних систем, систем моніторингу та процесів що в них відбуваються;
- основи побудови моделей та системного підходу в моделюванні;
- методи математичного моделювання на основі використання обчислювальної техніки;
- принципів побудови й роботи елементів сучасних радіоелектронних апаратури;
- типових схемотехнічних рішень щодо схем на операційних підсилювачах і логічних елементах;
- використовувати комп’ютерне моделювання електронних елементів і пристроїв для дослідження їхньої роботи.

*Вміти:*

- проектування та розробка інформаційно-вимірювальних систем моніторингу навколишнього середовища;

- аналізувати роботу інформаційно–вимірювальних систем моніторингу навколишнього середовища;
- використовувати основні методи аналізу й синтезу електронних систем обробки інформації.

Вивчення даної дисципліни базується на знаннях, які одержані з дисциплін “Фізика”, “Вища математика”, “Основи електроніки, автоматики та цифрової техніки”, “Фізика атмосфери”.

Мета методичних вказівок – надати студентам допомогу у вирішенні практичних задач при проектування та розробка інформаційних систем метеорологічних вимірювань.

У даних методичних вказівках приводяться теоретичні відомості, необхідні для виконання лабораторних робіт, а також мета, завдання і порядок виконання кожної роботи. Приведені також вимоги до оформлення звіту з кожної лабораторної роботи.

При виконанні лабораторної роботи кожен студент відповідає на теоретичні питання і, потім, після одержання допуску, практично виконує роботу.

Під час проведення лабораторних робіт проводиться модульний контроль, який складається з одного практичного модуля. Максимальна оцінка ЗМ-П1 – 50 балів.

Критерії оцінювання в балах практичних модулів:

Визначення	Бали ЗМ-П1
відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок	46-50
вище середнього рівня з кількома помилками	42-45
в загальному правильна робота з певною кількістю грубих помилок	38-41
непогано, але зі значною кількістю помилок	35-37
виконання задовольняє мінімальні критерії	12-34
виконання не задовольняє мінімальні критерії	1-11

Збірник методичних вказівок складається з 5 лабораторних робіт.

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Карлащук В.И. Электронная работа на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение. М.: Солон-Р, 1999, 500с.
2. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС. М.: Мир, 1985, 573с.
3. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/Под ред. В.А. Лапунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320с.



4. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для высш. Учеб. Заведений/Под редакцией Г.Г. Раннева. – М.: издательский центр «Акадкмия», 2006. – 512 с.
5. Т.С. Рахтор Цифровые измерения. Методы и схемотехник. – М.: Техносфера, 2004. – 376 с.
6. Лімонов О.С. Цифрова обробка сигналів: Конспект лекцій. – Вид-во “ТЕС”, Одеса, 2011. – 115 с

## Лабораторна робота №1

### «Придбання навичок роботи з програмою моделювання Electronics Workbench»

**Мета роботи** – ознайомитися з програмою Electronics Workbench і навчитися моделювати та аналізувати електричні схеми.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** Під час проведення лабораторної роботи студент повинен:

**знати:**

- призначення й класифікації елементів і приладів технічної електроніки;
- принципи побудови й роботи елементів сучасних радіоелектронних апаратів;

**уміти:**

- вибирати й використати базові елементи радіоелектронних апаратів;
- використовувати основні методи аналізу й синтезу електронних систем обробки інформації.

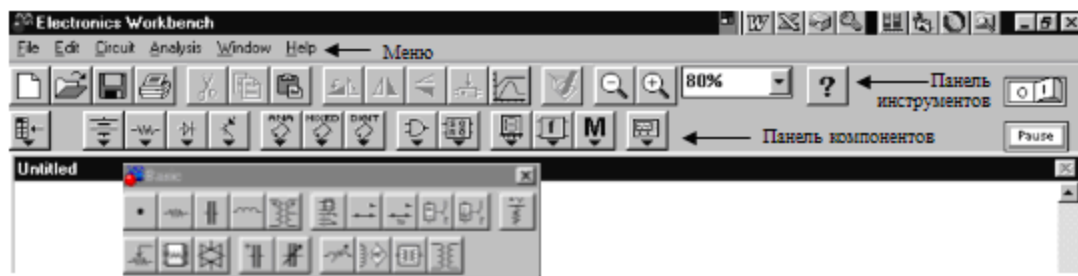
**Теоретичні відомості.** Програма *Electronics Workbench (EWB)* призначена для моделювання аналогових, цифрових і цифро аналогових схем різного ступеня складності. Наявні в програмі бібліотеки містять у собі великий набір широко розповсюджених електронних компонентів (резистори, конденсатори, діоди, транзистори, мікросхеми та ін.).

Наявність приладів дозволяє робити виміри різних величин, задавати вхідні впливи, будувати графіки. Всі прилади (амперметр, вольтметр, осцилограф і ін.) зображуються в максимально наближеному до реального виду, тому працювати з ними просто й зручно.

У загальному випадку процес створення моделі електричної схеми починається з розміщення на робочому полі електронних компонентів з бібліотек програми. Для відкриття каталогу потрібної бібліотеки необхідно підвести курсор миші до відповідної піктограми на панелі вибору компонентів і інструментів і клацнути ліву клавішу миші. При цьому відкриється вікно, із зображенням наявних, в обраній піктограмі, електронних компонентів або вимірювальних приладів (рис. 1.1). На рис. 1.1 відкрите поле пасивних компонентів.

Після вибору необхідного компонента й наведення на його зображення стрілки миші, необхідно натиснути ліву клавiшу миші й, не відпускаючи її, перетягнути зображення елемента на робоче поле.

Елемент при цьому буде виділений червоними кольорами, що свiдчить про його активний стан. Для зняття активного стану, необхідно один раз натиснути лівою клавiшею миші, забравши курсор із зображення елемента. Для створення активного стану елемента, необхідно навести на нього курсор миші, і зробити два натискання лівою клавiшею. В активному стані елемента, при підведенні курсору миші знизу зображення елемента, виникає зображення руки із вказівним пальцем, спрямованим на елемент. У цій ситуації дворазове натискання лівої клавiші миші приводить до розкриття діалогового вікна параметрів елемента, з можливістю їхнього детального редагування для деяких елементів (клавiша Edit).



## Робоче поле

Рисунок 1.1 – Панель електронних компонентів

Після розміщення необхідних компонентів виробляється з'єднання їхніх виводів провідниками. При цьому необхідно враховувати, що до виводу компонента можна підключити тільки один провідник. Для виконання підключення (з'єднання) курсор миші підводять до виводу компонента й, після появи чорної крапки, натискається ліва клавiша миші й провідник, що з'являється при цьому, простягається до виводу іншого компонента, до появи на ньому такої ж чорної крапки, після чого кнопка миші відпускається й з'єднання готове. При необхідності з'єднання більше двох виводів, з бібліотеки компонентів використовується чорна крапка (символ з'єднання), що переноситься

на раніше встановлений провідник. Після установки точки до неї можна підключити ще два провідники. У загальному випадку точка має 4 входи, під кутами  $90^{\circ}$  друг до друга. Якщо з'єднання потрібно розірвати, курсор підводить до одного з виводу компонента або точки з'єднання, і, з появою зображення чорної точки, натискається ліва клавіша миші, провідник ставиться на вільне місце робочого поля, після чого клавіша відпускається й з'єднання розірване.

Слід відзначити, що прокладка сполучних провідників виробляється автоматично, за ортогональними напрямками. Якщо необхідно перемістити окремих сегмент провідника, до нього підводять курсор, натискається ліва клавіша й, після появи у вертикальній або горизонтальній площині подвійного курсору, здійснюються потрібні переміщення. Підключення до схеми контрольно-вимірювальних приладів робиться аналогічно.

### **Система меню програми EWB**

Основну, центральну частину вікна програми займає робоча область, в якій збирається й тестується електронна схема. Над робочою областю перебуває панель кнопок. За допомогою кнопок, наявних на цій панелі, можна змінювати вміст вікна набору компонентів. Зображення на кнопках показують, які типи компонентів з'являться в наборі при натисканні відповідної кнопки. Праворуч у цьому ж ряді розташований перемикач, що дозволяє включати й виключати зібрану схему. Перемикач здійснюється за допомогою натискання мишею на перемикачі. Над іконками приладів розташовано меню. Головне меню програми (рис. 1.2) містить у собі:



Рисунок 1.2 – Меню програми EWB

### **Меню File**

Меню *File* (рис. 1.3) призначений для завантаження й запису файлів, отримання твердої копії обраних для печатки складових частин схеми, а також для імпорту/експорту файлів у форматах інших систем моделювання й програм розробки друкованих плат.

Перші чотири команди цього меню: *New (Ctrl+N)*, *Open (Ctrl+O)*, *Save (Ctrl+S)*, *Save As...* – типові для Windows команди роботи з файлами й тому пояснення не мають потреби.

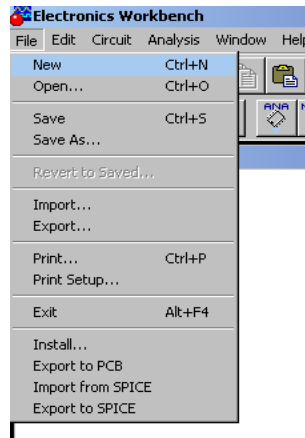


Рисунок 1.3 – Меню File.

Інші команди мають наступне призначення:

- *Revert to Saved* – стирання всіх змін, внесених у поточному сеансі редагування й відновлення схеми в первісному вигляді;
- *Print... (Ctrl+P)* – вибір даних для виводу на принтер;
- *Print Setup...* – налаштування принтера;
- *Exit (Alt+F4)* – вихід з програми;
- *Install...* – установка додаткових програм.
- *Import/Export* – вставка з/вставка у файл зі схемою іншого формату.

### Меню Edit

Меню Edit (рис. 1.4) дозволяє виконувати команди редагування схем і копіювання екрана:

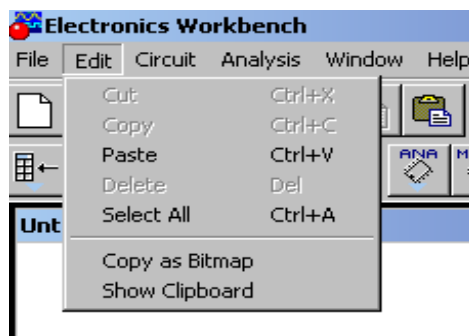


Рисунок 1.4 – Меню Edit

*Призначення команд:*

- *Cut (Ctrl+X)* – стирання (вирізання) виділеної частини схеми зі збереженням її в буфері обміну (Clipboard). Виділені компоненти забарвлюються в червоний колір;

- *Copy (Ctrl+C)* – копіювання виділеної частини схеми в буфер обміну;

- *Paste (Ctrl+V)* – вставка вмісту буфера обміну на робоче поле програми;

- *Delete (Del)* – стирання виділеної частини схеми;

- *Select All (Ctrl+A)* – виділення всієї схеми;

- *Copy as Bitmap (Ctrl+I)* – команда перетворення курсору миші в хрестик, яким за правилом прямокутника можна виділити потрібну частину екрана, після відпускання лівої кнопки миші виділена частина копіюється в буфер обміну, а далі його вміст може бути імпортований у будь-який додаток Windows. Копіювання всього екрана проводиться натисканням клавіші *Print Screen*: копіювання активної в цей момент частини екрана, наприклад, діалогового вікна - комбінацією *Alt+Print Screen*. Команда дуже зручна при підготовці звітів з моделювання, наприклад, при оформленні лабораторних робіт;

*Show Clipboard* - показати вміст буфера обміну.

## **Меню Circuit**

Меню *Circuit* (рис. 1.5) використовується для підготовки схем до роботи.

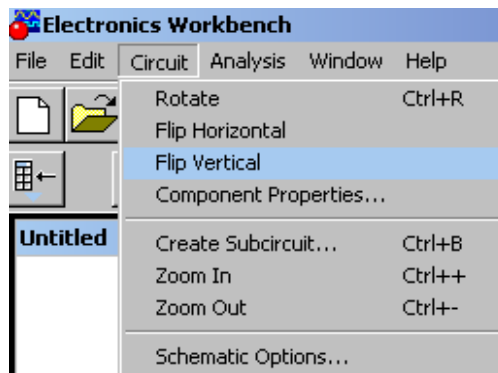


Рисунок 1.5 – Меню Circuit.

### Призначення команд:

- *Rotate (Ctrl+R)* – обертання виділеного компонента; більшість компонентів повертаються проти часової стрілки на 90° при кожному виконанні команди; для вимірювальних приладів (амперметр, вольтметр і ін.) міняються місцями клеми підключення. Команда найчастіше використовується при підготовці схем. У готовій схемі користуватися командою недоцільно, оскільки це приводить до плутанини – у такому випадку компоненти потрібно спочатку відключити від приєднаних ланцюгів, а потім обертати;

- *Flip Horizontal* – повороти схеми в горизонтальному напрямку;

- *Flip Vertical* – повороти схеми у вертикальному напрямку;

- *Component Properties* – виклик меню властивостей елемента.

- *Creat Subcircuit* – перетворення попередньо виділеної частини схеми в підсхему. Виділена частина схеми повинна бути розташована таким чином, щоб у виділену область не потрапили зайві проведення й компоненти;

- *Zoom In* – збільшення масштабу зображення виділеної підсхеми;

- *Zoom Out* – зменшення масштабу зображення виділеної підсхеми;

- *Schematic Options* – виклик вікна, у якому виставляються наступні параметри відображення схеми на екран:

1) підменю *Grid – Show grid* – показати сітку для зручності рисування схеми (за замовчуванням ця опція виключена). Опція активна тільки при включеній опції *Use grid* (використати сітку);

2) підменю *Show/Hide – Show labels* – показати позиційні позначення компонентів, наприклад, C1, C2 для конденсаторів; – *Show models* – показати імена моделей компонентів, наприклад, типів транзисторів; – *Show values* – показати номінали компонентів, наприклад, опір резистора;

3) підменю *Fonts – Set label font* – вибір типу шрифту, розміру і написання для міток елементів; *Set value font* – вибір типу шрифту, розміру і написання для значень параметрів елементів;

4) підменю *Wiring* – прокладка й організація взаємного з'єднання провідників, автоматичне видалення не використаних провідників;

5) підменю *Printing* – масштабування інформації, виводиться на принтер.

### **Меню Analysis**

Перші три команди – *Activate (CTRL+G)*, *Stop (CTRL+T)*, *Pause (F9)* призначені для запуску на аналіз зібраної схеми, зупинки аналізу, паузи в ньому (рис. 1.6).

- *Analysis Options (CTRL+Y)* – набір команд для установки параметрів моделювання;
- *DC Operating Point* – установка для розрахунку режиму за постійним струмом (статистичний режим);
- *AC Frequency* – розрахунки частотних характеристик;
- *Transient* – налаштування параметрів режиму аналізу перехідних процесів;
- *Fourier* – проведення спектрального аналізу Фур'є;
- *Monte Carlo* – статистичний аналіз методом Монте-Карло;
- *Display Graphs* – цією командою на екран викликаються результати виконання моделювання. Якщо виконувалося кілька команд моделювання, то в даному вікні вони будуть накопичуватися й відображатися у вигляді окремих закладок. Одночасно вивід інформації проходить також і на основні вимірювань приладів.

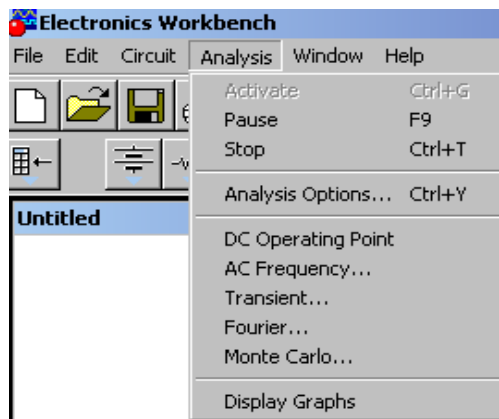


Рисунок 1.6 – Меню Analysis.

### **Меню Window**

Меню Window містить наступні команди (рис. 1.7):

- *Arrange (CTRL+W)* – упорядкування інформації в робочому вікні EXCEL шляхом перезапису екрана, при цьому виправляються переключування зображень компонентів і провідників;
- *Circuit* – вивід схеми на передній план;
- *Description (CTRL+D)* – вивід на передній план опису схеми, якщо він є, або вікно-ярлик для його підготовки (тільки англійською мовою).



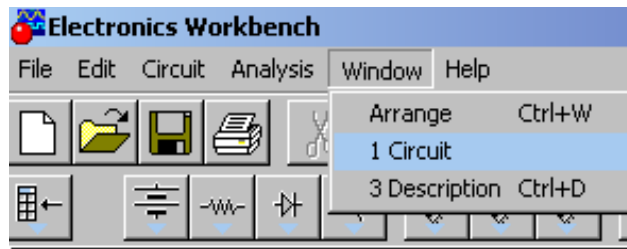


Рисунок 1.7 - Меню Window.

### Меню Help

Меню Help побудовано стандартним для Windows способом. Воно містить загальні відомості про всі команди, бібліотечні компоненти й вимірювальні прилади, а також відомості про саму програму.

Відзначимо, що для отримання довідки за бібліотечними компонентами необхідно відзначити на схемі натисканням миші (він висвітиться червоним кольором) і потім натиснути клавішу F1.

### Панель інструментів

На рис. 1.8 зображена панель інструментів програми EWB. Вона містить дві основні частини.



Рисунок 1.8 – Панель інструментів.

Верхня лінійка іконок панелі являє собою швидкий доступ до деяких пунктів меню програми. Перелічимо їх послідовно:

- створити нову сторінку;
- відкрити папку;
- зберегти файл;
- роздрукувати дану сторінку;
- вирізати;
- копіювати в буфер обміну;
- вставити з буфера обміну;
- повернути на 90° проти часової стрілки;
- розгорнути за горизонталлю;

- розгорнути за вертикаллю;
- створити підсхему;
- показати результати виконання моделювання схеми;
- показати меню властивостей елемента схеми;
- зменшити масштаб;
- збільшити масштаб;
- вибрати масштаб відображення сторінки;
- допомога.

Нижня лінійка іконок являє собою набір бібліотечних компонентів програми. Розглянемо деякі з них, які будуть потрібні нам для подальшого виконання лабораторних робіт.

### **Компоненти Electronics Workbench**

Для операцій з компонентами призначена панель компонентів, що складається з піктограм полів компонентів. Натисканням мишею на одній з піктограм полів компонентів можна відкрити відповідне поле компонентів.

Всі компоненти можна умовно розбити на наступні групи:

- базові компоненти;
- джерела;
- лінійні компоненти;
- ключі;
- нелінійні компоненти;
- індикатори;
- логічні компоненти;
- вузли комбінаційного типу;
- вузли послідовного типу;
- гібридні компоненти.

Розглянемо основні компоненти, які необхідні для виконання лабораторних робіт.

### **Базові елементи**

#### **Заземлення**



Компонент "заземлення" має нульову напругу й у такий спосіб забезпечує вихідну точку для відліку потенціалів.

Не всі схеми мають потребу в заземленні для моделювання, однак, будь-яка схема, що містить:

- операційний підсилювач;
- трансформатор;

- кероване джерело;
- осцилограф;

повинна бути обов'язково заземлена, інакше прилади не будуть робити виміри або їхні показання виявляться неправильними.

### **З'єднуючий вузол** ●

Вузол застосовується для з'єднання провідників і створення контрольних точок. До кожного вузла може приєднуватися не більше чотирьох провідників.

Після того, як схема зібрана, можна вставити додаткові вузли для підключення приладів.

### **Джерела**

Всі джерела в EWB ідеальні. Внутрішній опір ідеального джерела напруги дорівнює нулю, тому його вихідна напруга не залежить від навантаження. Ідеальне джерело струму має нескінченно великий внутрішній опір, тому його струм не залежить від опору навантаження.



### **Джерела постійної напруги**

Електрорушійна сила джерела постійної напруги або батареї виміряється у Вольтах і задаються похідними величинами (від мкВ до кВ). Короткою жирною рисою в зображенні батареї позначається вивід, що має негативний потенціал стосовно іншого виводу.

Для завдання параметрів джерела напруги на робочому полі необхідно натиснути на нього двічі мишкою. З'явиться діалогове вікно Battery Properties (рис. 1.9). Після установки основних параметрів натисніть на кнопку ОК.

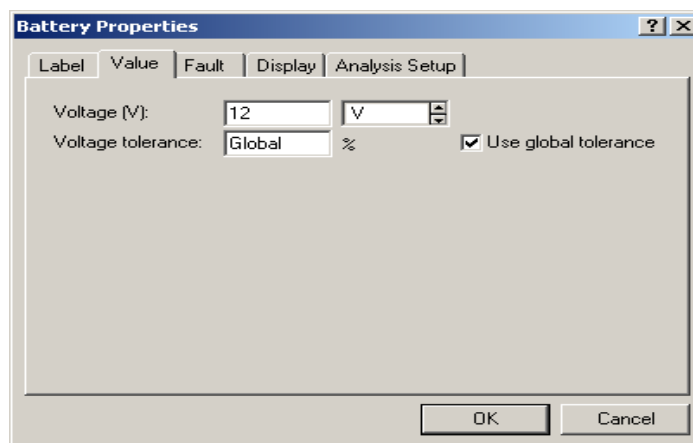


Рисунок 1.9 – Параметри джерела постійної напруги.

### Джерело напруги +5В



Використовуючи це джерело напруги, можна встановлювати фіксований потенціал вузла 5 В або рівень логічної одиниці. Джерело застосовується для моделювання цифрових мікросхем.

### Джерело сигналу



За допомогою цього джерела встановлюють рівень логічної одиниці у вузлі схеми.

### Генератор тактових імпульсів



Генератор виробляє послідовність прямокутних імпульсів. Можна регулювати амплітуду імпульсів, коефіцієнт заповнення та частоту проходження імпульсів. Відлік амплітуди імпульсів генератора виробляється від виводу, протилежного виводу "+".

### Лінійні елементи

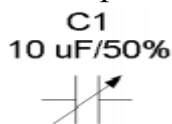
#### Резистор



Опір резистора вимірюється в Омах і задається похідними величинами (від Ом до МОм). Для завдання параметрів резистора на робочому полі необхідно натиснути на нього двічі мишею. З'явиться діалогове вікно Resistor Properties (рис. 1.10).

Після установки основних параметрів натисніть на кнопку ОК.

#### Конденсатори



Аналогічно резисторам, конденсатори також широко поширені в електронній техніці. В EWB конденсатори представлені трьома типами: постійні (охоплюють практично всі конденсатори), електролітичні. Значення ємності для всіх типів може бути встановлене у Ф.

Принцип дії конденсаторів заснований на здатності накопичувати на обкладках електричні заряди при додатку між ними напруги. Кількісною мірою здатності накопичувати електричні заряди є ємність конденсатора. У найпростішому випадку конденсатор являє собою дві металеві пластини, розділені шаром діелектрика.

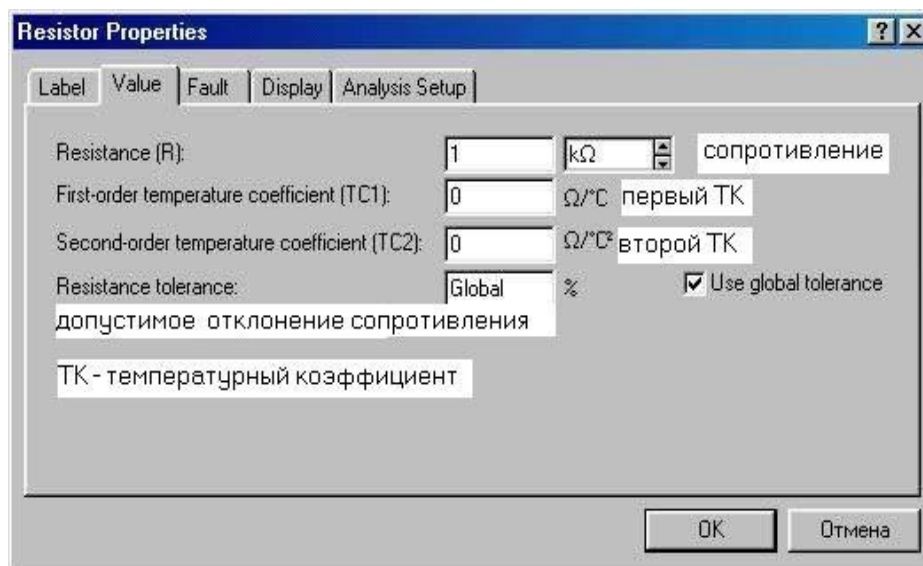
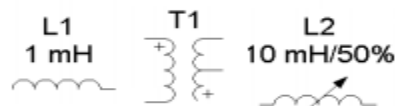


Рисунок 1.10 – Параметри резисторів

### Індуктивні елементи



До індуктивних елементів належить котушка індуктивності, підстроювана котушка індуктивності й трансформатор.

Котушки індуктивності мають властивість чинити реактивний опір змінному струму при незначному опорі постійному струму. Разом з конденсаторами вони використовуються для створення фільтрів, що здійснюють частотну селекцію електричних сигналів, а так само для створення елементів затримки сигналів і запам'ятовувальних елементів, здійснення зв'язку між ланцюгами через магнітний потік і т.д. На відміну від резисторів і конденсаторів вони не є стандартизованими виробами, а виготовляються для конкретної мети і мають такі параметри, які необхідні для здійснення тих або інших перетворень електричних сигналів, струмів і напруги.

Параметри котушок індуктивності й підстроюваної індуктивності, що задаються за допомогою діалогових вікон, аналогічні вікнам для резисторів і конденсаторів (використовується клавіша <L>). У діалоговому вікні установки параметрів лінійних трансформаторів задаються: коефіцієнт трансформації N, індуктивність розсіювання LE, індуктивність первинної обмотки LM, опір первинної (RP) і вторинної (RS) обмотки.

Доступ до вікна завдання параметрів трансформатора стає можливим після натискання на кнопку Edit діалогового вікна Transformer Properties.

[R]1 kΩ/50%



## Змінний резистор

Положення движка змінного резистора встановлюється за допомогою спеціального елемента – стрілки-движка. У діалоговому вікні, що з'являється після подвійного натискання мишею на зображенні резистора, можна встановити опір, початкове положення движка (у відсотках) і крок збільшення (також у відсотках). Є можливість змінювати положення движка за допомогою клавіш-ключів.

*Використовувані клавіші-ключі:*

- букви від А до Z;
- цифри від 0 до 9;
- клавіша Enter на клавіатурі;
- клавіша пробіл [Space].

Для зміни положення движка необхідно натиснути клавішу-ключ. Для збільшення значення положення движка необхідно одночасно нажати [Shift] і клавішу-ключ, для зменшення - клавішу-ключа.

*Приклад: движок встановлений в положенні 45%, крок збільшення - 5%, клавіша-ключ - пробіл [Space]. Натисканням клавіші [Space] положення движка стає рівним 40%. При кожному наступному натисканні на клавішу [Space] значення зменшується на 5%. Якщо нажати [Space] + [Shift], то положення движка потенціометра збільшиться на 5%.*



## Ключ, керований клавішею

Ключі можуть бути замкнуті або розімкнуті за допомогою управляючих клавіш на клавіатурі. Ім'я управляючої клавіші можна ввести з клавіатури в діалоговому вікні, що з'являється після подвійного натискання мишею на зображенні ключа.

*Приклад: якщо необхідно, щоб стан ключа змінювався клавішею 'пробіл' [Space], то варто ввести слово «Space» у діалогове вікно й нажати ОК.*

*Використовувані клавіші-ключі:*

- букви від А до Z;
- цифри від 0 до 9;
- клавіша Enter на клавіатурі;
- клавіша пробіл [Space].

Слід зазначити, що для різних елементів необхідно використати різні клавіші-ключі.

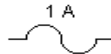
## Нелінійні елементи

10 W/12 V



### Лампа накаливання

Лампа накаливання – елемент, що перетворить електроенергію у світлову енергію. Вона характеризується двома параметрами: максимальною потужністю  $P_{\max}$  і максимальною напругою  $V_{\max}$ . Максимальна потужність може мати величину в діапазоні від мВт до кВт, максимальна напруга – в діапазоні від мВ до кВ. При напрузі на лампі більшій  $V_{\max}$  (у цей момент потужність, що виділяється в лампі, перевищує  $P_{\max}$ ) вона перегорає. При цьому змінюється зображення лампи (обривається нитка) і провідність її дорівнює нулю.



### Запобіжник

Запобіжник розриває коло, якщо струм у ній перевищує максимальний струм  $I_{\max}$ . Значення  $I_{\max}$  може мати величину в діапазоні від мА до кА. У схемах, де використовується джерело змінного струму,  $I_{\max}$  є максимально миттєвим, а не діючим значенням струму.

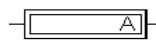
## Індикатори й вимірювальні прилади



### Гудок

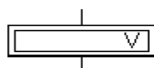
Гудок призначений для видачі звукового сигналу на спікер комп'ютера. Після установки елемента на робоче поле, можна задати основні параметри гудка. Для цього необхідно натиснути двічі на елемент і з'явиться діалогове вікно налаштування параметрів.

### Амперметр



Амперметр призначений для вимірювання струму в колі електричної схеми. Внутрішній опір амперметра дорівнює нулю. Після установки елемента на робоче поле можна задати основні параметри амперметра. Для цього необхідно натиснути двічі на елемент і з'явиться діалогове вікно налаштування параметрів.

### Вольтметр



Вольтметр призначений для виміру напруги в електричному коліі. Внутрішній опір вольтметра дорівнює нескінченності. Після установки елемента на робоче поле можна задати основні параметри вольтметра. Для цього необхідно натиснути двічі на елемент і з'явиться діалогове вікно налаштування параметрів.

### **Устаткування й апаратура:**

Комп'ютер, програми комп'ютерного моделювання Electronics Workbench.

### **Порядок виконання роботи**

1. Зібрати електричну схему з резисторами, зображену на рис. 1.11.
2. Поміняти положення движка змінного резистора за допомогою клавішей-ключа.
3. Записати показання амперметрів та вольтметра для 8 позицій движка.
4. Зібрати електричну схему включення лампи (рис. 1.12).
5. Підібрати номінали елементів (джерело напруги, резистор) для лампи 100mw, 12v і пояснити свій вибір, використовуючи показання вольтметра та амперметра.
6. Визначити номінали джерела напруги й резистора при яких лампа перегорає.
7. Зібрати електричну схему включення гудка (рис. 1.13).
8. Підібрати номінали елементів (джерело напруги, гудок і резистор) і пояснити свій вибір, використовуючи показання вольтметра й амперметра.

### **Зміст звіту**

1. Постановка завдання.
2. Електричні схеми, показання приладів і параметри підібраних елементів.
3. Опис елементів, використаних в електричних схемах.
4. Результати дослідження.



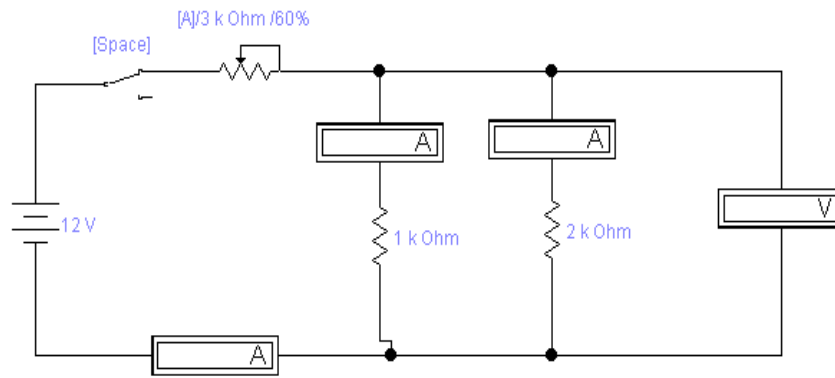


Рисунок 1.11 – Електрична схема з резисторами.

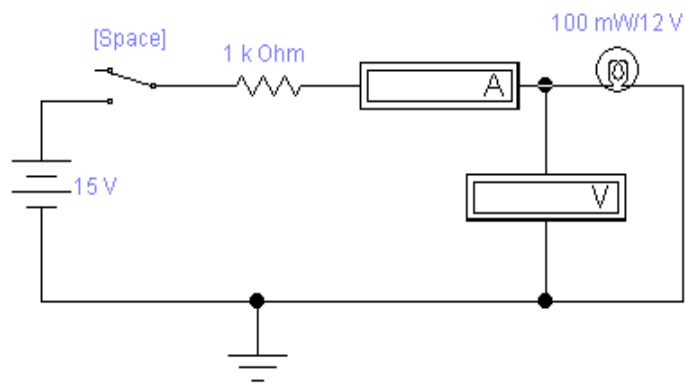


Рисунок 1.12 – Електрична схема включення лампи.

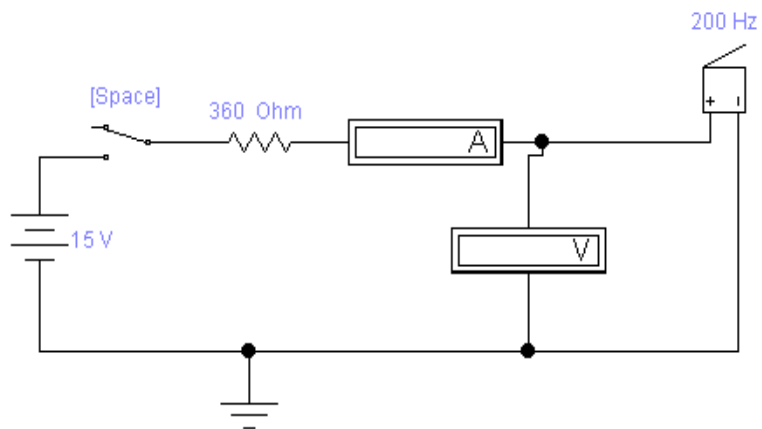


Рисунок 1.13 – Електрична схема включення гудка.

***Відповіді усно на наступні питання***

1. Призначення програми Electronics Workbench.
2. Із чого починається процес створення моделі електричної схеми?
3. Як установити електронний компонент на робоче поле?
4. Скільки провідників можна підключити до виводу компонента?
5. Для чого призначений компонент "заземлення"?
6. Чому дорівнює внутрішній опір ідеального джерела напруги?
7. Чому дорівнює внутрішній опір ідеального джерела струму?
8. У яких одиницях виміряється опір резистора?
9. Для чого призначені резистори?
10. Який елемент, перетворить електроенергію у світлову енергію?
11. Що робить запобіжник, якщо струм у колі перевищує максимальний струм?
12. Для чого призначений амперметр?
13. Для чого призначений вольтметр?
14. Чому дорівнює внутрішній опір вольтметра?
15. Чому дорівнює внутрішній опір амперметра?

## Лабораторних робіт № 2

### «Дослідження лінійних електричних ланцюгів постійного струму»

Мета роботи: дослідження простих лінійних електричних ланцюгів постійного струму для перевірки законів Ома і Кірхгофа, а також набуття практичних навичок у складанні електричних ланцюгів постійного струму. Складання моделей у програмі Electronics Workbench і їх дослідження і аналіз.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** Під час виконання лабораторної роботи студент повинен

**знати:**

- призначення й класифікації елементів і приладів технічної електроніки пакета Electronics Workbench;
- принципи побудови й роботи елементів сучасних радіоелектронних апаратур;
- правила використання та з'єднання математичних блоків;

**вміти:**

- виконувати ручне введення та конструювання інструментальних засобів пакета Electronics Workbench;
- провести дослідження основних характеристик радіоелектронних блоків та змінювати їх параметрів;
- досліджувати та вимірювати характеристики сигналів, синтезувати за допомогою блоків Electronics Workbench;
- провести дослідження результату вимірювань і обчислень та внести результати в таблицю та графіки;
- збереження інформації моделі пакета Electronics Workbench;

**Теоретичні положення.**

Для будь-якої гілки електричного кола виконується закон Ома,

$$R = U/I,$$

де  $R$  - електричний опір постійному струму - скалярна величина, що дорівнює відношенню постійної напруги на ділянці пасивної електричного кола ( $U$ ) до постійного струму в ньому ( $I$ ), при відсутності на ділянці Електрорушійна сила (ЕРС).

Розглянемо зв'язок між струмом і напругою в загальному випадку: для гілки з послідовним з'єднанням резистора і джерела ЕРС (рис. 2.1).

Падіння напруги на кінцях ділянки а-в з урахуванням того, що напряму падіння напруги і ЕРС завжди протилежні, можна уявити як:

$$U_{ав} = U_{аб} + U_{ба} = I \cdot R - E.$$

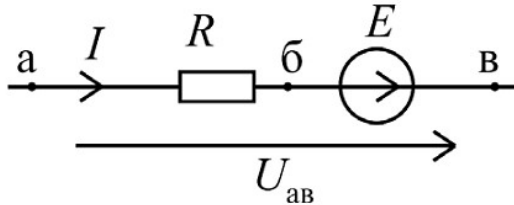


Рисунок 2.1 – Послідовним з'єднанням резистора і джерела.

$$I = \frac{U_{ав} - E}{R}$$

Якщо змінити напрямок дії ЕРС на протилежне, то у виразі для напруги  $U_{ав}$  зміниться знак при  $E$ .

Для будь-якої електричного кола виконуються **закони Кірхгофа**. Вони є однією з форм закону збереження енергії і відносяться до фундаментальних законів природи.

При складанні рівнянь за законами Кірхгофа (рівнянь рівноваги) необхідно спочатку вибрати умовно позитивні напрямки струмів в гілках. Якщо в результаті розрахунку якісь струми вийдуть негативними, це говорить про те, що струми спрямовані протилежно обраним напрямом.

*Перший закон Кірхгофа* виконується для будь-якого вузла і є наслідком принципу безперервності електричного струму. Фізичний сенс першого закону Кірхгофа полягає в тому, що у вузлі електричний заряд не накопичується і не витрачається.

Можна дати два формулювання першого закону Кірхгофа.

- 1) *Алгебраїчна сума струмів в будь-якому вузлі електричного кола дорівнює нулю:*

$$\sum_{k=1}^n \pm I_k = 0,$$

де  $n$  - кількість гілок, що сходяться у вузлі.

Слово «алгебраїчна» позначає, що струми, спрямовані до вузла і від нього, слід брати з різними знаками. В електротехніці прийнято струми, спрямовані до вузла, брати зі знаком плюс, а струми, спрямовані від вузла - зі знаком мінус. Наприклад, рівняння за першим законом Кірхгофа для схеми (рис. 2.2) у вузлі «а» має такий вигляд:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

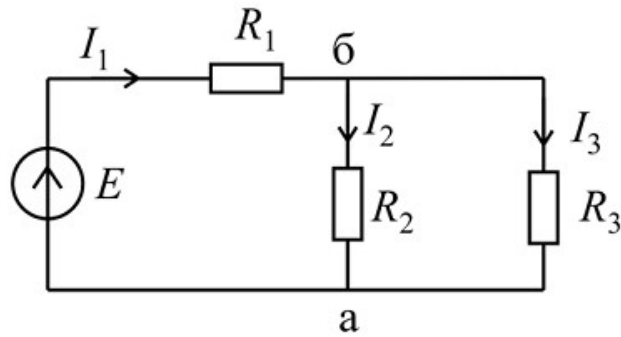


Рисунок 2.2 – Схема за першим законом Кірхгофа.

2) Сума струмів, спрямованих до вузла електричного кола, дорівнює сумі струмів, спрямованих від нього:

$$\sum_{k=1}^m I_k = \sum_{k=1}^{n-m} I_k,$$

де  $n$  - кількість струмів, спрямованих до вузла.

Запишемо другий варіант рівняння за першим законом Кірхгофа для схеми рис. 2.2 в вузлі «а»:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Другий закон Кірхгофа виконується для будь-якого контуру електричного кола. Можна дати два формулювання другого закону Кірхгофа.

1) Алгебраїчна сума напруг у всіх гілках будь-якого контуру електричного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \pm(U_k - E_k) = 0,$$

де  $n$  - кількість гілок в контурі;  $\pm(U_k - E_k)$  - напруга на  $k$ -й галузі контуру.

2) Алгебраїчна сума падінь напруги на пасивних ділянках будь-якого контуру електричного кола дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС в цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^p \pm U_k = \sum_{k=1}^q E_k,$$

де  $p$  - кількість пасивних ділянку в контурі;  $q$  - кількість джерел ЕРС в контурі.

При написанні рівнянь за другим законом Кірхгофа слід дотримуватися наступного правила:

«Складові беруться зі знаком плюс, якщо напрямок обходу контура збігається з напрямком струму на ділянці ланцюга (з напрямком ЕРС) і зі знаком мінус якщо інакше».

Запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа (див. Рис. 2.2) для зовнішнього контуру схеми, рухаючись в ньому за годинниковою стрілкою, по першій і другій формулюванні відповідно:

$$I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3 - E = 0 :$$

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = E.$$

### Приклади використання законів Кірхгофа

Для визначення струмів в електричній схемі використовувати правило перетворення паралельно і послідовно з'єднаних опорів можна не завжди.

Наприклад, для ланцюга представленої на рис. 2.3, це заважають зробити ЕДС  $E_1$ ,  $E_2$  і  $E_3$ . У таких випадках для визначення струмів використовують перший і другий закони Кірхгофа. Число рівнянь, необхідних для визначення струмів, дорівнює числу гілок.

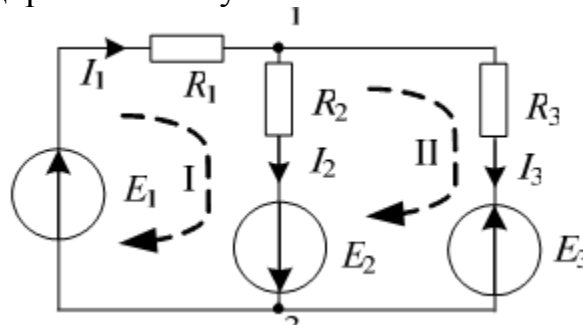


Рисунок 2.3 – Схема ланцюга за першим законом Кірхгофа.

Число незалежних рівнянь, яких можна записати за першим законом Кірхгофа, так само  $Y-1$ , де  $Y$  - число вузлів у схемі. Решта відсутні рівняння, які потрібні для завершення системи, записують за другим законом Кірхгофа. Розглянемо як приклад схему, представлену на рисунку 2.3, припускаючи, що всі опори і ЕРС нам відомі.

Схема має три гілки, отже, необхідно записати три рівняння. Записуємо одне рівняння за першим законом Кірхгофа. Наприклад, для першого вузла:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

Два відсутніх рівняння записуємо за другим законом Кірхгофа для першого і другого контурів відповідно:

$$\begin{cases} I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = E_1 + E_2 \\ I_3 \cdot R_3 - I_2 \cdot R_2 = E_2 - E_3 \end{cases}$$

Запишемо рівняння у вигляді системи рівнянь, попередньо правильно згрупувавши коефіцієнти при невідомих, в результаті отримуємо формальне рішення:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 & R_2 & 0 \\ 0 & -R_2 & R_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 + E_2 \\ -E_2 - E_3 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} \mathbf{I} = \mathbf{B} \quad \mathbf{I} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}.$$

Для визначення струмів в гілках ланцюга I використовується матричний аналіз для вирішення системи рівнянь.

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix} \quad \mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \cdot \tilde{\mathbf{A}}^T$$

$\tilde{\mathbf{A}}$  - союзна (приєднана) матриця:

$$\det(\mathbf{A}) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{23} \end{vmatrix} = \left( a_{11} \cdot a_{22} \cdot a_{33} + a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31} + a_{13} \cdot a_{21} \cdot a_{32} - a_{13} \cdot a_{22} \cdot a_{31} - a_{11} \cdot a_{23} \cdot a_{32} - a_{12} \cdot a_{21} \cdot a_{33} \right)$$

Алгебраїчним доповненням елемента  $a_{ij}$  квадратної матриці називають мінор  $(n-1)$ -ого порядку, який виходить з матриці  $A$ , викреслюванням елементів її  $i$ -го рядка і  $j$ -ого стовпця, помножений на  $(-1)^{i+j}$

Алгебраїчне доповнення елемента  $a_{ij}$  позначається як  $A_{ij} = (-1)^{i+j} \cdot M_{ij}$ ,

алгебраїчне доповнення елемента  $a_{12}$  є:

$$\mathbf{A}_{12} = (-1)^{1+2} \cdot \mathbf{M}_{12} = (-1) \cdot \begin{vmatrix} a_{21} & a_{23} \\ a_{31} & a_{33} \end{vmatrix} = (-1) \cdot (a_{21} \cdot a_{33} - a_{23} \cdot a_{31})$$

$$\tilde{\mathbf{A}}^T = \begin{vmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} & \mathbf{A}_{13} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} & \mathbf{A}_{23} \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{A}_{23} & \mathbf{A}_{33} \end{vmatrix}^T$$

Розглянемо приклад з числовими даними з рішенням в програмі Mathcad. Система лінійних рівнянь  $\mathbf{A} \mathbf{I} = \mathbf{B}$  може бути вирішена в MathCad аналітично в матричній формі через звернення матриці. Так, для вирішення систем лінійних рівнянь введена функція `lsolve (M, V)`, яка працює швидше і в деяких випадках дає більш високу точність. На рис. 2.4 показаний приклад використання матричного рішення системи рівнянь і функції `lsolve`, до аргументів вихідних даних.

### Исходные данные электрической цепи

$$R_1 := 10 \quad R_2 := 15 \quad R_3 := 20$$

$$E_1 := 5 \quad E_2 := 10 \quad E_3 := 8$$

### Представление системы уравнения закона Киргофа в матричном виде

$$A := \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R_1 & R_2 & 0 \\ 0 & -R_2 & R_3 \end{pmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} 0 \\ E_1 + E_2 \\ -E_2 - E_3 \end{pmatrix}$$

### Решение системы уравнений, полученное значений тока в амперах

$$I := A^{-1} \cdot B = \begin{pmatrix} 0.392 \\ 0.738 \\ -0.346 \end{pmatrix} \quad IS := \text{Isolve}(A, B) = \begin{pmatrix} 0.392 \\ 0.738 \\ -0.346 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.4 – Приклад використання матричного рішення системи рівнянь.

### Запитання для самоперевірки

1. Запишіть закон Ома для заданої ділянки ланцюга.
2. Запишіть другий закон Кірхгофа для заданої електричного кола.
3. Запишіть перший закон Кірхгофа для заданої електричного кола.
4. Які існують види з'єднань елементів електричного кола і яким чином знаходиться еквівалентний опір ланцюга щодо заданих точок?
5. Скільки рівнянь необхідно записати по першому і другому законам Кірхгофа при розрахунку складної електричного кола за методом законів Кірхгофа?

### Опис приладів, устаткування та інструментів, які використовуються при виконанні лабораторної роботи:

1. Персональний комп'ютер.
2. Програмне забезпечення MathCad.
3. Програмне забезпечення Electronics Workbench.



### Забороняється:

1. Проводити вимірювання струмів і напруг лабораторної установки з несправними приладами.
2. Використовувати для вимірювань нестандартні прилади.
3. Працювати з увімкненими приладами без діелектричних ковриків.
4. Проводити вимірювання в лабораторній установці без діючої системи захисту, яка забезпечує безпеку шляхом автоматичного вимкнення ланцюгів електроживлення.

### Порядок проведення лабораторної роботи

1. Перед виконанням лабораторної роботи проводиться усне опитування теоретичного матеріалу та визначення мети лабораторної роботи.
2. Викладачем проводиться інструктаж з техніки безпеки. Після чого студент розписується в журналі з „Техніки безпеки”.
3. Якщо студент одержав незадовільну оцінку з теоретичного матеріалу, то до виконання лабораторної роботи він не допускається.
4. Кожен студент виконує лабораторну роботу індивідуально.

### Методика виконання лабораторної роботи.

1. Записати для електричного кола (рис. 2.5) рівняння першого і другого закону Кірхгофа; вивести з нього вираження для розрахунку струму і напруги.

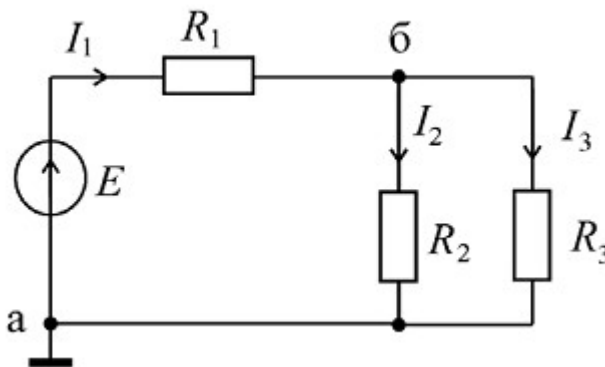


Рисунок 2.5 – Схема ланцюга за законом Кірхгофа.

2. Розрахувати методом перетворення електричний ланцюг (струми у всіх гілках  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  і падіння напруги на всіх опорах  $UR_1$ ,  $UR_2$ ,  $UR_3$ ). При розрахунку використовувати значення опору і напруги джерела ЕРС з таблиці 1.
3. Зібрати модель електричного кола в Electronics Workbench, провести вимірювання і результати вимірювання і розрахунку занести в таблицю 2.

Таб. 2.1

$E$ , В	5	7	14	9	4	6
$R_1$ , Ом	70	90	50	30	40	60
$R_2$ , Ом	100	120	130	70	30	50
$R_3$ , Ом	50	60	160	140	160	40

Таб 2.2

Спосіб визначення величин	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА	$I_3$ , мА	$UR_1$ , В	$UR_2$ , В	$UR_3$ , В
Расчет						
експеримент						

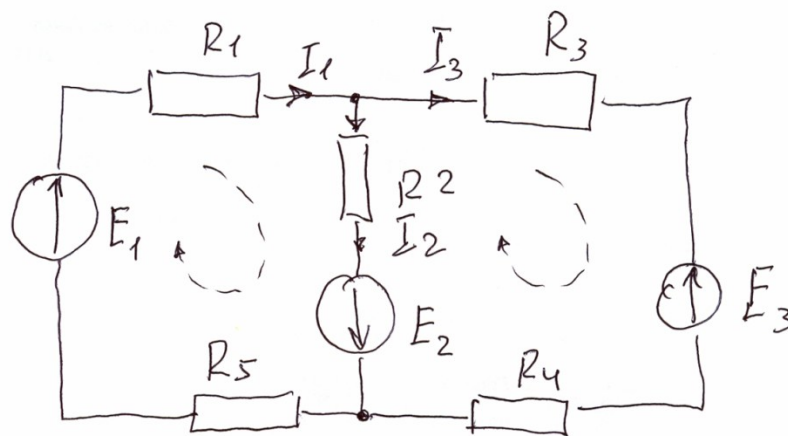


Рисунок 2.6 – Схема ланцюга за законом Кірхгофа.

- Зібрати модель електричного кола (рис 2.6) в Electronics Workbench, провести розрахунки і вимірювання в усіх гілках, падіння напруги на всіх опорах, при розрахунку використовувати значення опорів і напруги джерела ЕРС з таблиці 3. Результати вимірювання і розрахунку занести в таблицю 4.
- За результатами експериментальних даних для вузлів електричного кола перевірити виконання першого закону Кірхгофа і зробити висновки.
- За результатами експериментальних даних для всіх контурів електричного кола перевірити виконання другого закону Кірхгофа і зробити висновки.

7. Визначити дійсний напрям струму і записати перший і другий закон Кірхгофа.

Таб 2.3

$E_1, \text{ В}$	5	7	14	9	4	6
$E_2, \text{ В}$	12	5	7	10	8	12
$E_3, \text{ В}$	6	12	10	15	6	8
$R_1, \text{ Ом}$	100	90	50	30	40	60
$R_2, \text{ Ом}$	130	120	130	70	30	50
$R_3, \text{ Ом}$	200	60	160	140	160	40
$R_4, \text{ Ом}$	40	80	100	60	50	90
$R_5, \text{ Ом}$	130	120	90	100	130	150

Таб 2.4

Способ определения величин	$I_1, \text{ мА}$	$I_2, \text{ мА}$	$I_3, \text{ мА}$	$U_{R_1}, \text{ В}$	$U_{R_2}, \text{ В}$	$U_{R_3}, \text{ В}$	$U_{R_4}$	$U_{R_5}$
Расчет								
Экперемент								

### Порядок оформлення звіту та його представлення і захист.

Результати проведеної лабораторної роботи оформлюються протоколом. Він повинен містити такі дані:

- 1) тема лабораторної роботи;
- 2) мета лабораторної роботи;
- 3) короткі теоретичні відомості;
- 4) порядок проведення лабораторної роботи;
- 5) таблицю результатів досліджень;
- 6) висновки.

Заключний звіт містить самі істотні відомості по проектуванню імітаційних моделей, налагодженню параметрів блоків, налагодженню й верифікації. Додаються також результати досліджень у вигляді таблиць. Відомості по моделях і блокам повинні бути достатніми для відтворення моделей, а отримані результати повинні бути обґрунтовані. Промоделювати, показати викладачеві, а потім зберегти модель під іменем **Lab\_ПрИСМОС№\_ім'я студента.**



## Лабораторна робота №3

### «Дослідження операційного підсилювача Ч-1»

**Мета роботи** – ознайомиться з моделлю операційного підсилювача (ОП) і дослідити параметри ОП: напруги зсуву, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), фазочастотна характеристика (ФЧХ) і швидкості наростання вихідної напруги.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** Під час проведення лабораторної роботи студент повинен:

**знати:**

- призначення й класифікації елементів технічної електроніки;
- типові схемотехнічні рішення щодо схем на операційних підсилювачах і логічних елементах;
- основи аналізу базових елементів і пристроїв, що становлять сучасні інформаційні системи;

**уміти:**

- вибирати й використати базові елементи радіоелектронних апаратур;
- використовувати основні методи аналізу й синтезу електронних систем обробки інформації,
- здійснювати необхідні розрахунки;
- використовувати комп'ютерне моделювання електронних елементів і пристроїв для дослідження їхньої роботи

**Теоретичні відомості.** Операційний підсилювач (ОП) - це підсилювач постійного струму з більшим коефіцієнтом підсилення, що має диференційний вхід і один загальний вихід. ОП - це аналогова інтегральна схема, яка постачається 5 виводами. Два виводи ОП використовуються в якості вхідних, один - є вихідним, а ще два використовують для підключення джерела живлення. Умовно-графічне зображення ОП представлено на рис. 3.1.

Виводи ОП діляться на вхідні, вихідні й виводи, що не несуть функціональне навантаження, до яких підключаються ланцюги напруги живлення й елементи, що забезпечують нормальну роботу ОП. Входи показують ліворуч, вихід - праворуч.

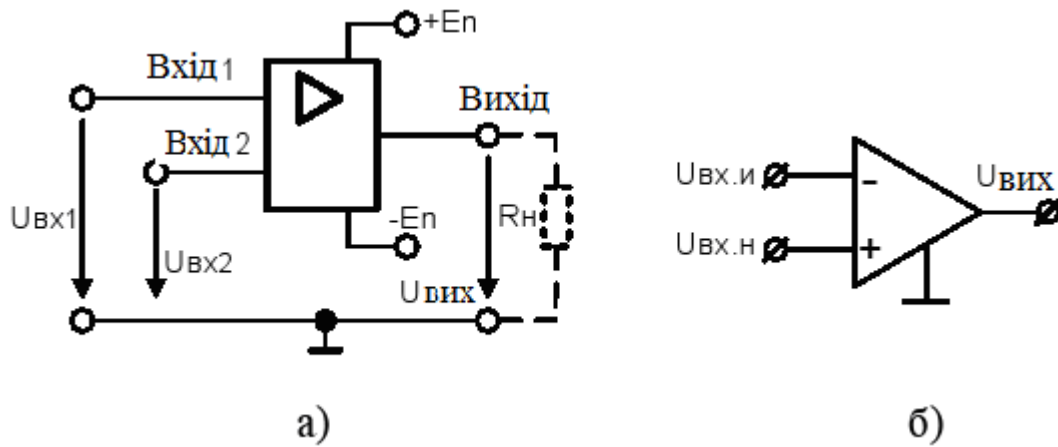


Рисунок 3.1 – Умовно-графічне зображення ОП:  
 а - у вигляді інтегральної схеми; б - спрощене зображення

Більшість ОП мають один несиметричний вихід і два входи, симетричних стосовно загального проведення. Прямі входи й виходи позначають лініями, приєднаними до контуру графічного зображення ОП без яких-небудь знаків, а **3** кружками в місці приєднання інверсні входи й виходи. Прямий вхід ще називають що не інвертує, тому що фаза вихідного сигналу збігається з фазою сигналу, поданого на його вхід. Інший вхід називають що інвертує, тому що фаза вихідного сигналу зрушена на  $180^\circ$  щодо вхідного сигналу (на середніх частотах і при чисто активному навантаженні). Тому входи роблять на вихідну напругу рівно в кількісному відношенні впливу (протилежні за знаком). Якщо до входів прикладені синфазні, діючі одночасно, однакові за величиною й фазою щодо загального проведення сигнали, то їхній вплив буде взаємно скомпенсований, і вихід буде мати нульовий потенціал. Завдяки цьому параметру, ОП мало чутливий до змін напруги живлення, температур й інших зовнішніх факторів. Напруга на виході ОП повинна бути лише в тому випадку, коли на його входах діють різні за рівнем і фазою сигнали. Вихідна напруга пропорційна різниці рівнів вхідних сигналів, який називають диференціальним сигналом. Вихідна напруга ОП вимірюється відносно загального провідника.

Для забезпечення можливості роботи ОП як з позитивними, так і негативними вхідними сигналами, необхідно двохполярна живляча напруга. При двохполярному живленні постійна напруга на несиметричному виході відсутня за умови, що постійної напруги на вході ОП немає.

Наявність розглянутих виводів необхідно для функціонування ОП. До допоміжних відносяться: виводи з мітками FC - для приєднання кола, що

коректує АЧХ ОП, виводи НС - для підключення елементів балансування за постійним струмом (установки нуля на виході ОП), а також вивід металевого корпусу для з'єднання із загальним провідником.

ОП створені для використання в схемах з глибоким негативним зворотнім зв'язком (НЗЗ) так, щоб параметри пристроїв визначалися переважно параметрами кола НЗЗ. Такий ОП за своїми характеристиками повинен бути наближений до ідеального. З ідеальним ОП звичайно зв'язують наступні властивості: нескінченно великий коефіцієнт підсилення в нескінченно великій смузі пропускання, нескінченний вхідний і нульовий вихідний опір. Крім того, підсилювач не повинен мати статичних помилок, що змінюються від температури й часу.

Як і всі електронні прилади, операційні підсилювачі характеризуються своїми параметрами – основними показниками, за якими вибирають той або інший прилад для застосування в реальній схемі.

Параметри ОП можна розділити за наступними групами.

Вхідні параметри, обумовлені властивостями вхідного диференціального каскаду:

– напруга зсуву нуля  $U_{см}$ , значення якого визначається не ідентичністю напруги  $U_{бс0}$  транзисторів вхідного диференціального каскаду, і його температурний дрейф  $\Delta U_{см}/\Delta T$ ;

– вхідний струм що інвертує  $I_{-вх}$  і входу, що не інвертує,  $I_{+вх}$ , а також середній  $I_{вх.ср}$  і різницевий  $I_{вх.різн}$  вхідний струм (струм баз транзисторів у режимі спокою вхідного диференціального каскаду) і температурний дрейф різницевого вхідного струму  $\Delta I_{вх.різн}/\Delta T$ ;

– максимальне вхідна диференціальна  $U_{вх.диф\ max}$  і синфазна  $U_{вх.сф. max}$  напруга;

– вхідний диференціальний опір  $R_{вх.оп}$ , тобто опір між входами ОП для малого диференціального вхідного сигналу, при якому зберігається лінійність вихідної напруги;

– вхідний синфазний опір  $R_{вх\ сф}$ , тобто опір, який дорівнює відношенню напруги, поданої на обидва входи ОП, до струму входів.

*Передатні параметри:*

– коефіцієнт підсилення за напругою  $K_{оп}$  обумовлений відношенням зміни вихідної напруги до того, що викликало ці зміни в диференціальному вхідному сигналі  $K_{оп} = U_{вих}/U_{вх.диф}$ ;

– коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу  $K_{осс}$  обумовлений

відношенням коефіцієнта підсилення диференціального сигналу в схемі на ОП до коефіцієнта підсилення синфазного сигналу  $K_{\text{осс}} = K_{\text{ОП}} / K_{\text{ОП.сс}}$ . Він характеризує здатність послабляти сигнали, прикладені до обох входів одночасно;

– гранична частота  $f_{\text{гр}}$  – частота на якій коефіцієнт підсилення зменшується в рази стосовно максимального значення коефіцієнту підсилення. Ця частота відповідає зменшенню коефіцієнта підсилення на  $-3\text{дБ}$  при завданні коефіцієнта підсилення в логарифмічному масштабі.

- частота одиничного зусилля  $f_1$ , тобто частота, при якій  $K_{\text{ОП}}=1$ . Гранична частота  $f_{\text{гр}}$ , частота одиничного зусилля  $f_1$  і коефіцієнт підсилення за напругою  $K_{\text{ОП}}$  для ОП із внутрішньою корекцією пов'язані співвідношенням  $f_1 = f_{\text{гр}} K_{\text{ОП}}$ .

– запас стійкості за фазою на частоті одиничного посилення  $\varphi_{\text{зап}}$ , характеризує стійкість ОП.  $\varphi_{\text{зап}} = 180^\circ - |\varphi_1|$ , де  $\varphi_1$  – фазовий зсув на частоті  $f_1$ . Позитивний запас стійкості за фазою є показником стійкості ОП. Для отримання максимально швидкого відгуку на імпульсний вхідний сигнал і одночасно виключення дзвону або нестійкості бажано мати запас стійкості за фазою порядку  $45^\circ$ .

Вихідні параметри, обумовлені властивостями вихідного каскаду ОП:

- вихідний опір  $R_{\text{вих}}$ ;
- максимальний вихідний струм  $I_{\text{вих.мах}}$ , вимірюваний при максимальній вихідній напрузі, або мінімальний опір навантаження  $R_{\text{н.мін}}$ ;
- максимальна вихідна напруга в діапазоні лінійного посилення. Для більшості типів ОП величина  $U_{\text{вих.мах}} = (E_{\text{п}} - 2)\text{В}$ , що становить приблизно 12-13В.

*Перехідні параметри:*

- швидкість наростання вихідної напруги  $VU_{\text{вих}}$  – максимальна швидкість зміни в часі напруги на виході ОП (В/мкс) при подачі на вхід великого сигналу;
- час установа вихідної напруги  $t_{\text{уст}}$  – час, за який вихідна напруга досягає свого стаціонарного значення із заданою точністю.

## **Порядок виконання роботи**

Проведення лабораторної роботи здійснюється двома етапами:

- 1) створення схеми в середовищі EWB;
- 2) моделювання й аналіз схем.

2.1 Створити модель ОП в середовищі Electronics Workbench відповідно до варіанта завдання табл. 3.1. Для цього натиснути два рази клавішею вказівки миші на зображенні ОП й вибрати у вікні, що з'явилося, *3 -Terminal Opamp*



*Properties* у розділі *Library бібліотеку default*, а потім у розділі *Model* - тип ОП *ideal*. Вибрати послідовно клавішею вказівки миші кнопки *Copy* і *Paste*, записати латинськими буквами у вікні, що з'явилося, тип ОП відповідно до варіанта завдання й нажати кнопку *OK*. У результаті в розділі *Model* додається новий тип ОП. Для коректування його параметрів нажати кнопку *Edit* і встановити значення параметрів *Input offset voltage [VOS]* (напряга зсуву  $U_{см}$ ), *Input resistance [RI]* (вхідний опір  $R_{вх}$ ), *Open-loop gain [A]* (коефіцієнт підсилення  $K_y$ ), *Slew rate [SR]* (швидкість наростання вихідної напруги  $VU_{вих}$ ), *Unity-gain bandwidth [FU]* (частота одиничного посилення  $f_1$ ) і *Output resistance [RO]* (вихідний опір  $R_{вих}$ ) відповідно до табл. 3.1. Значення інших параметрів залишити без зміни.

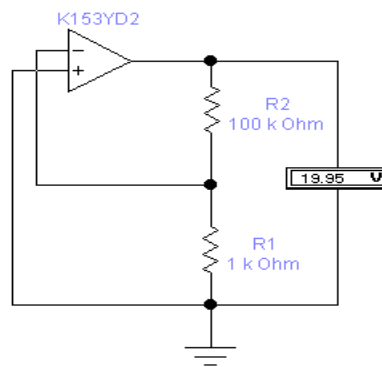


Рисунок 3.2 – Приклад побудови моделі в середовищі EWB

2.2 Виміряти вихідну напругу ( $U_{вих}$ ) ОП й занести в таблицю для наступних значень  $R_1$  і  $R_2$ , наведених у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Таблиця вхідних даних

$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$U_{вих}$ , В	$U_{см}$ , мВ
1	10	19,56	5
1	100	19,95	5

2.3 Зібрати схему для дослідження АЧХ і ФЧХ ОП, включеної за схемою повторювача напруги, відповідно до рис. 3.3.

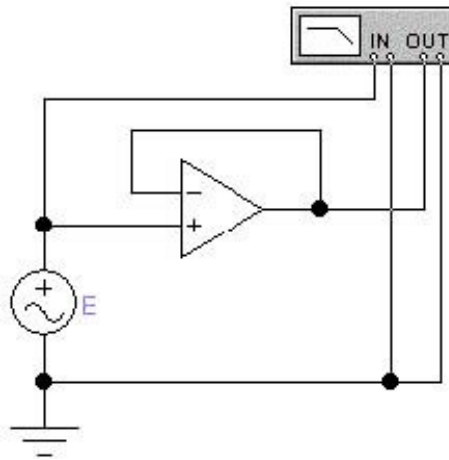


Рисунок 3.3 – Схема повторювача напруги

2.4 Установити напругу джерела ЕДС  $E=1$  В і частоту  $f=1$  МГц.

2.5 Установити *Bode Plotter* в режим *Magnitude*. За вертикальною та горизонтальною вісями вибрати логарифмічний масштаб (*Log*).

2.6 Отримати АЧХ ОП на екрані *Bode Plotter*.

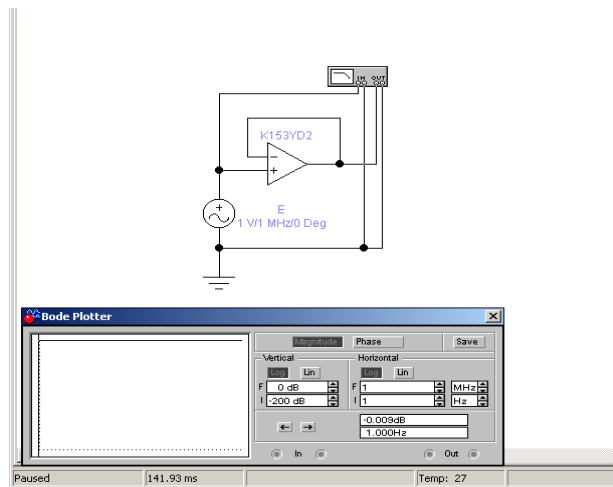


Рисунок 3.4 – Результат моделювання в режимі *Magnitude*

2.7 Установити *Bode Plotter* в режим *Phase* рис. 3.4. За вертикальною та горизонтальною вісями вибрати логарифмічний масштаб (*Log*).

2.8 Отримати ФЧХ ОП на екрані *Bode Plotter*.

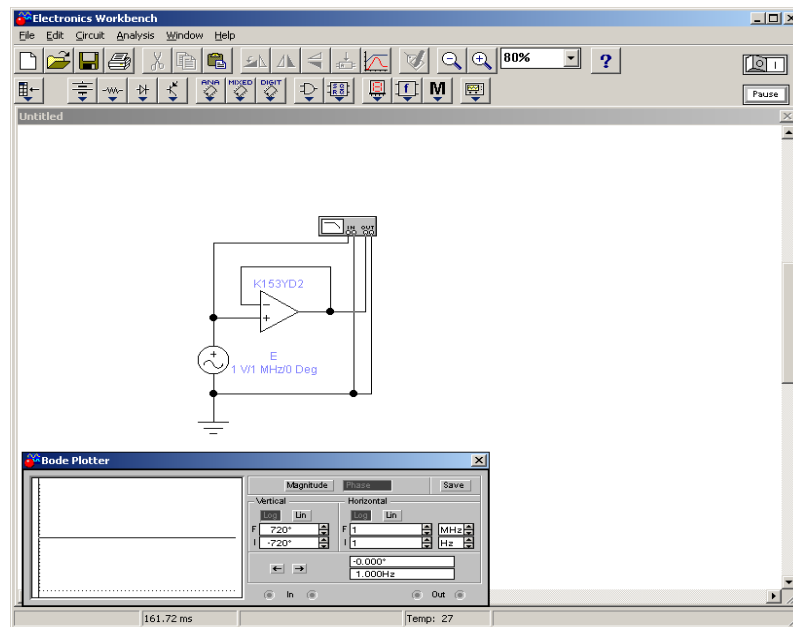


Рисунок 3.5 – Результат моделювання в режимі *Phase*

2.9 Зібрати схему підсилювача, що інвертує, на ОП відповідно до рис. 3.5 й дослідити вплив опору навантаження  $R_3$  на величину вихідної напруги ОП.

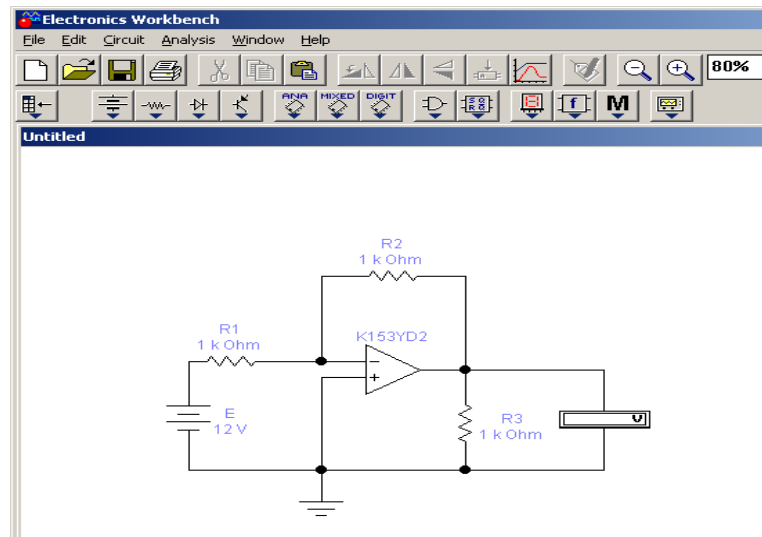


Рисунок 3.6 – Схема підсилювача, що інвертує, на ОП

2.10 Послідовно встановлюючи різні значення резисторів, виміряти вихідну напругу ОП  $U_{\text{вих}}$ .

2.11 Зібрати схему підсилювача, що інвертує, відповідно до рис. 3.6 дослідження перехідних параметрів ОП.

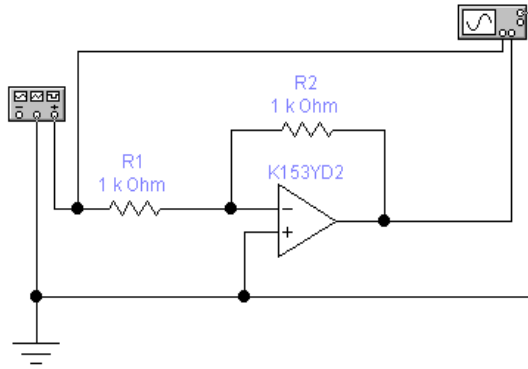


Рисунок 3.7 – Схема дослідження перехідних параметрів ОП

2.12 Послідовно встановлюючи значення резистора R2, вихідну напругу  $U_{\Gamma}$  й частоту  $f_{\Gamma}$  генератора імпульсів відповідно до табл. 3.2, зарисувати відповідні осцилограми (рис. 3.7) й визначити час установлення ОП  $t_{уст}$  з точністю 5%.

Таблиця 3.2 – Таблиця вхідних даних

R1, кОм	R2, кОм	$U_{\Gamma}$ , В	$f_{\Gamma}$ , кГц	$t_{уст}$ , мкс	$VU_{вих}$ , В/мкс
10	100	0,5	10	0	нескінченність
10	10	5,0	10	0	нескінченність

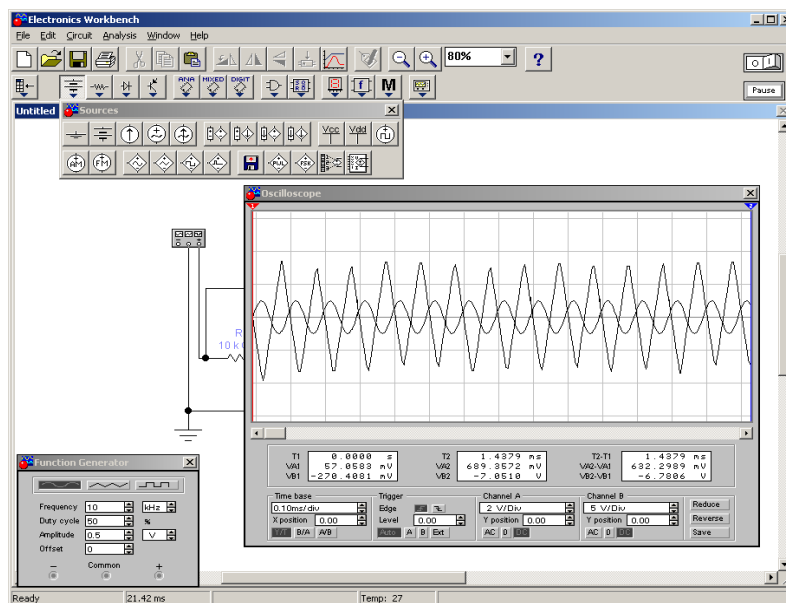


Рисунок 3.8 – Результат дослідження ОП

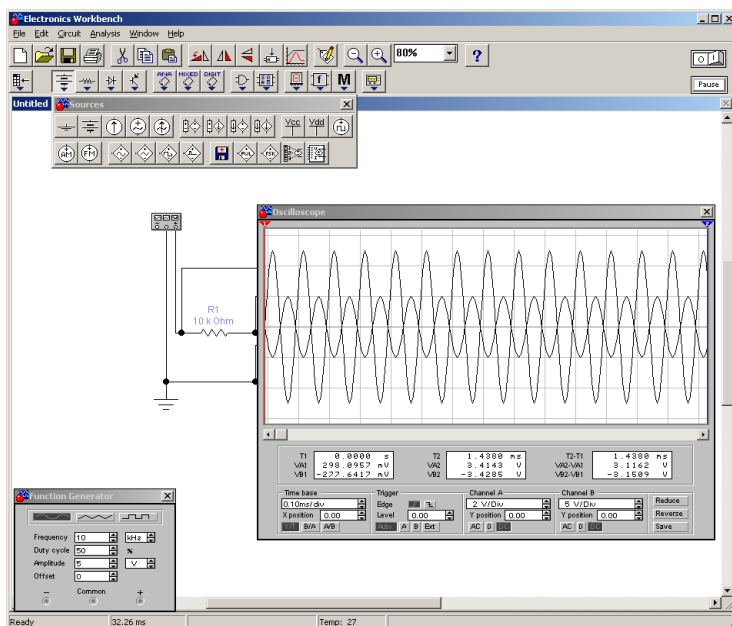


Рисунок 3.9 – Результат дослідження ОП  $t_{уст}$  з точністю 5%.

### Устаткування й апаратура:

Комп'ютер, програми комп'ютерного моделювання Electronics Workbench.

### Зміст звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- схеми експериментів;
- тимчасові діаграми;
- висновки за результатами експериментів.

### *Відповісти усно на наступні питання*

1. Дайте визначення операційного підсилювача?
2. Які бувають входи/виходи у ОП?
3. Перерахуйте основні входні параметри ОП?
4. Перерахуйте основні вихідні параметри ОП?
5. Де в EWB знаходиться ОП?
6. Який вигляд має ОП?

## Лабораторна робота №4

### «Дослідження операційних підсилювачів Ч-2»

**Мета роботи** – ознайомитися з моделлю операційного підсилювача (ОП) і дослідити параметри ОП: напруги зсуву, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), фазочастотна характеристика (ФЧХ) і швидкості наростання вихідної напруги.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** Під час проведення лабораторної роботи студент повинен:

**знати:**

- призначення й класифікації елементів технічної електроніки;
- типові схемотехнічні рішення щодо схем на операційних підсилювачах і логічних елементах;
- основи аналізу базових елементів і пристроїв, що становлять сучасні інформаційні системи;

**уміти:**

- вибирати й використати базові елементи радіоелектронних пристроїв;
- використовувати основні методи аналізу й синтезу електронних систем обробки інформації,
- здійснювати необхідні розрахунки;
- використовувати комп'ютерне моделювання електронних елементів і пристроїв для дослідження їхньої роботи

**Теоретичні відомості.** Операційний підсилювач (ОП) - це підсилювач постійного струму з більшим коефіцієнтом підсилення, що має диференційний вхід і один загальний вихід. ОП - це аналогова інтегральна схема, яка постачається 5 виводами. Два виводи ОП використовуються в якості вхідних, один - є вихідним, а ще два використовують для підключення джерела живлення. Умовно-графічне зображення ОП представлено на рис. 4.1. Виводи ОП діляться на вхідні, вихідні й виводи, що не несуть функціональне навантаження, до яких підключаються ланцюги напруги живлення й елементи, що забезпечують нормальну роботу ОП. Входи показують ліворуч, вихід - праворуч.

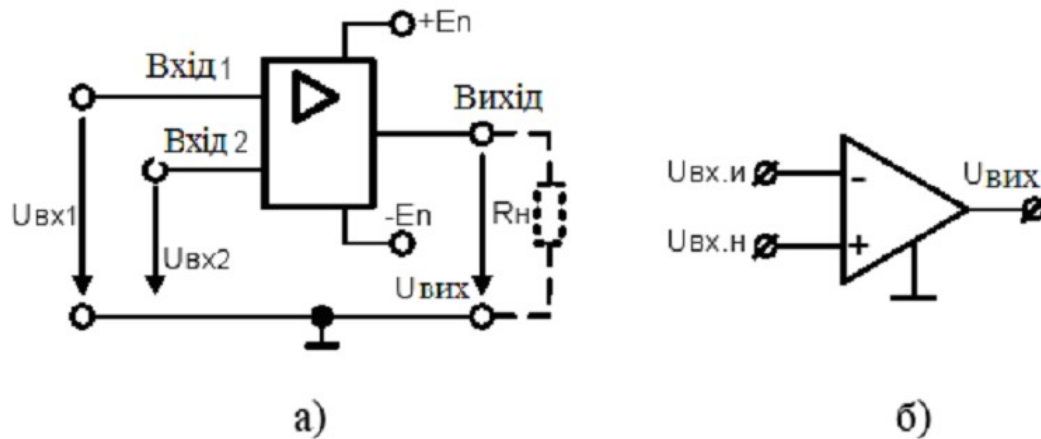


Рисунок 4.1 – Умовно-графічне зображення ОП:  
 а - у вигляді інтегральної схеми; б - спрощене зображення.

Більшість ОП мають один несиметричний вихід і два входи, симетричних стосовно загального проведення. Прямі входи й виходи позначають лініями, приєднаними до контуру графічного зображення ОП без яких-небудь знаків, а з кружками в місці приєднання інверсні входи й виходи. Прямий вхід ще називають неінвертувальним, тому що фаза вихідного сигналу збігається з фазою сигналу, поданого на його вхід. Інший вхід називають інвертувальним, тому що фаза вихідного сигналу зрушена на  $180^\circ$  щодо вхідного сигналу (на середніх частотах і при чисто активному навантаженні). Тому входи роблять на вихідну напругу рівно в кількісному відношенні впливу (протилежні за знаком). Якщо до входів прикладені синфазні, діючі одночасно, однакові за величиною й фазою щодо загального проведення сигнали, то їхній вплив буде взаємно скомпенсований, і вихід буде мати нульовий потенціал. Завдяки цьому параметру, ОП мало чутливий до змін напруги живлення, температур й інших зовнішніх факторів. Напруга на виході ОП повинна бути лише в тому випадку, коли на його входах діють різні за рівнем і фазою сигнали. Вихідна напруга пропорційна різниці рівнів вхідних сигналів, яку називають диференціальним сигналом. Вихідна напруга ОП вимірюється відносно загального провідника.

Для забезпечення можливості роботи ОП як з позитивними, так і негативними вхідними сигналами, необхідна двополярна живильна напруга. При двополярному живленні постійна напруга на несиметричному виході відсутня за умови, що постійної напруги на вході ОП немає. Наявність розглянутих виводів необхідна для функціонування ОП. До допоміжних відносяться: виводи з мітками FC - для приєднання кола, що коректує АЧХ ОП, виводи NC - для підключення елементів балансування за постійним струмом (установки нуля на виході ОП), а також вивід металевого корпусу для з'єднання із загальним провідником.

ОП створені для використання в схемах з глибоким негативним зворотним зв'язком (НЗЗ) так, щоб параметри пристроїв визначалися переважно параметрами кола НЗЗ. Такий ОП за своїми характеристиками повинен бути наближений до ідеального. З ідеальним ОП звичайно пов'язують такі властивості: нескінченно великий коефіцієнт підсилення в нескінченно великій смузі пропускання, нескінченний вхідний і нульовий вихідний опір. Крім того, підсилювач не повинен мати статичних помилок, що змінюються від температури й часу.

Як і всі електронні прилади, операційні підсилювачі характеризуються своїми параметрами – основними показниками, за якими вибирають той або інший прилад для застосування в реальній схемі.

Операційний підсилювач має наступні основні параметри:

1. **Коефіцієнт посилення без зворотного зв'язку (A).** Коефіцієнт посилення підсилювача за відсутності зворотного зв'язку зазвичай дорівнює кільком тисячам. Називається також повним коефіцієнтом посилення по напрузі.
2. **Вхідна напруга зрушення (зміщення) ( $U_{см}$ ) [ $V_{OS}$ ].** Невелика небажана напруга, що виникає усередині підсилювача, служить причиною появи на його виході деякої ненульової напруги при нульовій напрузі на обох входах. Є наслідком неточного узгодження напруги емітер-база транзисторів. Зазвичай  $U$  дорівнює декільком милливольтам
3. **Вхідний струм зміщення ( $I_{см}$ ) [ $I_{OS}$ ].** Струм на входах підсилювача, необхідний для роботи вхідного каскаду операційного підсилювача; струм бази, яка повинна бути забезпечена для вхідного транзистора.
5. **Вхідний опір ( $R_{вх}$ ) [ $R_I$ ].** Опір підсилювача по відношенню до вхідного сигналу. Вхідний опір  $R_{вх}$  може досягати декількох сотень мегом. Слід розрізняти диференціальне вхідний опір, т.ч. опір між двома вхідними контактами, і синфазное вхідний опір, тобто опір між об'єднаними обома висновками входів і землею. В описах мікросхем зазвичай не вказується, який із цих параметрів має.
6. **Вихідний опір ( $R_{вих}$ ) [ $R_O$ ].** Внутрішній опір підсилювача, про який можна судити по напрузі на його виході. Зазвичай  $R_{вих}$ , не перевищує декількох сотень Омів.
7. **Коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг.** Характеризує здатність послаблювати (не підсилювати) сигнали, прикладені до обох входів одночасно.
8. **Максимальна швидкість наростання вихідної напруги (V) [ $F_U$ ].** Максимальна швидкість зміни вихідної напруги, дана в вольтгах на мікросекунду.
9. **Перехідна характеристика.** Сигнал на виході операційного підсилювача при подачі на його вхід сходинок напруги. Час наростання і величина викиду вихідної напруги даються для стандартного зміни вхідного напруги.



## Перетворювачі аналогових сигналів на ОУ

Зазвичай функції, виконувані ОУ, визначаються елементами зворотного зв'язку, в якості яких використовуються резистори, ємності, індуктивності, напівпровідникові прилади і т. д. На основі ОУ можуть бути побудовані масштабні підсилювачі, повторювачі, суматори, інтегратори, стабілізатори струму і напруги, активні фільтри, підсилювачі змінного струму, генератори імпульсних сигналів, функціональні перетворювачі, схеми порівняння і т. д. Повторювач напруги (рис. 3.2) являє собою підсилювач, охоплений 100% ООС по вихідній напрузі  $K_{ос}=1$ . Для повторювача  $U_{вих}=U_{вх}$ .

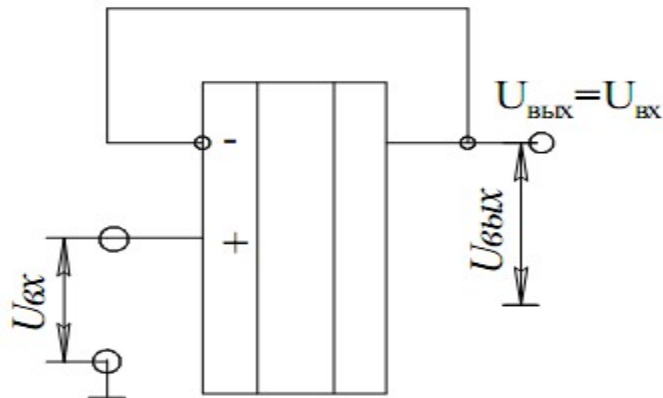


Рисунок 4.2 – Повторювач напруги.

Вихідна напруга подається безпосередньо на інвертуючий вхід. При цьому виявиться, що  $U_{вих} - U_{вх} = U_{д}$ . Якщо згадати, що напруга між вхідними висновками  $U_{д}$  – це те напруження, яке посилюється з коефіцієнтом підсилення підсилювача  $A$ , то зрозуміло, що при подачі сигналу на неінвертуючий вхід напруга на виході підсилювача зміниться так, що опиниться  $U_{д} = U_{вих} / A$ , після чого вихідна напруга буде залишатися постійним, поки не зміниться вхідний сигнал. Оскільки коефіцієнт підсилення операційного підсилювача дуже високий,  $U_{д}$  буде дуже мало, тому  $U_{вих}$  виявиться приблизно рівним  $U_{вх}$ . Із закону Кирхгофа  $U_{вх} + U_{д} = U_{вих}$  і рівності  $U_{д} = U_{вих} / A$  маємо:

$$U_{вх} + \frac{U_{ввых}}{A} = U_{ввых}$$

Якщо  $A$  наближається до нескінченно великим значенням, то член  $U_{вих}/A$  прагне до нуля, і в результаті отримуємо рівність  $U_{вх} = U_{вих}$ . Так як вхідний сигнал поданий на неінвертуючий вхід, сигнал на виході буде мати ті ж фазу і амплітуду, що і вхідний.

$$R_{вх} = R_{вхо} \cdot (1 + A); \quad R_{ввых} = \frac{R_{ввыхо}}{(1 + A)}$$

Де  $R_{вхо}$ ,  $R_{ввыхо}$  – вхідний і вихідний опір ОП без ООС. Завдяки великому вхідному опору і малому вихідному опору повторювач використовується в якості узгоджувального елемента.

**Неінвертуючий масштабний підсилювач** (рис. 4.3). Тут коефіцієнт передачі дільника в ланцюзі ООС визначається виразом:

$$K_{oc} = \frac{Z_1}{(Z_{oc} + Z_1)}.$$

Тоді коефіцієнт підсилення підсилювача:

$$K_{oy} = \frac{A}{(1 + A \cdot K_{oc})} = \frac{A}{\frac{1 + Z_1 \cdot A}{Z_{oc} + Z_1}}.$$

Вважаючи, що  $A \rightarrow \infty$ , отримаємо ;

$$K_{oy} = \frac{Z_{oc} + Z_1}{Z_1} = \frac{Z_{oc}}{Z_1} + 1 ,$$

$$U_{вых} = \frac{Z_{oc} + Z_1}{Z_1} \cdot U_{вх} .$$

З отриманого виразу можна зробити висновок, що коефіцієнт підсилення підсилювача не залежить від параметрів ОУ і не може бути менше одиниці. Слід зазначити, що в розглянутому підсилювачі фази вхідного і вихідного напруг збігаються.

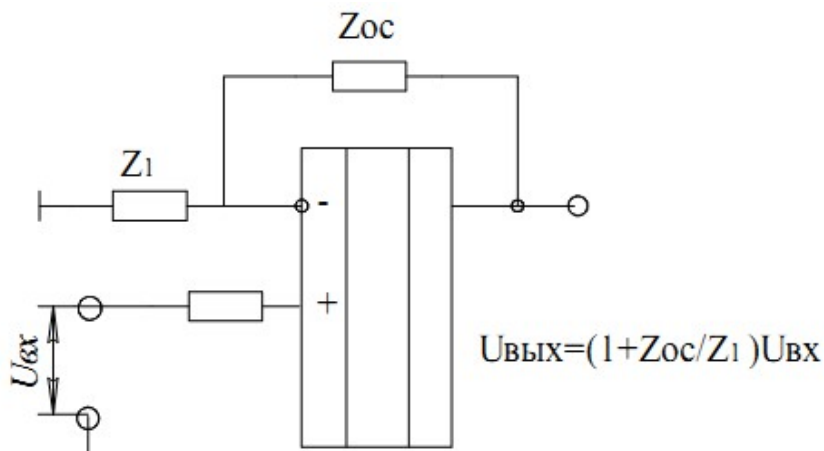


Рисунок 4.3 – Неінвертуючий підсилювач.

Схема рис. 3.3. володіє дуже високим вхідним (десятки МОм) і низьким вихідним (десяті частки Ома) опором. Це робить її практично незалежною від попередніх і наступних каскадів. Вихідний опір. Бажано, щоб вихідний опір  $Z_{вих}$  було якомога нижче опору навантаження  $Z_n$ . Вихідний опір можна розрахувати за наближеною формулою:

$$Z_{ввых} = \frac{R_{ввыхОУ}}{1 + A \cdot K_{oc}} ,$$

де  $R_{\text{выхОУ}}$  вихідний опір ОП при розімкнутому зворотного зв'язку, згідно з його паспортними даними.

Вхідний опір визначається:

$$Z_{\text{вх}} = R_{\text{вхОУ}} \cdot K_{\text{оу}},$$

де  $R_{\text{вхОУ}}$  вихідний опір ОП при розімкнутому зворотного зв'язку, згідно з його паспортними даними.

**При розрахунку** значень опорів  $Z_{\text{ос}}$  і  $Z_1$  необхідно враховувати значення струмом зміщення. Розумний спосіб обчислити максимум  $Z_1 + Z_{\text{ос}}$  полягає в тому, щоб покласти значущі струму через  $Z_{\text{ос}} + Z_1$ ,  $I_{\text{ос}} \geq 10 I_{\text{см}}$ , при  $U_{\text{вых}} = E/2$ , де  $E$  – напруга джерела живлення. Тоді:

$$Z_{\text{ос}} + Z_1 \geq \frac{E/2}{10 \cdot I_{\text{см}}}$$

В більшості випадків слід прагнути використовувати більш низькі значення суми  $Z_1 + Z_{\text{ос}}$  щоб звести до мінімуму шуми. Мінімальне значення суми  $Z_1 + Z_{\text{ос}}$  обмежується вихідним струмом операційного підсилювача, оскільки в цьому випадку вихідного струму вже не вистачає для корисного навантаження. Зазвичай значення суми  $Z_1 + Z_{\text{ос}}$  лежать між 50 кОм і 1 МОм.

#### **Приклад**

Розрахувати неінвертуючий підсилювач і зібрати схему (мал. 3.3) для наступних даних: власний коефіцієнт посилення операційного підсилювача  $A = 2 \cdot 10^5$ , струм зміщення  $I_{\text{см}} = 2 \cdot 10^{-7}$  А; коефіцієнт посилення по напрузі  $K_{\text{оу}} = 25$ . В процесі розрахунку визначити:  $R_{\text{ос}}$ ,  $R_1$ .

Максимально допустиме значення суми  $Z_1 + Z_{\text{ос}}$  визначається струмам зміщення. Розумний спосіб обчислення максимуму  $Z_1 + Z_{\text{ос}}$  полягає в тому щоб

$I_{\text{Zос}} = 20 \cdot I_{\text{см}}$  при  $U_{\text{вих}} = E/2$ . Тоді  $(Z_{\text{ос}} + Z_1)_{\text{max}} = \frac{E/2}{20 \cdot I_{\text{см}}}$  Для операційного

підсилювача  $\mu\text{A}741\text{C}$   $I_{\text{см}} = 200 \text{ нА}$ , при  $E = 12 \text{ В}$  отримуємо

$(Z_{\text{ос}} + Z_1)_{\text{max}} = 3 \text{ МОм}$ . З урахуванням  $\frac{Z_{\text{ос}}}{Z_1} + 1 = K_{\text{оу}} = 25$ , знаходимо

$Z_{\text{ос}} = Z_1 \cdot (K_{\text{оу}} - 1)$ , підставляючи це значення

$Z_{\text{ос}} + Z_1 = Z_1 \cdot (K_{\text{оу}} - 1) + Z_1 = (Z_{\text{ос}} + Z_1)_{\text{max}} = 3 \cdot 10^6$  знаходимо  $Z_1 = 120 \cdot 10^3$  та

$Z_{\text{ос}} = 2,88 \cdot 10^6$ .

Створюємо модель неінвертуючий підсилювач в Electronics Workbench за розрахунковими параметрами і визначуваний експериментально коефіцієнт посилення  $K_{ou-експ} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$ .

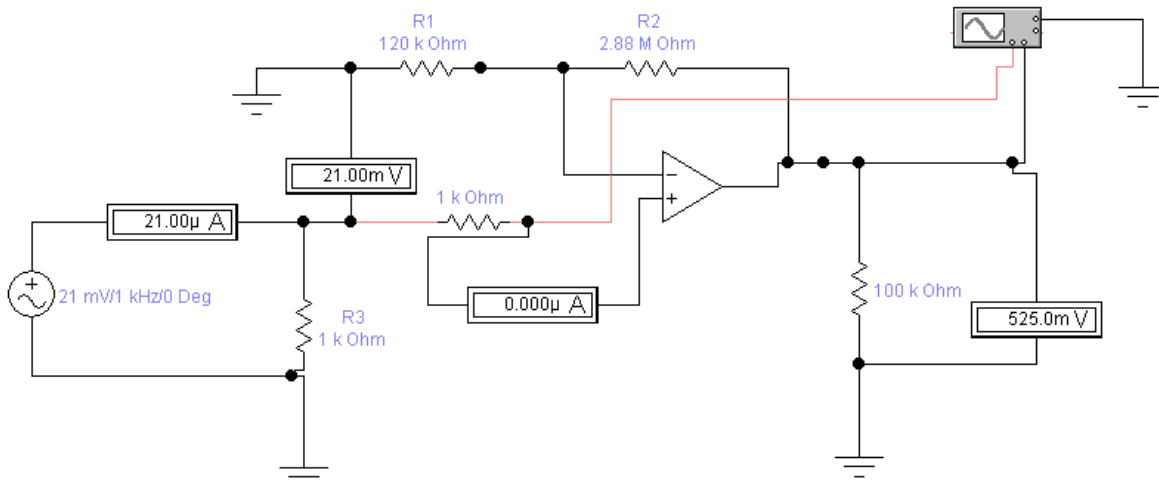


Рисунок 4.4 – Модель неінвертуючий підсилювач.

**Інвертуючий підсилювач.** Як впливає з самої назви, вхідний і вихідний сигнали інвертуючого підсилювача зрушені по фазі на  $180^\circ$ . Тут вхідний сигнал і сигнал зворотного зв'язку подається на інвертуючий вхід ОУ. На відміну від неінвертуючого підсилювача вхідний сигнал потрапляє на вхід ОУ не посередньо, а через дільника  $Z_1$  і  $Z_{oc}$  живлення.) Якщо на схему подати позитивне  $U_{вх}$ , то  $U_{д}$  стане позитивним і вихідний потенціал почне знижуватися (оскільки вхідна напруга подана на інвертуючий вхід підсилювача). Вихідна напруга мінятиметься в негативному напрямі до тих пір, поки напруга на інвертуючому вході не стане майже нульовою, так названий "квзінуль" на інвертуючому вході.

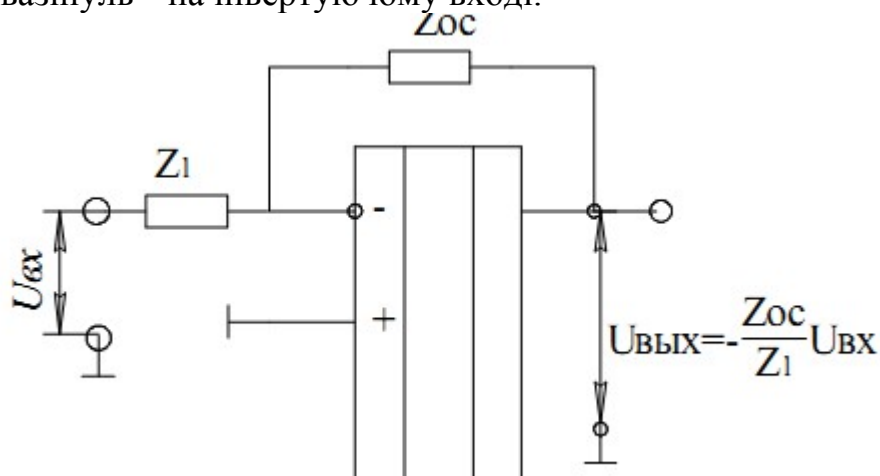


Рисунок 4.5 – Інвертуючий підсилювач.

Щоб отримати вираження для коефіцієнта посилення із зворотним зв'язком, оскільки вхід ОУ струму не споживає отже через опір протікає один і той же струм  $I_1 = I_{oc}$

$$\frac{U_{вх} - U_{д}}{Z_1} = - \frac{U_{ввых} - U_{д}}{Z_{oc}}$$

Знак мінус означає, що вхід інверсний. Коефіцієнт посилення із зворотним зв'язком буде рівний

$$K_{ou} = - \frac{Z_{oc}}{Z_1}$$

*Вхідний опір* інвертуючого підсилювача визначається:

$$Z_{вх} \approx Z_1$$

Вхідний опір схеми інвертуючого підсилювача рівний  $Z_1$ , завдяки зворотному зв'язку на вході ОУ зберігається приблизно нульовий потенціал. Опір  $Z_1$  вибирається так, щоби не навантажувати джерело вхідного сигналу,  $Z_{oc}$  має бути досить великим, щоб ненагружати надмірно вихідний струм ОУ.

### Приклад

Розрахувати інвертуючий підсилювач і зібрати схему (рис. 3.4) для наступних даних: власний коефіцієнт посилення операційного підсилювача

$$A = 2 \cdot 10^5; \quad \text{вхідний опір інвертуючого підсилювача } Z_{вх} \geq 10 \text{ кОм};$$

коефіцієнт посилення по напрузі  $K_{ou}=125$ . В процесі розрахунку визначити:  $R_{oc}$ ,  $R_1$ .

Мінімальне значення  $Z_1 = Z_{вх}$ , обчислюємо

$$Z_{oc} = K_{ou} \cdot Z_1 = 10 \cdot 125 = 1.25 \text{ мОм}$$

Створюємо модель інвертуючий підсилювач в Electronics Workbench за розрахунковими параметрами і визначуваний експериментально коефіцієнт

посилення  $K_{ou-эксп} = \frac{U_{ввых}}{U_{вх}}$

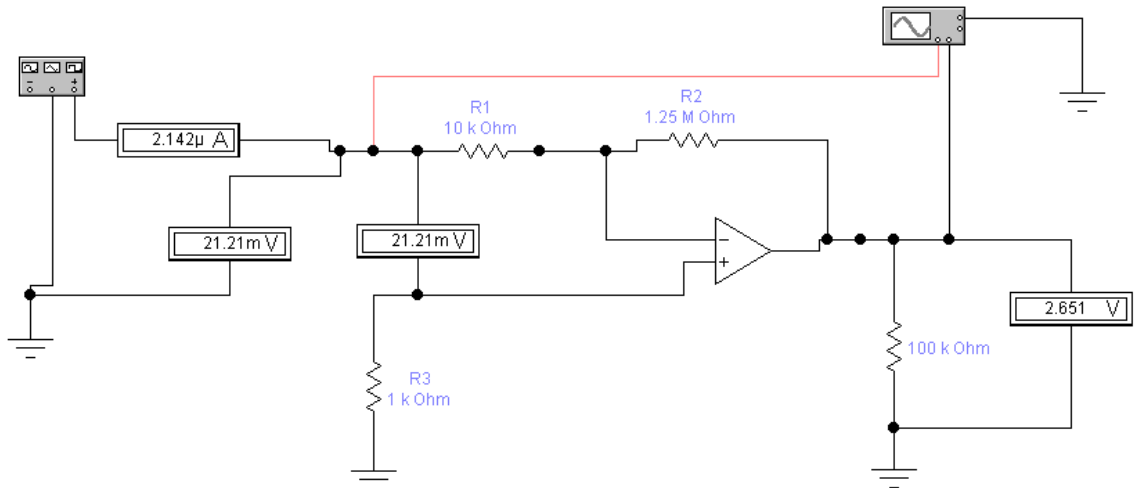


Рисунок 4.6 – Модель інвертуючого підсилювача.

**Суматор.** Інвентуючий суматор формує суму алгебри двох або більше за напругу і міняє знак на зворотний. На рис. 4.6. приведена схема інвентуючого суматора. У цій схемі вхідний опір має ту ж величину, що і опір зворотного зв'язку.

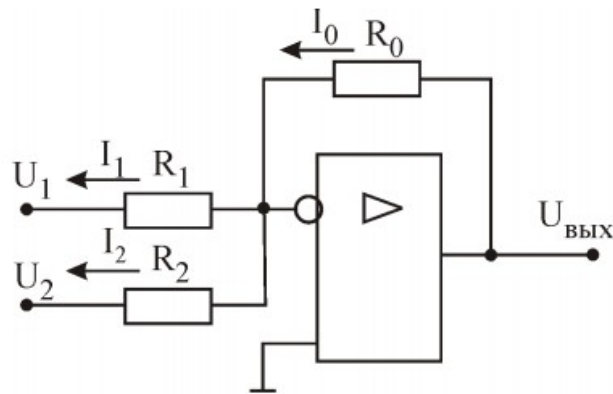


Рисунок 4.7 – Суматор.

Оскільки вхідний опір ОУ досить великий і струм зміщення нехтує малий те згідно із законом Кирхгофа

$$I_0 = I_1 + I_2 = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} .$$

Коефіцієнт посилення ОУ досить великий і виконується умова  $U_d \approx 0$ ,

перепишемо співвідношення  $\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ос}}} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}$ , при  $R_1=R_2=R_{\text{ос}}$  отримуємо

$U_{\text{ВЫХ}} = U_1 + U_2$ . Подібне міркування можна отримати для будь-якої кількості входів. Якщо підсумовується змінна напруга, то результат отримуємо у вигляді суми:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \sum_{i=1}^n U_i \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

У окремому випадку при синфазному сигналі, можна використати пікове або ефективне значення напруги.

Якщо окремим вхідним сигналам потрібно надати різні ваги, то використовують схему підсумовування з масштабними коефіцієнтами

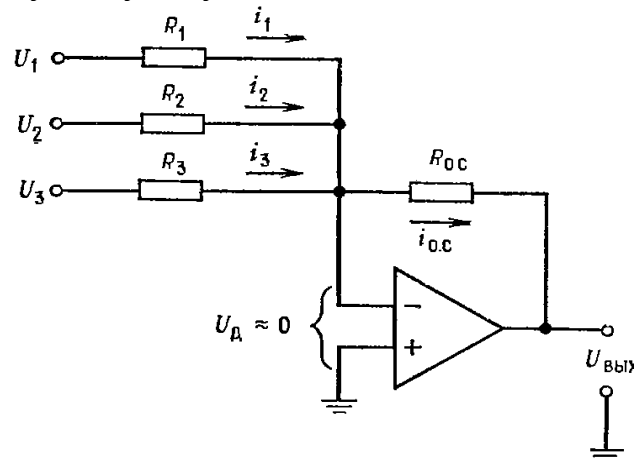


Рисунок 4.8 – Суматор з масштабними коефіцієнтами.

Згідно із законом Кирхгофа і перетворень у відповідності законом Ома

отримуємо  $U_{\text{ВЫХ}} = U_1 \cdot \frac{R_{\text{ос}}}{R_1} + U_2 \cdot \frac{R_{\text{ос}}}{R_2} + U_3 \cdot \frac{R_{\text{ос}}}{R_3}$  Значення  $\frac{R_{\text{ос}}}{R_i}$  є коефіцієнтом

посилення для кожного входу.

### Приклад

Розрахувати суматор з масштабними коефіцієнтами і зібрати схему (рис. 4.8) для наступних даних:  $R_1=20 \text{ кОм}$ ,  $R_2=50 \text{ кОм}$ ,  $R_3=25 \text{ кОм}$  і  $R_{\text{ос}}=100 \text{ кОм}$ , для  $U_1=1 \text{ В}$ ,  $U_2=2 \text{ В}$ ,  $U_3=-3 \text{ В}$ . В процесі розрахунку отримуємо:

$$U_{\text{ВЫХ}} = 1\text{В} \cdot \frac{100 \text{ кОм}}{20 \text{ кОм}} + 2 \text{ В} \cdot \frac{100 \text{ кОм}}{50 \text{ кОм}} - 3\text{В} \cdot \frac{100 \text{ кОм}}{25 \text{ кОм}} = 3 \text{ В}.$$

Створюємо модель інвертуючий підсилювач в Electronics Workbench за розрахунковими параметрами і визначуваний експериментально результат підсумовування з масштабними вагами  $U_{\text{вих}}$ .

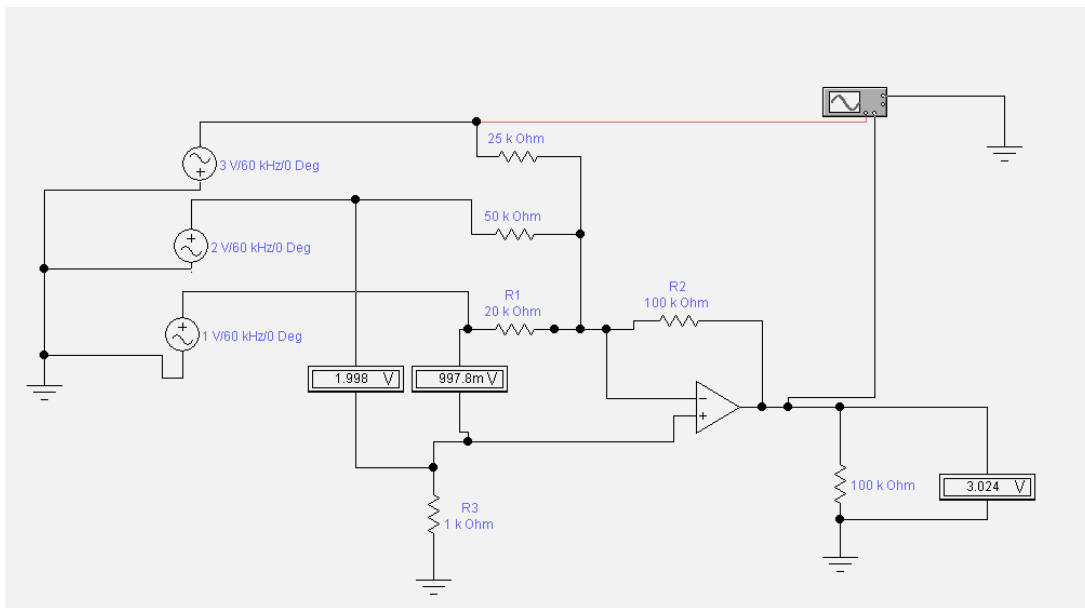


Рисунок 4.9 – Модель суматор з масштабними коефіцієнтами.

### *Запитання для самоперевірки*

1. Перерахуйте основні вхідні параметри ОП?
2. Перерахуйте основні вихідні параметри ОП?
3. Дайте визначення операційного підсилювача?
4. Назовіть основні параметри усилителя.
5. Де в EWB знаходиться ОП?

### **Опис приладів, устаткування та інструментів, які використовуються при виконанні лабораторної роботи:**

4. Персональний комп'ютер.
5. Програмне забезпечення MathCad.
6. Програмне забезпечення Electronics Workbench.

### **Забороняється:**

1. Проводити вимірювання струмів і напруг лабораторної установки з несправними приладами.
2. Використовувати для вимірювань нестандартні прилади.
3. Працювати з увімкненими приладами без діелектричних ковриків.



4. Проводити вимірювання в лабораторній установці без діючої системи захисту, яка забезпечує безпеку шляхом автоматичного вимкнення ланцюгів електроживлення.

### Порядок проведення лабораторної роботи

1. Перед виконанням лабораторної роботи проводиться усне опитування теоретичного матеріалу та визначення мети лабораторної роботи.
2. Викладачем проводиться інструктаж з техніки безпеки. Після чого студент розписується в журналі з „Техніки безпеки”.
3. Якщо студент одержав незадовільну оцінку з теоретичного матеріалу, то до виконання лабораторної роботи він не допускається.
4. Кожен студент виконує лабораторну роботу індивідуально.

### **Методика виконання лабораторної роботи.**

1. Дослідження схеми неінвертуючого підсилювача.
  - 1.1. Створити модель в середовищі Electronics Workbench відповідно до варіанту завдання таб.4.1, заздалегідь розрахувавши значення опорів R1, R<sub>oc</sub>.

Таб. 4.1

$K_{ou}$	68	26	120	54	110	34
$E$ В	12	15	9	10	16	6
$I_{cm}$ $10^{-6}$ А	2	4	3	6	1	2
$U_{вх'}$ мВ	5	12	23	3	8	77

- 1.2. Зібрати модель операційного неінвертуючого підсилювача рис. 4.4 в Electronics Workbench, провести виміри і результати занести в таб. 4.2. Привести осцилограми вхідного і вихідного сигналу дати пояснення виміру значення  $K_{ou-експ} = \frac{U_{ввх}}{U_{вх}}$ .
- 1.3. За результатами експериментальних даних для схеми операційного підсилювача перевірити виконання формули розрахунку  $K_{oc} = \frac{z_1}{(z_{oc} + z_1)}$  і допущення параметрів підсилювача  $I_{cm}$ , зробити висновки.

Таб. 4.2

Спосіб визначення величин	$U_{вх'}$ В	$U_{ввх'}$ В	$K_{ou}$	$U_{д'}$ В	$I_{cm}$ $10^{-6}$	$I_{oc}$ $10^{-6}$ А	R1	R <sub>oc</sub>

Розрахунок				–	–				
Експеримент									

1.4. Змінюючи значення опору зворотного зв'язку  $Z_{oc}$  провести вимірів коефіцієнта посилення схеми ОУ рис. 4.4 і перевірити виконання формули розрахунку  $K_{oc} = \frac{z_1}{(z_{oc}+z_1)}$ .

1.5. Оскільки входи ідеального ОУ не споживають струму, перевірити експериментальне виконання формули розрахунку струму в ланцюзі зворотного зв'язку  $I_{oc} = I_{R1} = I_{Roc} = \frac{U_{ввх}}{R_{oc}}$ . Занести результати вимірів в таб. 4.2.

## 2. Дослідження схеми підсилювача, що інвертує.

2.1. Створити модель у середовищі Electronics Workbench відповідно до варіанта завдання таб.4.3, попередньо розрахувавши значення опорів  $R1$ ,  $R_{oc}$ .

2.2. Зібрати модель операційного інвертуючого підсилювача, що рис. 4.6 в

Electronics Workbench, провести вимір значення  $K_{ou-експ} = \frac{U_{ввх}}{U_{вх}}$

занести в таб. 4.4. Привести осцилограми вхідного й вихідного сигналу дати пояснення виміру значення  $K_{ou-експ}$ .

Таб.4.3

$K_{ou}$	68	26	120	54	110	34
$E$ В	12	15	9	10	16	6
$R_{вх}$ кОм	22	4	13	16	10	20
$U_{вх}$ мВ	5	12	23	3	8	77

2.3. За результатами експериментальних даних для схеми операційного підсилювача перевірити виконання формули розрахунків  $K_{ou} = -\frac{z_{oc}}{z_1}$

і допущення параметрів підсилювача  $U_d \approx 0$ , зробити виводи.

Таб. 4.4.

Спосіб	$U_{вх}$ , В	$U_{ввх}$ , В	$K_{ou}$	$U_d$ , В	$I_{oc} \cdot 10^{-6}$ А	R1	Roc
--------	--------------	---------------	----------	-----------	--------------------------	----	-----

визначення величин							
Розрахунки				–			
Екперимент							

2.4. Змінюючи значення опорів зворотного зв'язку  $Z_{oc}$  провести вимірів коефіцієнта підсилення схеми ОУ рис.. 4.6 і перевірити виконання формули розрахунків  $K_{oy} = -\frac{Z_{oc}}{Z_1}$ .

2.5. Тому що входи ідеального ОУ не споживають струму, перевірити виконання формули розрахунків струму в ланцюзі зворотного зв'язку

$$I_{ocR1} = I_{ex} = \frac{U_{ex}}{R_1}, I_c = \frac{U_{вых}}{R_{oc}}, \text{ і виконання } U_d \approx 0. \text{ Занести результати}$$

вимірів у таб. 4.4.

3. Дослідженн схеми суматор з масштабними коефіцієнтами.

3.3. Створити модель у середовищі Electronics Workbench відповідно до варіанта завдання таб.4.5, попередньо розрахувавши значення опорів  $R_1, R_2, R_3, R_{oc}$ .

3.4. Зібрати модель суматора рис. 4.8 в Electronics Workbench, провести виміру результату  $U_{вых}$  занести в таб. 4.6. Привести осцилограми вхідного й вихідного сигналу дати пояснення виміру значення  $U_{вых}$ .

3.5. Розрахувати коефіцієнт підсилення окремо для кожного входу

$$K_i = -\frac{Z_{oc}}{Z_i}$$

Таб.4.5

$E1$ В	2	5	$2\sin(\omega t)$	10	6	2
$E2$ В	-7	3* П-Имп	$-3\sin(\omega t)$	-4* ир-Имп	-5	-6* П-Имп
$E3$ В	4	2	$5\sin(\omega t)$	-2	-1	1* ир-Имп
$R_1$ кОм	22	4	13	16	10	20
$R_2$ кОм	12	7	4	9	2	5
$R_3$ кОм	5	6	7	8	9	3
$R_{oc}$ кОм	100	120	90	160	120	90

Таб. 4.6

Спосіб визначення величин	$U_{BK}, B$	$U_{B\bar{B}K}, B$	$Kou1$	$Kou2$	$Kou3$	
Розрахунки				—		
1						
2						
3						
Екперемент						
1						
2						
3						

### Порядок оформлення звіту та його представлення і захист.

Результати проведеної лабораторної роботи оформлюються протоколом. Він повинен містити такі дані:

- 1) тема лабораторної роботи;
- 2) мета лабораторної роботи;
- 3) короткі теоретичні відомості;
- 4) порядок проведення лабораторної роботи;
- 5) таблицю результатів досліджень;
- 6) висновки.

Заключний звіт містить самі істотні відомості по проектуванню імітаційних моделей, налагодженню параметрів блоків, налагодженню й верифікації. Додаються також результати досліджень у вигляді таблиць. Відомості по моделях і блокам повинні бути достатніми для відтворення моделей, а отримані результати повинні бути обґрунтовані. Промоделювати, показати викладачеві, а потім зберегти модель під іменем **Lab\_ПРИСМОС№\_ім'я студента**.

## Лабораторна робота №5

«Дослідження компараторів та одновібраторів на операційних підсилювачів»

**Мета роботи** – визначення, вивчення й аналіз схем компараторів і одновібраторів або очікуваний мультівібратор та вимірювання швидкості наростання вихідної напруги.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** Під час проведення лабораторної роботи студент повинен:

**знати:**

- призначення й класифікації елементів технічної електроніки;
- типові схемотехнічні рішення щодо схем на операційних підсилювачах і логічних елементах;
- основи аналізу базових елементів і пристроїв, що становлять сучасні інформаційні системи;
- метод розрахунку електричних кіл постійного та змінного струму.

**уміти:**

- вибирати й використати базові елементи радіоелектронних пристроїв;
- використовувати основні методи аналізу й синтезу електронних систем обробки інформації,
- здійснювати необхідні розрахунки;
- використовувати комп'ютерне моделювання електронних елементів і пристроїв для дослідження їхньої роботи.

**Теоретичні відомості.** *Аналогові компаратори* призначено для порівняння двох аналогових сигналів між собою або **одного** вхідного аналогового сигналу із заданим еталонним **рівнем**. Функціональне призначення компараторів **полягає** в зміні **стану** виходу при **переході** вхідної напруги **деякого** граничного значення.

**Компаратори** являють собою спеціалізовані ОУ з диференціальним входом і високим коефіцієнтом підсилення й швидкодією без зворотного зв'язку. Звичайно вони виготовляються у вигляді інтегральних схем. На входи компаратора надходять аналогові сигнали, а з виходу знімаються напруга  $+E_n$  або  $-E_n$ , тобто знімається “0” або “1”. Основними параметрами компаратора є: чутливість, швидкодія й навантажувальна здатність. Компаратори бувають однопорогові й двупорогові. На рис.5.1 представлена схема однопорогового компаратора і його передатна характеристика.

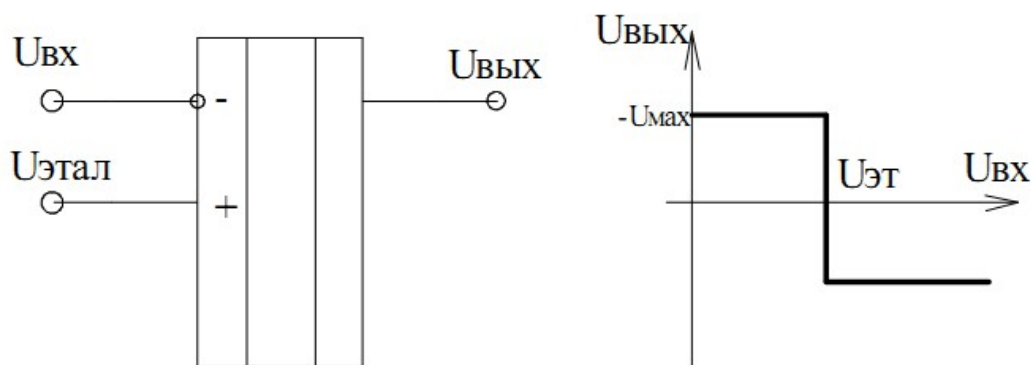


Рисунок 5.1 – Однограничний компаратор і його передатна характеристика.

Використання різних входів ОУ для подачі вхідного сигналу дозволяє реалізувати фіксацію рівня вхідного сигналу позитивним або негативним переходом напруги на виході компаратора. Компаратор є детектором позитивного й негативного рівня вхідної напруги. Граничний рівень вхідної напруги задається напругою зсуву  $E_{эт}$ , подаваний на вхід, що інвертує, ОУ. Компаратор рис 5.1 дозволяє фіксувати вхідна напруга в певному діапазоні значень. Якщо вхідна напруга змінюється в межах граничного значення  $U_{вх} < E_{эт}$ , установлювані зовнішніми елементами схеми, то вихідна напруга має низький рівень. При виході за межі встановлених значень  $U_{вх} > E_{эт}$  вихідна напруга переходить на високий рівень.

При роботі з компараторами можуть виникнути неприємності, що проявляються в тому, що замість однократної зміни рівня вихідної напруги при досягненні вхідною напругою граничного значення можуть мати місце швидкі коливання між рівнями вихідної напруги, особливо в тому випадку, коли у вхідному сигналі присутній значний шум рис.5.2. При цьому явищі може порушуватися нормальне функціонування деяких наступних пристроїв, наприклад лічильником імпульсів. Можна уникнути цього, якщо характеристика компаратора має гістерезис. Гістерезисом називається відмінність у відповідній реакції схеми під впливом вхідної напруги.

Одним з таких схем є тригер Шмидта, який має два пороги компарации, амплітуда будь-якого сигналу перешкоди повинна перевищувати різницю порогів напруги для того, щоб відбулося багаторазове перемикання стану вихідної напруги.

Компаратор, побудований на основі тригера Шмидта знаходить широке застосування для відновлення строго прямокутної форми сигналу трансльованого по довгій неузгодженій лінії зв'язку. Гранична напруга компаратора задається, як правило, рівним половині амплітуди вхідного сигналу. Це робиться для того щоб запобігти викривленню тривалості сигналу. Тригер Шмидта має як позитивне  $VT+$  так і негативне  $VT-$  зсув рівня граничної напруги.

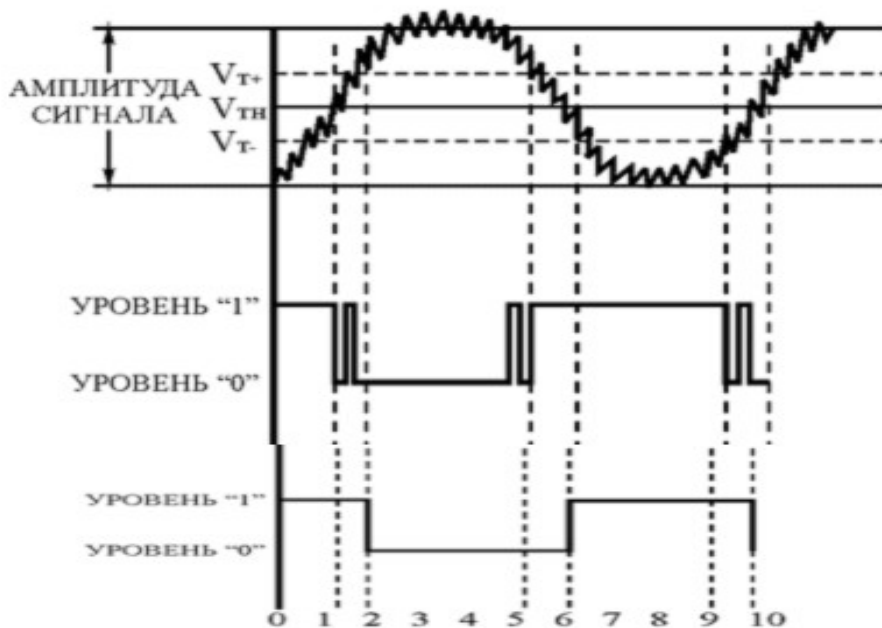


Рисунок 5.2 – Тимчасові діаграма роботи однопорогового й двупорогового компаратора, тригера Шмидта.

На рис.5.3 наведена схема двупорогового компаратора, що представляє собою тригер Шмидта побудованого на ОУ. Компаратор охоплюється позитивним зворотним зв'язком через дільник напруги  $R_1, R_2$ . Міняючи співвідношення дільника  $R_1, R_2$ , можна змінювати напругу спрацьовування  $U_{пор}$

$$U_{пор} = U_{ввых} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

Звичайно  $U_{ввых} \approx +E_{п}$  або  $-E_{п}$ .

$$U_{пор2} = +E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_{пор1} = -E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

При  $R_2=0$ , компаратор стає однопороговим.

Напруга гістерезису визначається  $\Delta U = U_{пор2} - U_{пор1}$ . У цьому випадку граничні напруги симетричні щодо нульового потенціалу.

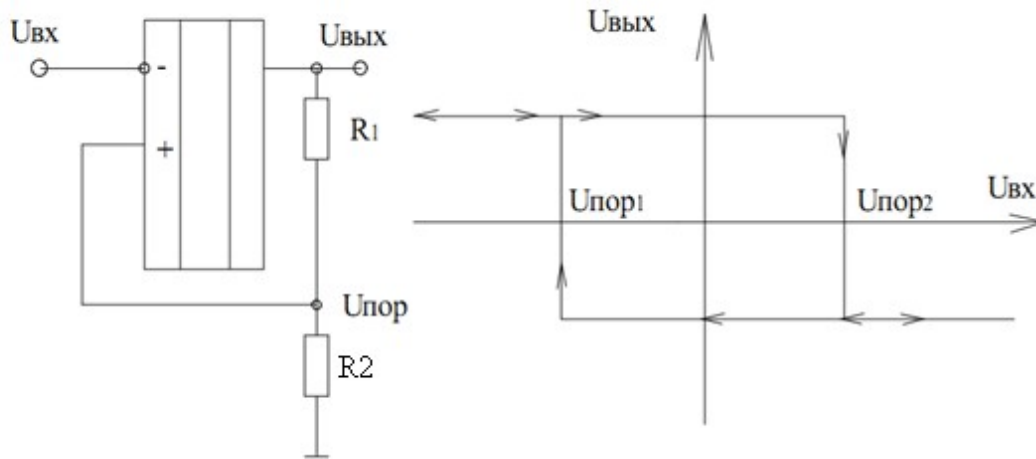


Рисунок 5.3 – Двупороговий компаратор і його передатна характеристика.

Передатну характеристику можна переміщати вліво й вправо, подачею додаткової напруги  $U_{см}$  на інверсний вхід компаратора (рис. 5.4). Гранична напруга спрацьовування буде визначатися:

$$U_{пор2} = U_{см} + E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_{пор1} = U_{см} - E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

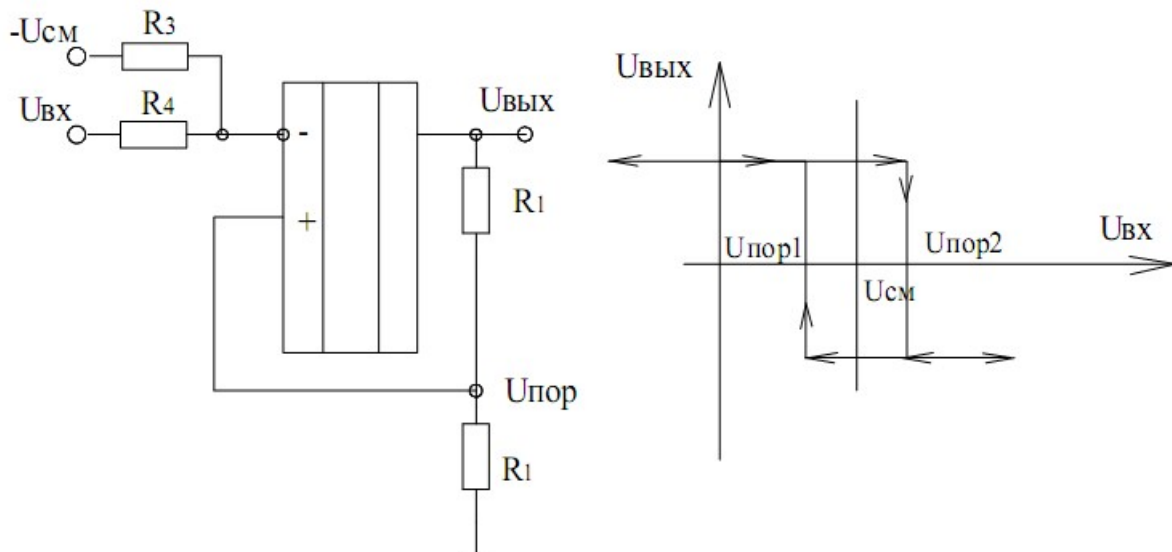


Рисунок 5.4 – Двупороговий компаратор і його передатна характеристика при  $U_{см}$ .

### Приклад

Розрахувати двупороговий компаратор і зібрати схему (мал. 4.4) для наступних даних: власний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача  $A2 \cdot 10^5$ ; струм зсуву  $I_{см} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ А}$ , напруга живлення  $E_{п} = 20 \text{ В}$  гістерезис по напруги



$\Delta U_{0.4B}$ , напруга зсуву петлі гістерезису  $U_{см} = 2 \text{ В}$ , амплітуда сигналу функціонального генератора 3 В. У процесі розрахунків визначити:  $R_1, R_2$  і гранична напруга спрацьовування  $U_{пор2}, U_{пор1}$ . Розрахунок  $R_1, R_2$  аналогічн метод розрахунок, що неінвертуючого ОУ, с учетом требования к

$I_{R1R2} = 20 \cdot I_{см}$  Тоді  $(R_2 + R_1)_{max} = \frac{E}{20 \cdot I_{см}}$ . Для операційного підсилювача

$\mu A741C$   $I_{см} = 200 \text{ на}$ , при  $E=20 \text{ В}$  одержуємо  $(R_2 + R_1)_{max} = 500 \text{ кому}$ . з

урахуванням визначення  $U_{пор2} = +E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2}$  і  $U_{пор2} = \frac{\Delta U}{2}$  знаходимо

$R_2 = \frac{U_{пор2} \cdot (R_1 + R_2)}{+E_{п}}$ . Підставляючи значення

$U_{пор2} = 0.2 \text{ В}, U_{пор1} = -0.2 \text{ У}$  й  $E_{п} = 20 \text{ У}$  и з урахуванням вимог на суму

резисторів задамо  $(R_2 + R_1) = 101 \text{ кому}$ , тоді  $R_2 = 1 \text{ кому}$ . Зміщені граничні

напруги будуть рівні  $U_{пор2} = U_{см} + E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} = 2.2 \text{ У}$  й

$U_{пор1} = U_{см} - E_{п} \cdot \frac{R_2}{R_1+R_2} = 1.8 \text{ В}$ .

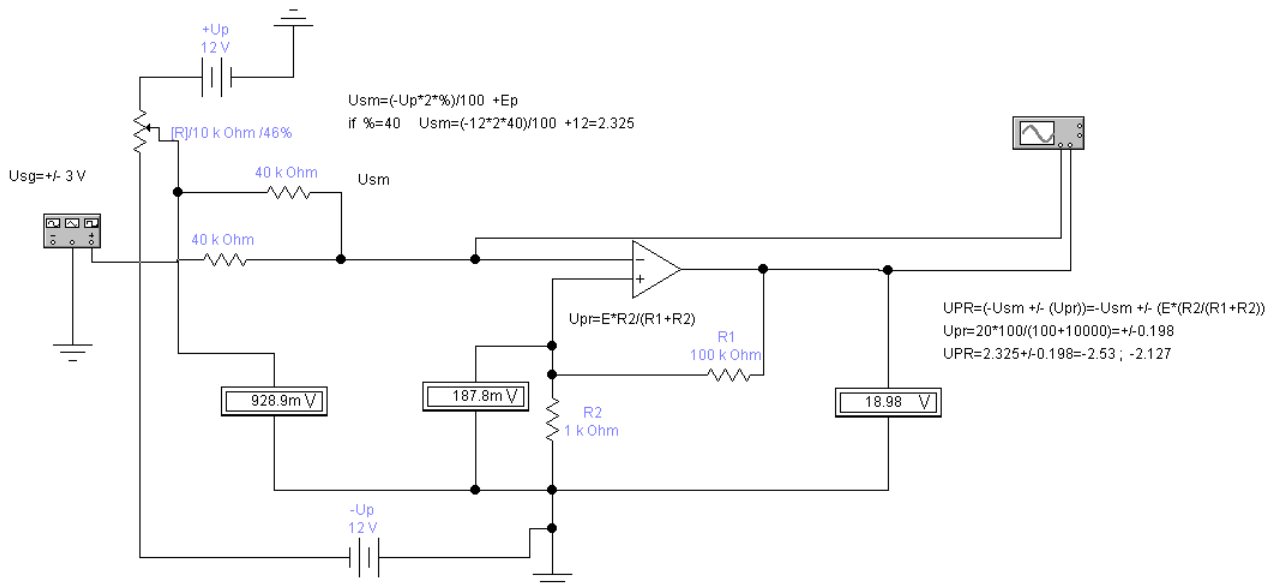


Рисунок 5.5 – Модель двухпорогового компаратора.

Створюємо модель двухпорогового компаратора в Electronics Workbench по розрахункових параметрах і визначаємо експериментально граничні напруги спрацьовування й гістерезис напруги, побудуємо передатну характеристику схеми компаратора. По осцилограмме вихідного сигналу вимірюємо швидкість наростання вихідної напруги.

**Одновібратор** призначений для формування прямокутного імпульсу необхідної тривалості при подачі на його вхід короткого імпульсу, що запускає. Схема одновібратора побудована на основі розглянутої схеми мультивібратора, у якій є два тимчасово стійкі стани. Однак, на відміну від мультивібратора, один стан є стійким, а інший стан – тимчасово стійким. Одновібратор називають мультивібратором, що часто чекає. Стійкий стан схеми характеризує вихідний режим роботи одновібратора. Нестійкий стан настає із приходом вхідного імпульсу, що запускає. На рис.5.6 наведена найпростіша схема одновібратора на одному ОУ й тимчасові діаграми його роботи.

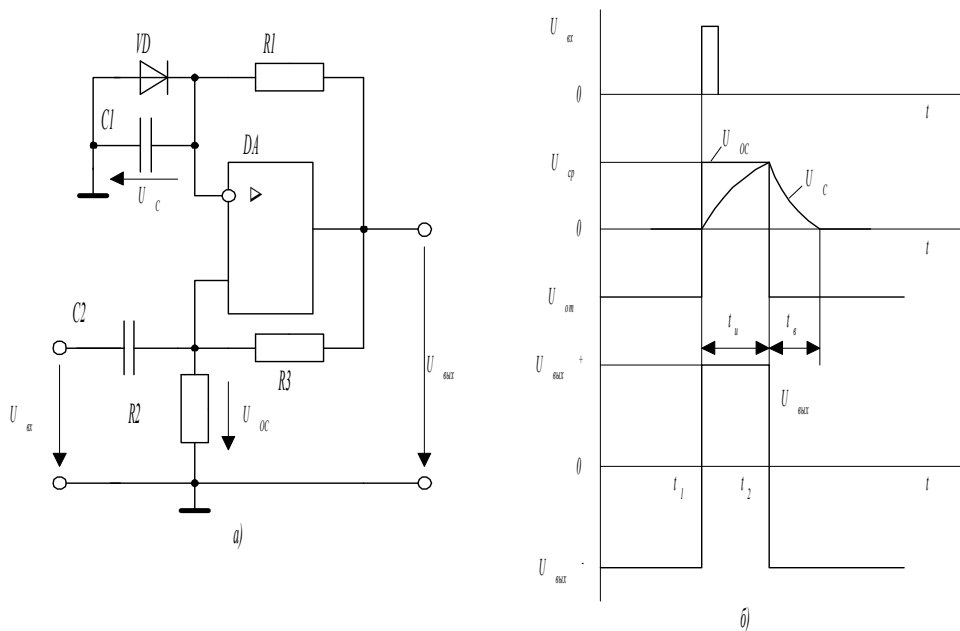


Рисунок 5.6 – Схема й тимчасові діаграми одновібратора на ОУ

У схемі одновібратора для створення режиму, що чекає, роботи паралельно конденсатору  $C1$  включений діод  $VD$ . У вихідному стані напруга на виході одновібратора рівно  $U_{\text{ВЫХ}}^-$ , що визначає напругу на вході, що неінвертує,

$$U_{\text{ос}} = U_{\text{от}} = U U_{\text{ВЫХ}}^-, \text{ де } Y \frac{R_2}{R_2 + R_3}, U_{\text{от}} - \text{напруга відпускання. Напруга на вході, що}$$

інвертує, дорівнює падінню напруги на відкритому діоді, тобто близько до нуля. Конденсатор  $C1$  виряджений, тому що діод  $VD$  відкритий і перешкоджає

його заряду вихідною напругою через резистор  $R1$ .  $U_{oc} < U_c$  отже компаратор перебуває в стані негативної напруги. У момент часу  $t_1$  на вхід одновібратора надходить короткий позитивний імпульс із амплітудою  $U_{вх} > \gamma U_{вх}^-$ . При цьому умов тригер Шмидта стрибок переходить у протилежний стан  $U_{вх}^+$ , а на вході, що неінвертує,  $U_{oc} = U_{cp} = \gamma U_{вх}^+$ . Позитивна вихідна напруга ОУ замикає діод і конденсатор  $CI$  починає заряджатися через резистор  $R1$ . У момент  $t_2$ , коли  $U_c \Rightarrow U_{вх}^+ \geq U_{oc}$ , відбувається зворотне перемикання тригера Шмидта. Із цього моменту починається етап відновлення одновібратора у вихідний стан, протягом якого конденсатор  $CI$  розряджається через резистор  $R1$ . У момент, коли напруга на конденсаторі  $U_c$  стає приблизно рівною нулю, відкривається діод  $VD$  і подальшої зміни  $U_c$  не відбувається. Тривалість імпульсу одновібратора

$$t_u = R_1 C_1 \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right).$$

Час відновлення одновібратора

$$t_g = R_1 C_1 \ln \frac{2R_2 + R_3}{R_2 + R_3}.$$

Через час  $t_g$  одновібратор готовий до приймання наступного імпульсу. Регулювання тривалості імпульсу одновібратора  $t_u$  може здійснюватися в такий спосіб:

- зміною  $R1$  або  $CI$ , при цьому змінюється швидкість заряду конденсатора  $CI$ ;

$$\frac{R_2}{R_3}$$

- зміною співвідношення  $\frac{R_2}{R_3}$ . При цьому змінюється напруги

спрацьовування компаратора  $U_{cp}$  а з ним і час у пліні якого напруги на конденсаторі наросте до величини  $U_{cp}$ . Природно, що й амплітуда вхідного сигналу повинна бути більше  $U_{от}$ , щоб забезпечити перемикання компаратора в початковий стан формування імпульсу.

### Приклад

Розрахувати одновібратор для формування імпульсу тривалістю 320 мксек і зібрати схему (рис. 5.7) для наступних даних: власний коефіцієнт підсилення операційного підсилювача  $A2 \cdot 10^5$ ; струм зсуву  $I_{см} = 2 \cdot 10^{-7}$  А, напруга живлення  $Eп = 20$  В, частота імпульсів, що запускають, 1 кГц при амплітуді 3 В. У процесі розрахунків визначити: час елементи, що задають, тривалості імпульсу  $R1$ ,  $CI$  і елементи схеми  $R2$ ,  $R3$  гранична напруга спрацьовування й відпускання.

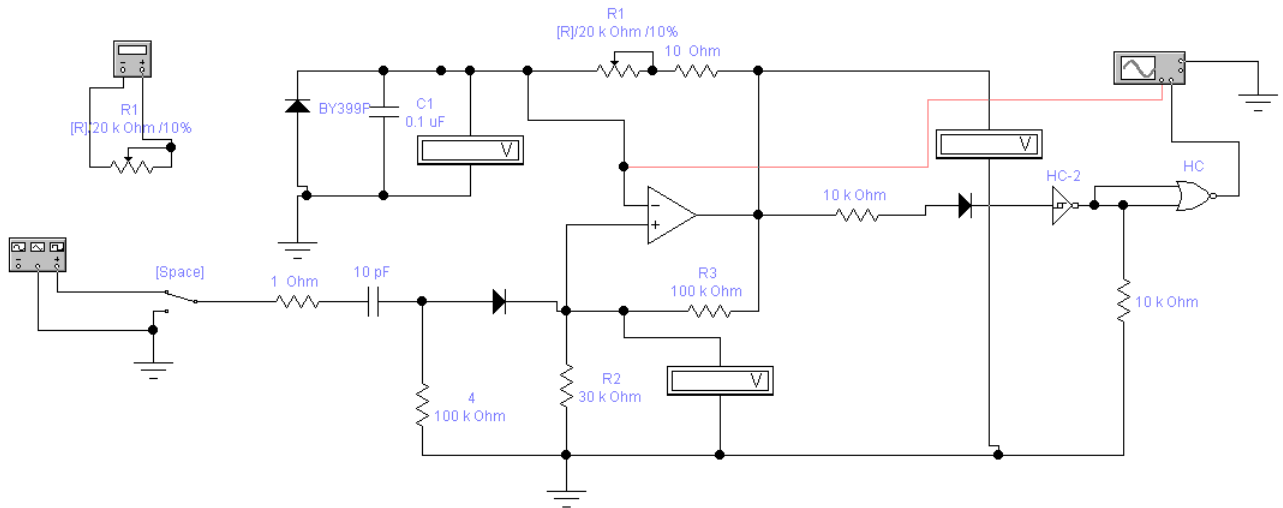


Рисунок 5.7 – Модель одновібратора.

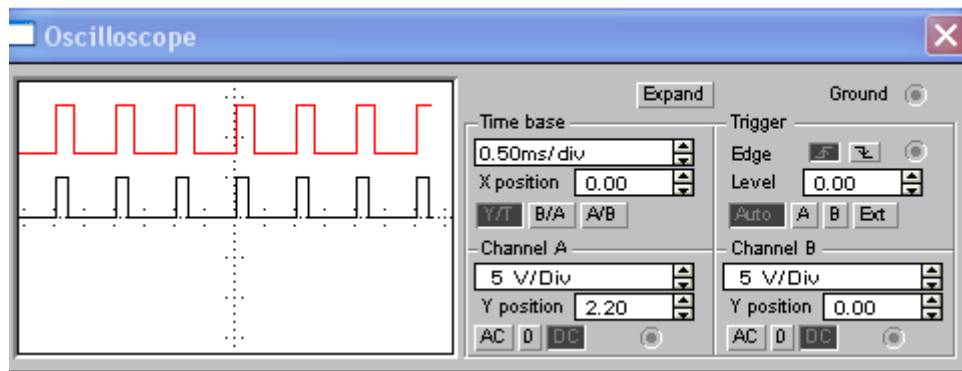


Рисунок 5.8 – Осцилограма роботи моделі одновібратора

У процесі розрахунків визначити:  $R_3$ ,  $R_2$  для граничного напруга відпускання, яка визначається необхідністю перевищення порога відкритого діода приблизно рівне нулю. На виході диференціального ланцюга  $R_4=50$  кому й  $C_2=100$  пФ формується імпульсу розмаху 5 В, для спрацьовування компаратора задамо поріг рівня відпускання  $U_{от} = -4.7$  В. З урахуванням значення вхідного струму зсуву  $I_{см} = 2 \cdot 10^{-7}$  А задамо  $R_2+R_3=100$  кому.

Результату з визначення напруги відпускання  $U_{от} = \frac{R_2 || R_4}{R_2 || R_4 + R_3} \cdot U_{ВЫХ}^-$  знайдемо

$R_3=70$  кому й  $R_2=30$  кому. Виходячи з визначення тривалості імпульсу одновібратора

$$t_u = R_1 C_1 \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right) = 320 \mu s$$

Постійна часу інтегруючого ланцюга  $\tau R_1 \cdot C_1 = \frac{t_u}{\ln(1 + \frac{R_2}{R_3})} = 0.01$  мксек задаючи

значення ємності 0.1 мкФ знаходимо  $R_1 = 10$  кОм.

Створюємо модель одновібратора в Electronics Workbench по розрахункових параметрах і визначаємо експериментально граничні напруги спрацьовування й відпускання. По осцилограмме вихідного сигналу вимірюємо тривалість формованого імпульсу, проводимо аналіз схеми сполучення рівня одновібратора з рівнем мікросхем TTL цифрової логіки.

### **Запитання для самоперевірки**

6. Опишіть схему триггера Шмидта і поясніть вид його передаточної характеристики.
7. Поясніть вид передаточної характеристики компаратора.
8. Як можна збільшити поріг спрацьовування і відпускання триггера Шмидта?
9. Поясніть принцип роботи одновібратора на ОУ.
10. Поясніть, як можна зменшити довжину імпульсу одновібратора, використовуючи тільки резистори  $R_2$  і  $R_3$ .
11. Поясніть з допомогою, яких елементів можна змінити довжину імпульсу одновібратора.
12. Де в EWB знаходиться ОП?

### **Опис приладів, устаткування та інструментів, які використовуються при виконанні лабораторної роботи:**

7. Персональний комп'ютер.
8. Програмне забезпечення MathCad.
9. Програмне забезпечення Electronics Workbench.

### **Забороняється:**

1. Проводити вимірювання струмів і напруг лабораторної установки з несправними приладами.
2. Використовувати для вимірювань нестандартні прилади.
3. Працювати з увімкненими приладами без діелектричних ковриків.

4. Проводити вимірювання в лабораторній установці без діючої системи захисту, яка забезпечує безпеку шляхом автоматичного вимкнення ланцюгів електроживлення.

### **Порядок проведення лабораторної роботи**

1. Перед виконанням лабораторної роботи проводиться усне опитування теоретичного матеріалу та визначення мети лабораторної роботи.
2. Викладачем проводиться інструктаж з техніки безпеки. Після чого студент розписується в журналі з „Техніки безпеки”.
3. Якщо студент одержав незадовільну оцінку з теоретичного матеріалу, то до виконання лабораторної роботи він не допускається.
4. Кожен студент виконує лабораторну роботу індивідуально.

### **Методика виконання лабораторної роботи.**

#### *1. Дослідження схеми двухпорогового компаратора.*

1.1. Створити модель у середовищі Electronics Workbench відповідно до варіанта завдання таб.5.1, попередньо розрахувавши значення опорів  $R_1, R_2$ .

1.2. Зібрати модель двухпорогового компаратора рис. 5.5 в Electronics Workbench, провести виміру граничних напруг  $U_{нор1}, U_{нор2}$  занести в таблицю 5.2, зрівняти з розрахунковими значеннями порога

$$U_{нор2} = +E_n \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad U_{нор1} = -E_n \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad \text{для розрахункових значень}$$

опорів  $R_2 = \frac{U_{нор2} \cdot (R_1 + R_2)}{+E_n}$ . Привести осцилограми вхідного й вихідного

сигналу дати пояснення виміру значення отриманих граничних напруг.

1.3. За результатами експериментальних даних для схеми двухпорогового компаратора побудувати передатну характеристику компаратора  $U_{вих} = f(U_{вх})$ .

Таб. 5.1.

$\Delta U$	0.4	1	0.8	1.2	0.6	0.5
$E_n$ В	12	15	9	10	16	6
$I_{см} 10^{-6} А$	2	4	3	6	1	2
Пилобразный сигн $U_{вх}$ В	1	3	2	3	2	1.6

Таб. 5.2.

Спосіб визначення величин	$U_{пор1}$ В	$U_{пор2}$ , В	R1	R2
Розрахунки				
Експеримент				

2. Дослідження схеми одновібратора на операційному підсилювача.

2.1. Створити модель у середовищі Electronics Workbench рис. 5.7 відповідно до варіанта завдання таб.5.3, попередньо розрахувавши значення опорів R1, C1, для частоти П-Образного сигналу 2 кГц і шпаруватість ~ 2.

2.2. Зібрати модель одновібратора в Electronics Workbench, провести виміру граничних напруг відпускання  $U_{от}$ ,  $t_u$ , R1, C1 і занести значення в таблицю 5.4, зрівняти з розрахунковими значеннями

$$U_{от} = \frac{R_2 || R_4}{R_2 || R_4 + R_3} \cdot U_{свих}^-, \quad t_u = R_1 C_1 \ln \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right).$$

2.3. За результатами зміни опору R1 побудувати характеристику

$$t_u = f(R_1)$$

Таб. 5.3

Тривалість формованого імпульсу $t_u$ мкс	150	400	300	250	200	350
П-Образний сигнал $U_{вх}$ , В	4	3	5	7	5	6

Таб. 4.

Спосіб визначення величин	$U_{от}$ , В	R2	R3	R1	R1	C1	$t_u$ мкс
Розрахунки							
Експеримент							

## **Порядок оформлення звіту та його представлення і захист.**

Результати проведеної лабораторної роботи оформлюються протоколом. Він повинен містити такі дані:

- 1) тема лабораторної роботи;
- 2) мета лабораторної роботи;
- 3) короткі теоретичні відомості;
- 4) порядок проведення лабораторної роботи;
- 5) таблицю результатів досліджень;
- 6) висновки.

Заключний звіт містить самі істотні відомості по проектуванню імітаційних моделей, налагодженню параметрів блоків, налагодженню й верифікації. Додаються також результати досліджень у вигляді таблиць. Відомості по моделях і блокам повинні бути достатніми для відтворення моделей, а отримані результати повинні бути обґрунтовані. Промоделювати, показати викладачеві, а потім зберегти модель під іменем **Lab\_ПриСМОС№\_ім'я студента.**



## Лабораторна робота № 6

### «Аналіз роботи аналого-цифрового перетворювача»

**Мета роботи:** ознайомиться й навчитися аналізувати схеми аналого-цифрового перетворювача.

**Завдання на підготовку до лабораторної роботи.** Під час проведення лабораторної роботи студент повинен:

**знати:**

- принципи побудови й роботи елементів сучасних радіоелектронних апаратур;
- елементну базу й методику синтезу цифрових пристроїв;
- про мультівібратори в інтегральному виконанні, спеціальні підсилювачі в інтегральному виконанні, компаратори й стабілізатори напруги, перетворювачі інформації, датчики;

**уміти:**

- вибирати й використовувати базові елементи радіоелектронних апаратур;
- використовувати основні методи аналізу й синтезу електронних систем обробки інформації;
- здійснювати необхідні розрахунки;
- використовувати комп'ютерне моделювання електронних елементів і пристроїв для дослідження їхньої роботи
- дослідження електронних пристроїв і логічних елементів за допомогою програми комп'ютерного моделювання Electronics Workbench

**Теоретичні відомості.** Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) і цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) застосовуються в інформаційно-вимірвальних системах, у технічному зв'язку, у цифровому телебаченні, у побутовій техніці й т.п.

**ЦАП з ваговими резисторами.** Цифро-аналогові перетворювачі використовуються для перетворення цифрового коду в аналоговий сигнал, наприклад, для управління в автоматичних системах виконавчими органами (електродвигунами, електромагнітами й т.п.).

Найбільш простий ЦАП з ваговими резисторами (рис. 6.1) складається із двох вузлів: резистивної схеми (матриці) на резисторах R1...R4 і підсумовуючий підсилювачі (ОП ОУ з резистором зворотного зв'язка R<sub>o</sub>). Опорна напруга U<sub>он</sub> (3 В) підключається до резисторів матриці перемикачами D, C, B і A, які управляються однойменними клавішами клавіатури й імітуючи перетворений код. Вихідну напругу U<sub>o</sub> виміряє мультиметр. Такий ЦАП ставиться до пристроїв прямого перетворення.

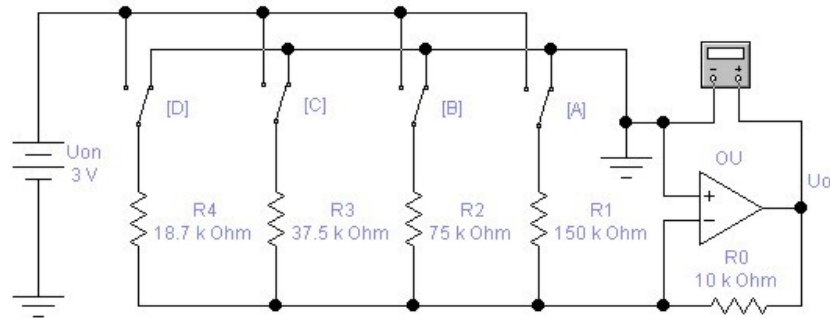


Рисунок 6.1 – ЦАП з ваговими резисторами.

Якщо всі перемикачі замкнуті на "землю", як показано на рис. 4.1 то напруга на вході й виході ОП дорівнює 0 В. Припустимо тепер, що перемикач А встановлений у положенні, що відповідає логічній 1. Тоді на вхід ОІ через резистор R1 подається напруга 3 В. Розрахуємо для цього випадку коефіцієнт підсилення напруги за формулою:  $D_O = R_o/R1 = 10000/150000 = 0,066$ . Звідси отримуємо, що вихідна напруга  $U_o = 0,066 \cdot 3 = 0,2$  В відповідає двійковій комбінації 0001 на вході ЦАП.

Подамо тепер на входи ЦАП двійкову комбінацію 0010: для цього встановимо перемикач В в положенні, що відповідає логічній одиниці, тим самим подамо на ОП через резистор R2 напругу 3 В. Для коефіцієнта підсилення в цьому випадку отримуємо  $D_O = R_o/R2 = 10000/75000 = 0,133$ . Помноживши цей коефіцієнт підсилення на величину вхідної напруги, знайдемо, що вихідна напруга дорівнює 0,4 В.

Таким чином, при переході до кожного чергового двійкового числа, імітованому ключами, вихідна напруга ЦАП збільшується на 0,2 В. Це забезпечується за рахунок збільшення Коефіцієнта підсилення напруги ОП при підключенні різних по опорі резисторів. Якби в схемі на рис. 6.1 ми підключили тільки один резистор R4 (за допомогою перемикача D), то тим

самим установили б коефіцієнт підсилення  $DO = 10000/18700 = 0,535$ : при цьому вихідна напруга ОП складе близько 1,6 В. Якщо всі перемикачі в схемі на рис. 4.1 встановлені в положенні, що відповідають логічним одиницям, вихідна напруга ОП дорівнює  $U_{on} = 3В$ , оскільки коефіцієнт передачі в цьому випадку дорівнює 1.

Схема ЦАП на рис. 6.1 має два недоліки: по-перше, у ній опір резисторів змінюються в широких межах, по-друге, точність перетворення невисока через вплив кінцевого опору транзисторних ключів у відкритому й закритому станах.

**ЦАП сходового типу.** Схема ЦАП такого типу (рис. 6.2) складається з резистивної матриці R-2R, що нагадує сходи, і підсумовуючого підсилювача. Перевага використання матриці полягає в тому, що в ній використовуються резистори тільки двох номіналів. Опір кожного з резисторів R1...R5 дорівнює 20 кОм, а резисторів R6...R8, R<sub>0</sub> – 10 кОм. Відзначимо, що опір горизонтально розташованих резисторів "сходів" рівно в 2 рази більше опорів вертикальних.

ЦАП сходового типу аналогічний ЦАП з ваговими резисторами. У розглянутому прикладі схеми використовуються опорна напруга 3,75 В. Перехід до кожної наступної двійкової послідовності на входах приводить до збільшення аналогового вихідного сигналу на 0,25 В. Опорна напруга обрана рівним 3,75 В з міркування зручності сполучення з ІМС сімейства ТТЛ при заміні ключів А...D такими ІМС.

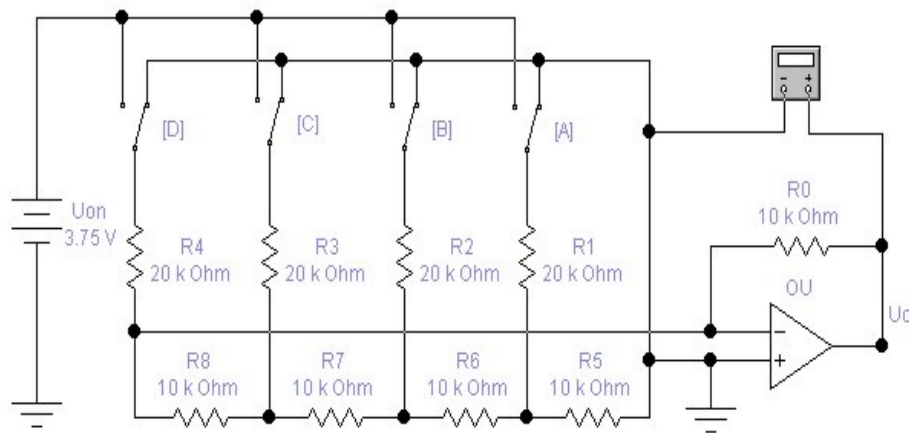


Рисунок 6.2 – ЦАП сходового типу.

Вихідна напруга ЦАП на рис. 4.2 визначається за формулою:

$$U_o = U_{on}R_o[S_12^{n-1} + S_22^{n-2} + \dots + S_i2^{n-i} + S_n]/R^{2n},$$

(4.1)

де  $S_i$  – значення цифрового сигналу (0 або 1) на  $i$ -му вході;

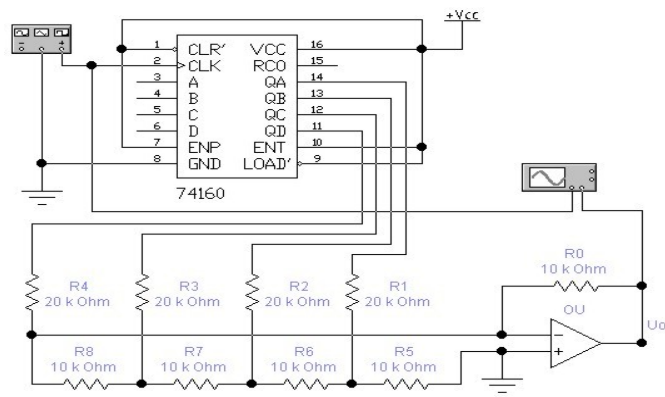
$n$  – число розрядів перетворення (для схеми на рис. 6.2  $n = 4$ );

$R$  – опір резистора матриці R-2R ( $R = 10$  кОм для схеми на рис. 6.2).

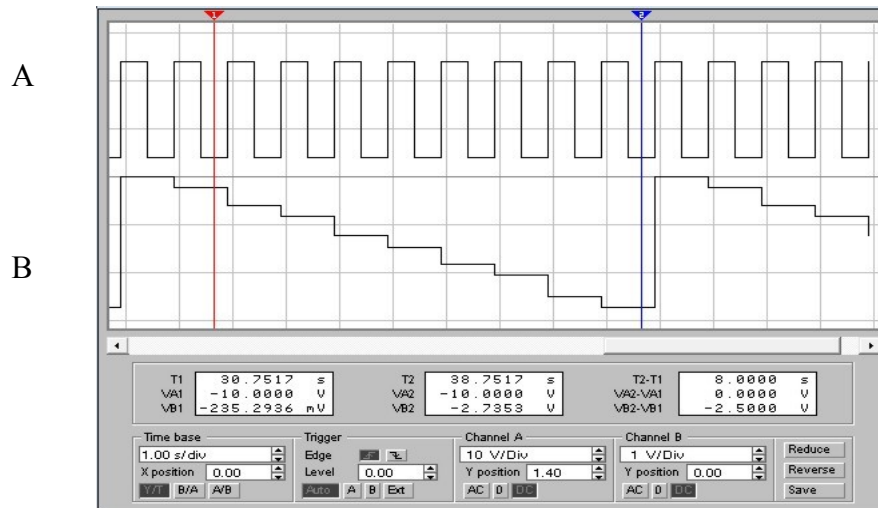
Варіант ЦАП з використанням як комутуючий пристрій двоїчно-десятькового лічильника 74160 показаний на рис. 4.3, *a*.

З порівняння ЦАП на рис. 4.2 і 4.3 видно, що в другому відсутнє джерело опорної напруги: його роль виконує сам лічильник-комутатор. Еквівалентне значення  $U_{on}$  можна отримати на підставі формули (4.1) і результатів осцилографічних вимірювань, показаних на рис. 4.3,б. Зокрема, максимальна вихідна напруга ЦАП  $V_{B2} = -2,8125$  В, мінімальне –  $V_{B1} = -0,3125$  В, їхня різниця –  $V_{B2} - V_{B1} = -2,45$  В.

**АЦП прямого перетворення.** АЦП прямого перетворення є найбільш простими й часто вбудовуються безпосередньо в датчики. Основним функціональним елементом таких АЦП є перетворювач електричної величини (струму, напруги, опору, ємності й ін.) у часовий інтервал або частоту. Прикладами таких перетворювачів може служити розглянутий нижче перетворювач постійної позитивної напруги в частоту (рис. 6.4 б). Для перетворення часового інтервалу або частоти в цифровий код, що по суті є кінцевим завданням будь-якого АЦП, виконується ЕОМ у випадку АСУ або додатковим пристроєм у випадку автономного АЦП. Приклади такого пристрою, що здійснює перетворення часового інтервалу в код, показаний на рис.6.4 *a*. В цьому пристрої часовий інтервал задається програмним ключем  $T$ , що імітує, наприклад, визначальну кількість імпульсів, що поступають на чотириохрозрядний лічильник з генератора опорної частоти  $U_s$ . Розглянутий пристрій по суті є частотоміром. Якщо перетворена величина прямопропорційна періоду, то відповідно додатковий пристрій повинне забезпечити перетворення періоду в код.



a)



б)

Рисунок 6.3 – Чотирирозрядний ЦАП сходового типу:  
 а – схема на базі лічильника 74160; б– осцилограма сигналів на його рахунковому вході (А) і виході ЦАП (В).

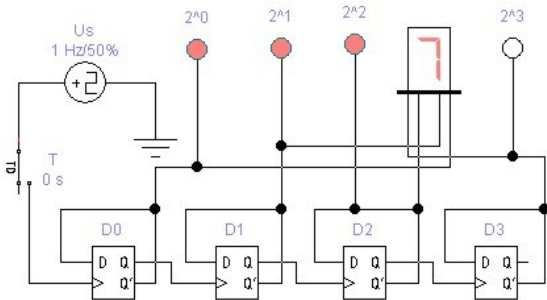
Перетворювач на рис. 6.4 б виконаний на двох ОП: підсилювач  $OU_1$  використовується в інтеграторі, а  $OU_2$  – у регенеративному компараторі з гістерезисом. Коли вихідна напруга компаратора  $U_f$  має максимальне позитивне значення  $U_1$ , діод  $VD$  зміщений у зворотному напрямку й напруга  $U_s$  на виході  $OU_1$  (див. осцилограми на рис. 6.4 в) зменшується за лінійним законом зі швидкістю, обумовленою амплітудою вхідного позитивного сигналу  $U_i$ , доти, поки не досягне значення  $U_1 R_1 / R_2$ . У цей момент компаратор перемикається. У інший стан, при якому напруга на його виході дорівнює максимальному негативному значенню  $U_2$ , при цьому діод  $VD$  відкривається й вихідна напруга

інтегратора швидко наростає до значення  $U_2 R_1 / R_2$ , після чого компаратор повертається в початковий стан і цикл повторюється.

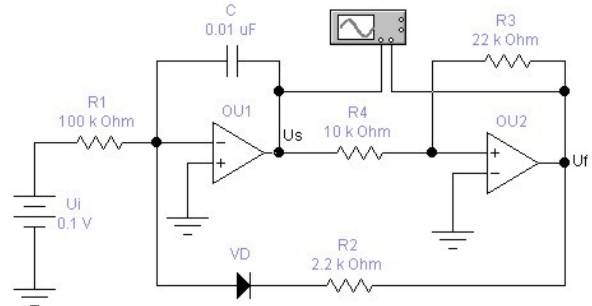
Оскільки час наростання вихідної напруги інтегратора значно менший за час спаду, який обернено пропорційно до амплітуди вхідного сигналу частота циклів повторення  $F$  буде прямопропорційна вхідній напрузі. Нехтуючи власним часом перемикавання компаратора, можна записати наступне вираження для частоти вихідних імпульсів:

$$F = U_i \cdot R_3 / [R_1 \cdot CR_4(U_1 - U_2)] \approx 1000 \cdot U_i. \quad (4.2)$$

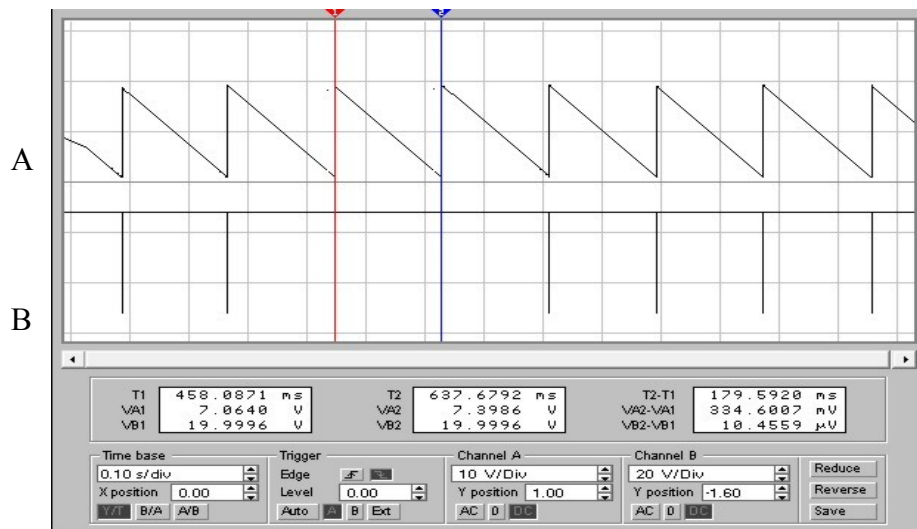
Насправді розмах напруги  $U_s$  на виході  $OU_1$  трохи більше величини  $(R_1/R_2)(U_1 - U_2)$  через відмінного від нуля значення часу перемикавання компаратора, а частота відповідно менше значення, яке визначається виразом (4.2), причому ця розбіжність буде особливо значною при великих амплітудах вхідного сигналу.



a)



б)



в)

Рисунок 6.4 – АЦП прямого перетворення:  
*a* – схема на базі лічильника; *б* – схема на базі ОП;  
*в* – осцилограма сигналів на виході  
інтегратора (В) і компаратора (А).

З зазначеними на рис. 6.4 *б* номіналами елементів схема повинна забезпечувати лінійність перетворення не гірше  $\pm 1\%$  в діапазоні зміни вхідних напруг 20 мВ...10 В, при цьому частота вихідних імпульсів  $F$  повинна змінюватися від 20 Гц до 10 кГц.

**Перетворювач на інтегральному таймері.** Інтегральні таймери є найбільш яскравими представниками пристроїв змішаного типу, з них найбільш популярним є таймер NE555. З огляду на його широке застосування в різних апаратурах промислового й побутового призначення, розглянемо основні характеристики й особливості застосування NE555.

Функціональна схема таймера та його графічне позначення в програмі EWB показана на рис. 6.5. Таймер має два компаратори на  $OU_1$  і  $OU_2$ , RS-тригер, що інвертує підсилювач потужності UM, транзистори  $VT_1$ ,  $VT_2$  для кола розряду й примусового скидання відповідно. Внутрішній резистивний дільник задає граничні напруги, які дорівнюють  $2U_{cc}/3$  для  $OU_1$  і  $U_{cc}/3$  для  $OU_2$ .

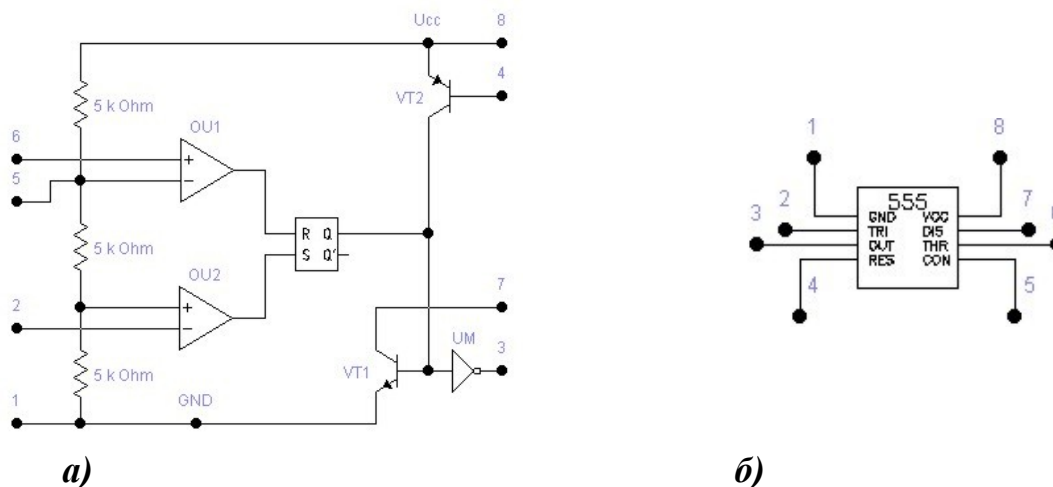


Рисунок 6.5 – Функціональна схема таймера NE555 (*a*) і його графічне зображення в програмі EWB (*б*).

Напруга живлення таймера  $U_{cc}$  – 5...16,5 В, струм навантаження (вивід 7) – 200 мА, що дозволяє керувати безпосередньо лампочками або

електромагнітними реле. Вихідний опір близько 10 Ом як для низького, так і для високого рівнів вихідної напруги. Запуск таймера здійснюється подачею на вивід 2 напруги меншій за  $U_{cc}/3$  (це коло звичайно називають тригерним входом). При високій напрузі на виведенні 2 станом виходу таймера можна управляти за допомогою компаратора OU1 по виведенню 6, що називається зазвичай пороговим входом. Вхідний струм, що втікає в OU<sub>1</sub> (вивід 6) і витікає з OU<sub>2</sub> (вивід 2), не перевищує 0,5 мкА. Для скидання таймера, тобто встановлення на його виході низької напруги незалежно від напруги на виводах 2 і 6 використовується вивід 4. Якщо напруга на цьому виводі менше 0,4 В, напруга на виході дорівнює 0,1...0,2 В, а при напрузі більше 1 В коло скидання виключений і не впливає на роботу таймера. Крім низькоомного виходу (вивід 3) таймер має й допоміжний високоомний вихід (вивід 7, колектор транзистора VT1), що звичайно використовується для організації зворотного зв'язка з виходу на входи (виводи 2 і 6) таймери. Припустима зміна напруги на виводах 2, 4, 6 і 7 перебуває в межах 0...16,5 В. У таймері є доступ через вивід 5 до входів внутрішніх компараторів, на які подані граничні напруги. Цей вивід від резистивного дільника дозволяє змінювати граничні напруги компараторів при постійній напрузі живлення й тим самим додатково управляти роботою таймера. Щоб уникнути впливу зовнішніх перешкод і пульсації напруги живлення на точність роботи таймера, рекомендується шунтувати виведення 5 конденсатором ємністю 0,01 мкФ.

Тимчасові параметри таймера незначно залежать від змін  $U_{cc}$  і температури й повністю визначаються компараторами й технологією їхнього виготовлення. У таймерах, виготовлених за КМОП-технологією, що відрізняються гіршим узгодженням параметрів парних транзисторів, залежність характеристик від  $U_{cc}$  і температури значно вище, ніж у таймерах, виготовлених за біполярною технологією.

Щоб параметри часовизначального RC - кола не впливали на точність формування часових інтервалів, необхідно обмежити діапазон зміни опору R і ємності C. Максимальний опір R визначається вхідним струмом  $I_i$  компараторів. Для формування стійких часових інтервалів досить вибрати максимальний опір R з умови  $R_{max} < U_{cc}/I_i$ ; при  $U_{cc} = 10$  В і  $I_i = 0,5$  мкА  $R_{max} = 20$  МОм. При включенні таймера за схемою мультівібратора, коли виводи 2 і 6 об'єднані, таймер зберігає працездатність при  $R > R_{max}$ , при цьому не рекомендується використовувати часовизначальні резистори з опором  $R > 10$  МОм.



Мінімальний опір  $R$  визначається максимально припустимим струмом, що протікає через транзистор  $VT_1$  таймера при його насиченні. Хоча припустимий вихідний струм встановлюють як правило на рівні 100 мА, не рекомендується використовувати малі опори  $R$  у сполученні з більшими ємностями  $C$ . Пояснюється це тим, що при розряді конденсатора великої ємності транзистор  $VT_1$  переходить у режим насичення через кінцевий час, протягом якого він перебуває в активному режимі при напрузі колектор-емітер  $U_{ке} = U_{cc}/2$ , і при  $R_{min}$  він може вийти з ладу через велику потужності, що розсіюється на ньому. Тому при формуванні малих часових інтервалів рекомендується обмежитися значенням  $R_{min} = 1$  кОм й вибрати виходячи з цього ємність  $C$ . Якщо ж таймер застосовується в схемі, де  $C < 100$  пФ, то опір  $R$  може бути зменшене до 150 Ом.

Мінімальна ємність часовизначального конденсатора  $C$  повинна бути значно більше змін ємності виводів 2, 6 і 7, що залежить від напруги на них. Оскільки ці зміни при перезаряді  $C$  не перевищують декількох пікофарад, при формуванні точних часових інтервалів доцільно вибирати  $C < 100$  пФ. Можна застосовувати конденсатори  $C$  як завгодно великої ємності, якщо їхній струм витоку малий. Фактично ж, чим більше ємність конденсатора, тим більше його струм витоку; для нормальної роботи таймера необхідно, щоб цей струм не перевищував зарядний струм через резистор  $R$ . Для формування точних ( $< 1\%$ ) часових інтервалів струм витоку через  $I_c$  повинен бути більше ніж на два порядки менше зарядного струму.

Вихідний підсилювач, що інвертує, таймера УМ працює в режимі АВ, внаслідок чого на перехідній характеристиці виникає "полиця" тривалістю 10...20 нс при напрузі 1,5 В. Якщо таймер навантажений на швидкодіючі ТТЛ-схеми, то наявність такої "полиці" неприпустимо, тому що вона може викликати помилкове спрацьовування логічного елемента. Для усунення цього недоліку необхідно вихід таймера зашунтувати конденсатором ємністю близько 100 пФ.

Перетворювачі на інтегральних таймерах відрізняються досить широким частотним діапазоном. Так, при включенні таймера за схемою самозбудного мультівібратора можна отримати лінійний перетворювач напруги в частоту, що змінюється від 10 Гц до 10 кГц, причому цей діапазон може бути легко пересунутий у будь-яку сторону заміною одного з елементів схеми. На жаль, модель таймера NE555 у програмі EWB далека від досконалості й не дозволяє це реалізувати. Попереднє дослідження перетворювача, схема якого наведена

на рис. 4.6, показало, що перетворена напруга повинне бути більше напруги живлення  $U_{cc}$ . Крім того, модель не працює при відсутності додаткового опору в колі розряду інтегруючого конденсатора (транзистор  $VT_1$ ), тому опір його заряду складений з опорів двох резисторів –  $R$  і  $R'$ .

У схемі на рис. 6.6 використане пасивне інтегруюче RC - коло, оскільки переслідувалася тільки мета перевірки її працездатності. Для підвищення лінійності перетворювача на вході практичного аналога такої схеми використовується перетворювач напруга-струм (стабілізатор струму).

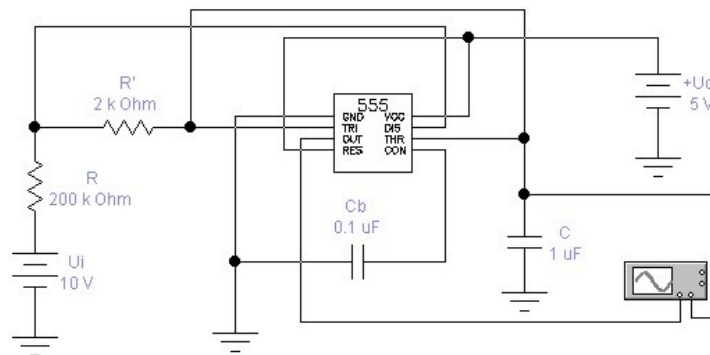


Рисунок 6.6 – Перетворювач напруга-частота на таймері NE555.

Осцилограми сигналів на виході OUT мікросхеми й конденсатора  $C$  показані на рис. 6.7.

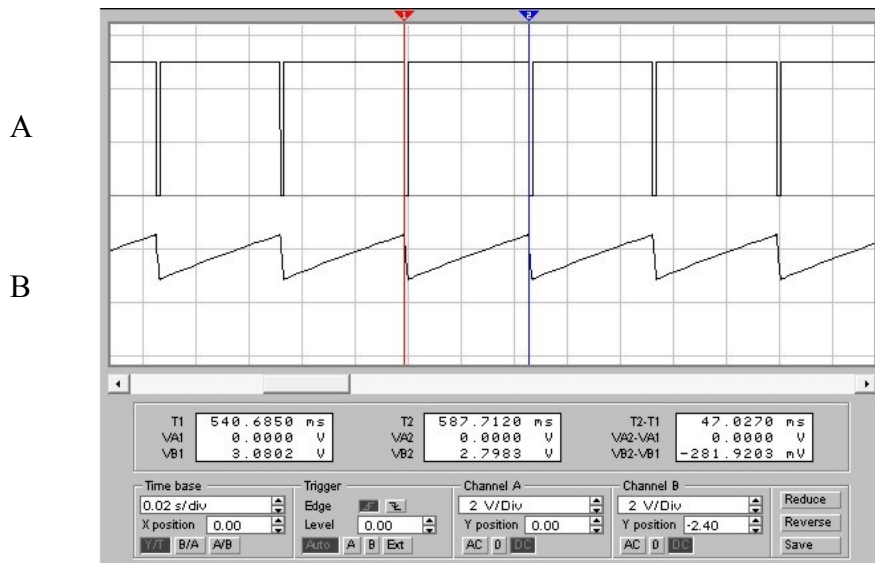


Рисунок 6.7 – Осцилограми на виході таймера(A) і інтегруючого конденсатора (B).

**Бібліотечні ЦАП і АЦП.** У бібліотеці програми EWB перетворювачі представлені 8-розрядними ЦАП і АЦП.

Схема включення бібліотечного ЦАП (рис. 6.8) містить властивий ЦАП (DAC V), два джерела опорної напруги  $+U_{op}$  і  $-U_{op}$ , генератор слова й осцилограф.

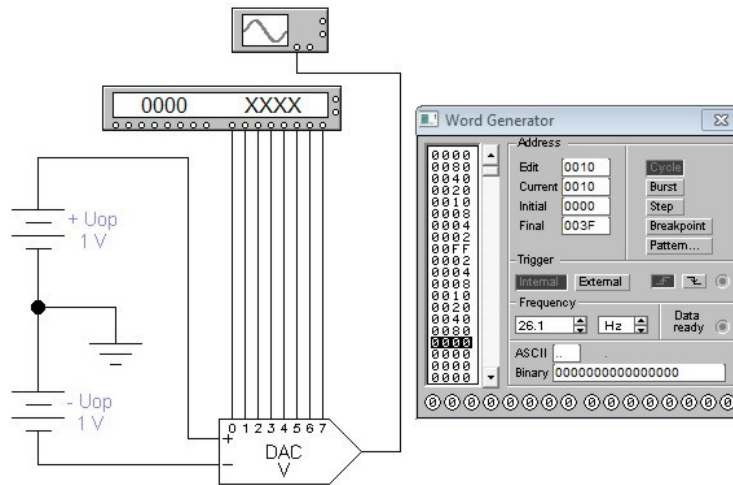


Рисунок 6.8 – Схема включення бібліотечного ЦАП з установками генератора слова для його випробування.

Вихідна напруга ЦАП визначається виразом:

$$U_o = D[(+U_{op}) + (-U_{op})]/256,$$

де  $D$  – десятковий еквівалент вхідного двійкового коду (наприклад, при вхідному коді 00000011  $D = 3$ ).

Задаючи відповідні кодові комбінації на виході генератора слова, можна за допомогою осцилографа виміряти максимальну вихідну напругу ЦАП, а також мінімальну, відповідну найменшому розряду й визначальній розв'язній здатності ЦАП. Нумерація розрядів показана на графічному значку ЦАП, осцилограма вихідного сигналу при зазначених на рис. 6.8 кодових комбінаціях на рис. 6.9.

Для ЦАП з опорними джерелами струму  $+I_{op}$ ,  $-I_{op}$  струм прямого й інверсного виходу визначається відповідно формулами:

$$I_o - D[(+I_{op}) + (-I_{op})]/256; I_o' = 255[(+I_{op}) + (-I_{op})]/256 - I_o.$$

Схема включення бібліотечного АЦП (рис. 6.10) містить властивість АЦП (ADC), джерела опорної напруги, генератор слова для синхронізації і управління виходом АЦП, функціональний генератор як джерело вхідного сигналу  $U_i$ , логічний аналізатор, перетворювач двійковий код-код ASCII і осцилограф.

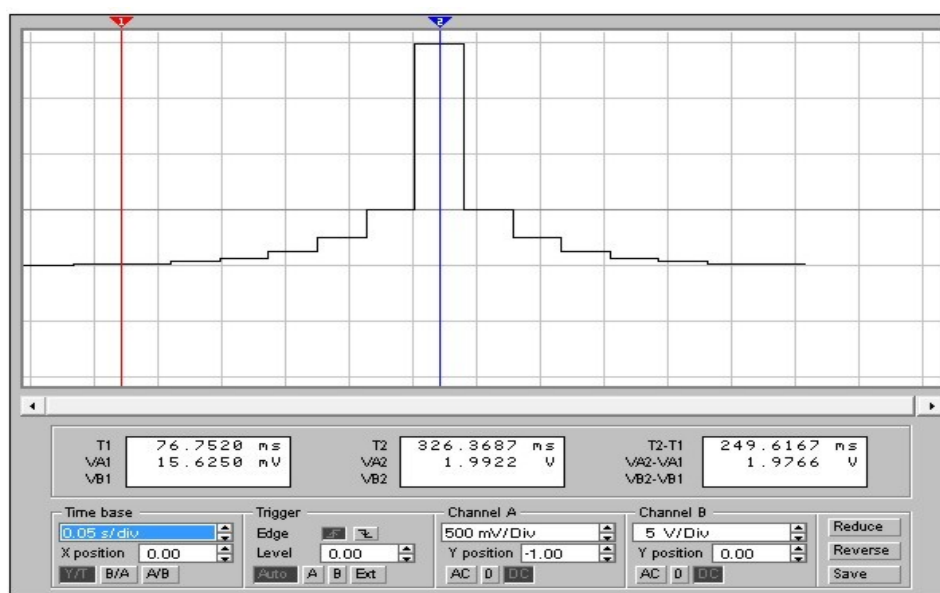


Рисунок 6.9 – Осцилограма вихідної напруги ЦАП.

Призначення виводів АЦП:  $V_{IN}$  – вхід для джерела перетвореного сигналу;  $V_{REF+}$ ,  $V_{REF-}$  – вхід для джерел опорної напруги;  $SOC$  – вхід синхронізації;  $OE$  – дозвіл на видачу двійкової комбінації на виходи  $D0...D7$ ;  $EOS$  – сигнал готовності даних (наприклад, при видачі даних на ЕОМ).

Для заданого значення вхідної напруги  $U_i$ , зафіксованого, наприклад, за допомогою пристрою вибірки і зберігання, десятковий еквівалент двійкового коду на виході АЦП визначається виразом:

$$D = 256U_i / [(+U_{op}) + (-U_{op})].$$

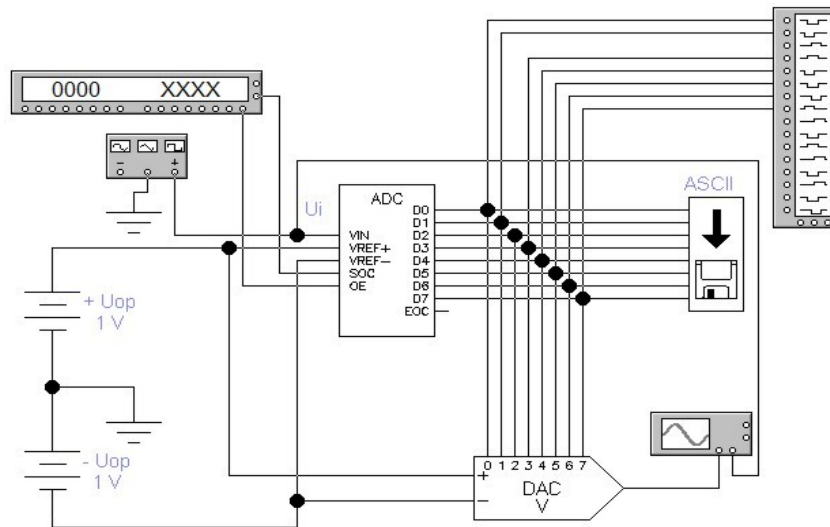


Рисунок 6.10 – Схема включення бібліотечного АЦП.

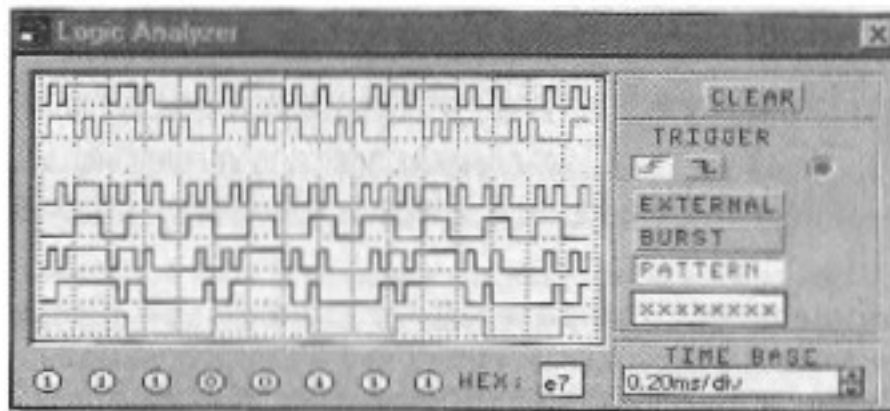


Рисунок 6.11 – Осцилограми вихідного сигналу АЦП на екрані логічного аналізатора.

Пристрій ASCII дозволяє записати дані в текстовий файл. Після подвійного кліку за його зображенням викликає стандартне діалогове вікно, у якому вказується ім'я файлу. За замовчуванням у меню пропонується ім'я схемного файлу з розширенням .txt.

Отримані дані з АЦП можна аналізувати за допомогою логічного аналізатора й осцилографа. Дані на екрані логічного аналізатора при перетворенні синусоїдального сигналу напругою 1 В і частотою 1 кГц показані на рис. 6.11.

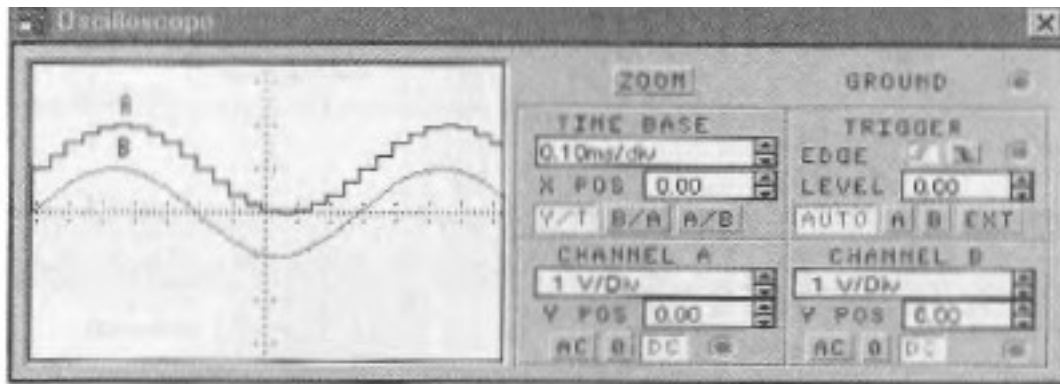


Рисунок 6.12 – Осцилограми вихідного сигналу ЦАП і вхідного АЦП.

Початкова ділянка даних на рис. 4.11 після їхнього перетворення в аналоговий сигнал за допомогою ЦАП показана у вигляді осцилограми на рис. 6.12.

**Перетворювач на управляючих джерелах.** Джерела напруги із програми EWB, управляючі напругою, які можуть бути використані в перетворювачах напруга-частота, показані на рис. 6.13.

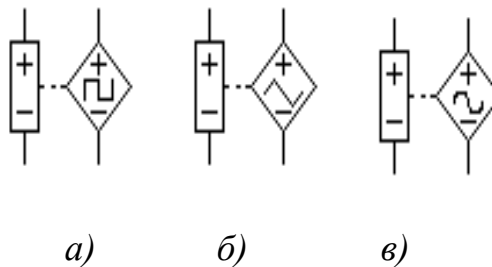


Рисунок 6.13 – ІНУН: *а* – з вихідною напругою прямокутної; *б* – трикутної; *в* – синусоїдальної форми.

Всі три джерела мають практично однаковий набір параметрів. Наприклад, діалогове вікно джерела з вихідним сигналом прямокутної форми містить дві закладки з наступним набором параметрів, що редагують: нижній  $L = 0$  В і верхній  $H = 1$  В рівні прямокутному імпульсу, тобто задається послідовність імпульсів позитивної полярності з амплітудою 1 В; коефіцієнт заповнення  $D = 0,2$ ; тривалість переднього  $TR = 1e-09$  с і заднього  $TF = 1e-09$  із фронтів; параметр  $N = 3$  визначає кількість точок, у яких заданій вхідній

напрузі в рядках параметрів C1...C5 (C1 = 0 В, C2 = 10 В, C3 = 20 В, C4 = C5 = 0 В) буде відповідати задана частота в рядках параметрів F1...F5 (F1 = 1 Гц, F2 = 10 Гц, F3 = F4 = F5 = 1 Гц), тобто задаються ділянки з різним коефіцієнтом перетворення (Гц/В).

Схема включення з вихідною напругою прямокутної форми показана на рис. 4.14 а. Крім властивій ІНУН VF схема містить джерело лінійно-змінної (пилкоподібної) напруги на інтеграторі (елементи ОП1, R1 і C1) постійної напруги U.

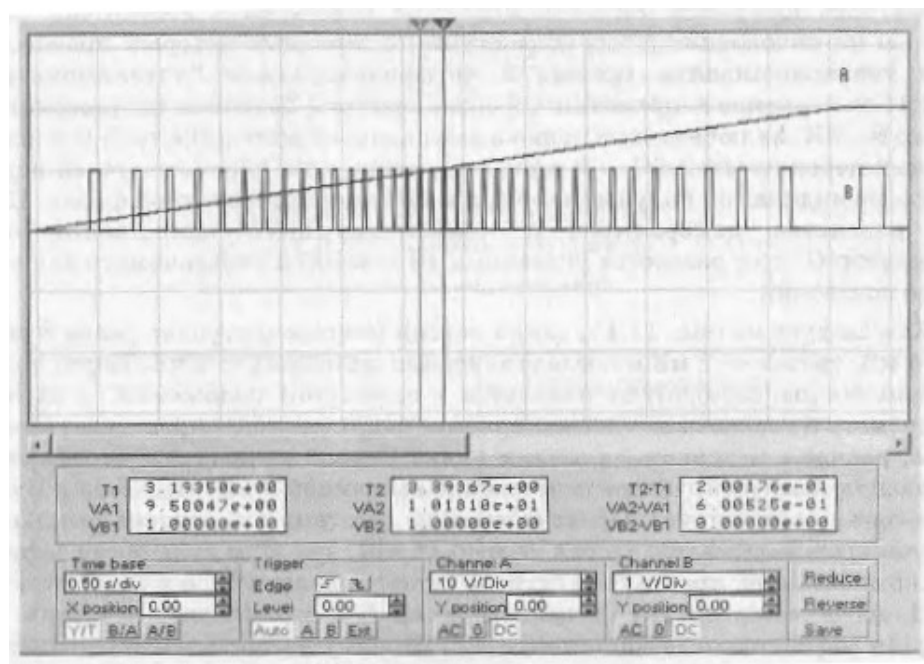
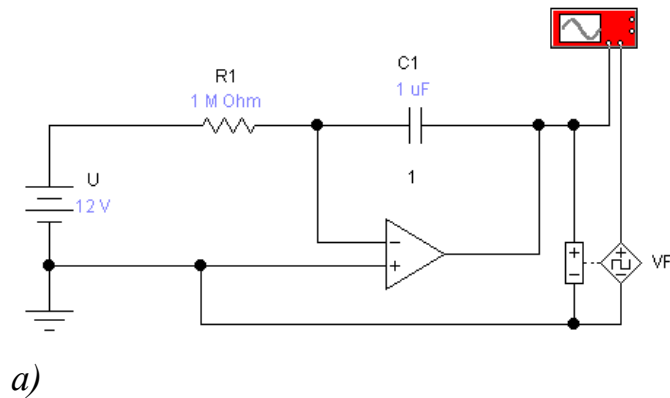


Рисунок 6.14 – Схема а – включення ІНУН з вихідною напругою прямокутної форми; б– осцилограми його вхідного (А) і вихідного (В) сигналів.

Осцилограми сигналів на вході й виході ІНУН, параметри якого встановлені відповідно до наведених вище даних, показані на рис. 6.14 б, звідки видно, що при входній напрузі близько 10 В (результати вимірів у рядках  $V_{A_1}$  і  $V_{A_2}$  індикаторних вікон) тривалість двох періодів імпульсної послідовності становить близько 200 мс (результати вимірів у рядку T2-T1 індикаторного вікна), тобто частота імпульсів відповідає встановленим значенням параметрів C2 і F2 у діалоговому вікні. Отже, коефіцієнт перетворення становить 1 Гц/В.

**АЦП врівноважуючого типу.** Задовго до появи сучасних АЦП у вимірювальній техніці вже використовували аналогічні пристрої (так звані потенціометри), що дозволяли отримувати цифровий відлік вимірюваної величини з досить високою точністю до положення ручок управління, за допомогою яких вироблялося ручне врівноважування схеми. У чотирирозрядному «потенціометрі» на рис. 6.15 вимірювана напруга  $U_x$  прирівнюється з спадом напруги на резисторах  $R_1 \dots R_8$ , що включають у коло каліброваного джерела струму  $I_s$  за допомогою здвоєних перемикачів 1...3; друга половина цих перемикачів використовується в схемі індикації отриманого коду у двійковій і десятковій формі. Індикатором рівності вимірювальної й компенсуючої напруги служить гальванометр G: при рівності зазначених напруг гальванометр буде мати нульові показання.

Як видно з рис. 6.15, найперший (старший) рівень дорівнює 8 мВ, другий – 4 мВ, третій – 2 мВ і останній (самий молодший) – 1 мВ. Перед урівноважуванням всі перемикачі перебувають у замкнутому положенні, і нуль-орган (гальванометр G) показує, що вимірювана напруга  $U_x$  перевищує компенсуючу, що дорівнює у вихідному стані 0. Першою включається перший рівень, що включає компенсуючу напругу, величиною 8 мВ. Оскільки  $U_x < 8$  мВ, при цьому нуль-орган зафіксує перекомпенсацію, тому цей рівень вимикається. На другому кроці включається другий рівень (4 мВ), при цьому нуль-орган зафіксує недокомпенсацію, тому цей рівень залишається включеним й до нього перемикачем 1 додається третій рівень величиною 2 мВ. Однак і в цьому випадку нуль-орган зафіксує недокомпенсацію. Тому на третьому кроці ключем 0 додається четвертий рівень величиною 1 мВ, після чого нуль-органом фіксується нульовий результат, що відповідає рівності вимірюваного й напруг, що компенсує. При цьому на виході "перетворювача" отримуємо двійковий код 0111 і його десятковий еквівалент 7. Розглянутий алгоритм перетворення називається *порозрядним урівноважуванням*.



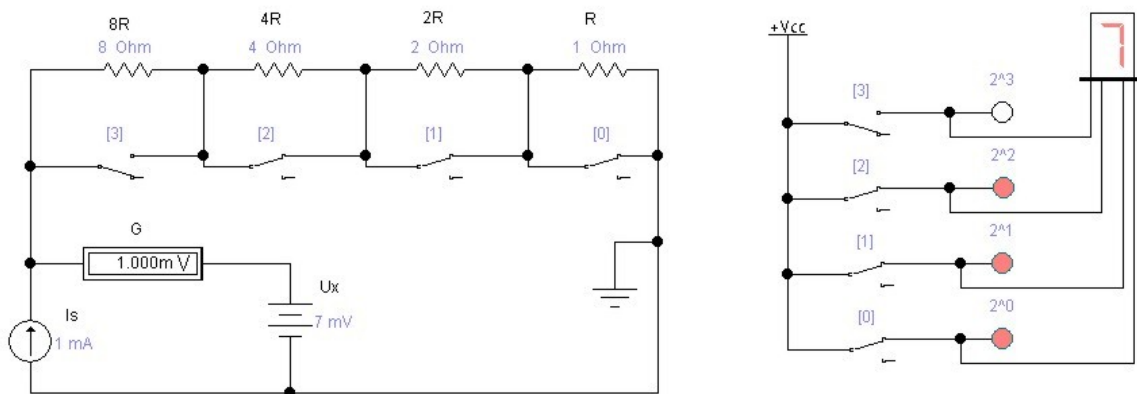


Рисунок 6.15 – Спрощена схема чотирирозрядного АЦП.

Можливий і інший спосіб урівноважування, при якому цей процес починається із четвертого рівня (1 мВ). Якщо при цьому фіксується недокомпенсація, то перемикач 0 вимикається й перемикачем 1 включається третій рівень (2 мВ). При недокомпенсації перемикачем 0 додатково підключає четвертий рівень, що в сумі дає 3 мВ. При недокомпенсації четвертий і третій рівні вимикаються й перемикачем 2 включається третій рівень (4 мВ). Далі по черзі підключаються четвертий і третій рівень, що забезпечує збільшення компенсуючої напруги, на кожному кроці урівноважування на величину одного кванта, рівного в нашому випадку 1 мВ. Урівноважування закінчується, коли при черговому додаванні одного кванта до компенсуючої напруги, остання стає більше вимірюваної. Розглянутий метод перетворення отримав назву методу *послідовного рахунку* або *перетворення, що розгортає*.

АЦП **типу, що розгортає**, може бути реалізований також з використанням як джерело компенсуючої напруги, прецизійного ГПН. Схема шести розрядного АЦП у такому виконанні містить (рис. 4.16 а) шести розрядний лічильник на тригерах D0...D5, двохходовий елемент І U, генератор опорної частоти  $U_s$ , компаратор на ОП1 і ГПН на ОП2 з елементами R, C і U. Для узгодження вихідного сигналу компаратора з логічним елементом І позитивна напруга насичення ОП1 дорівнює +5 В, негативна – 0 В.

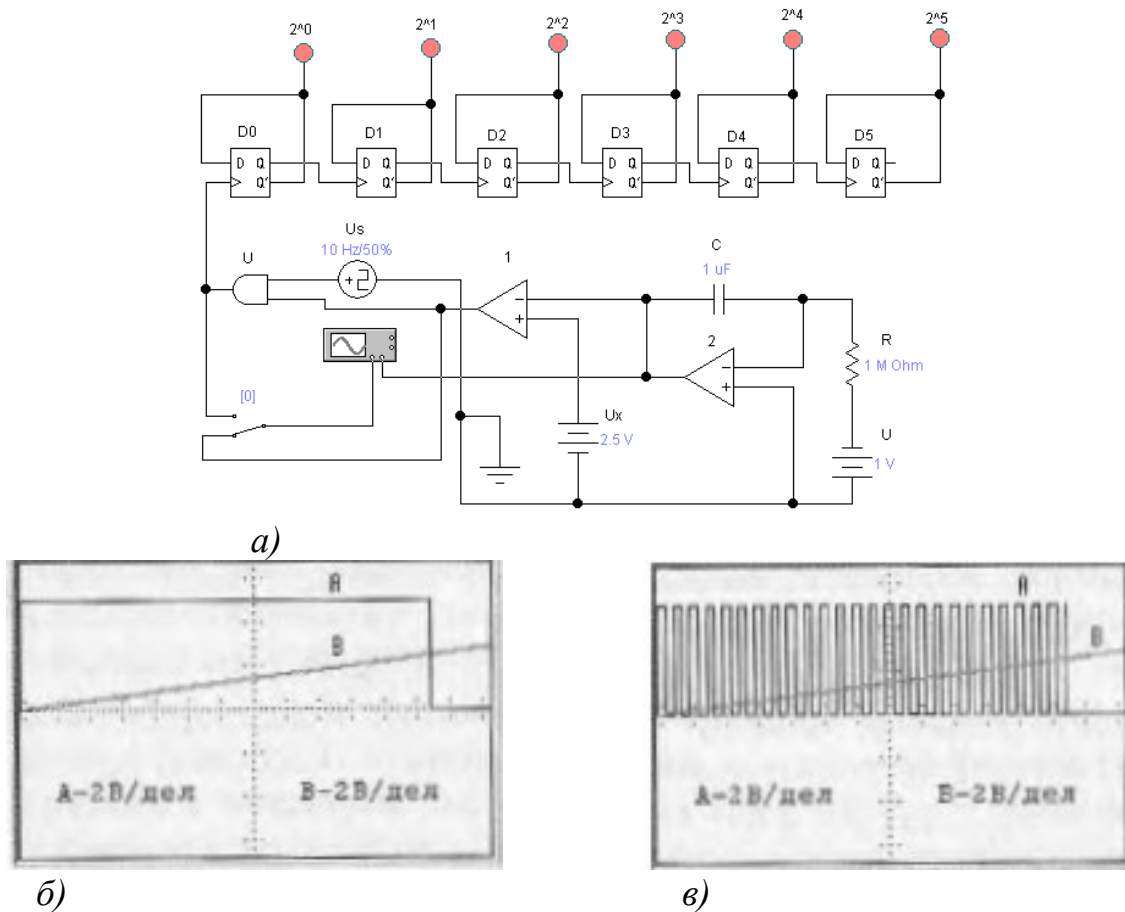


Рисунок 6.16 – Схема АЦП із ГПН (а) і осцилограми його сигналів (б, в).

Перемикач Х використовується для оперативного контролю сигналів на виході компаратора й елемента І (осцилограми А на рис. 4.16 б, в). Швидкість зміни вихідної напруги ГПН (осцилограми В на рис. 4.16 б, в) дорівнює  $v = U/RC = 1/10^6 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ В/с}$ . У момент пуску АЦП (початок моделювання) під дією перетвореної напруги  $U_x$  на виході компаратора формується сигнал логічної одиниці (осцилограма А на рис. 4.16 б), в результаті чого на вхід лічильника через схему І починають надходити імпульси з джерела однополярних імпульсів  $U_s$  (осцилограма А на рис. 4.16 в). Одночасно запускається й ГПН, вихідна напруга якого  $U_g = v \cdot t$ , починаючи з моменту  $t_1 = 0$ , безупинно рівняється з  $U_x$ . Коли в момент часу  $t = t_2$ ,  $U_g$  досягає значення  $U_x$ , спрацьовує компаратор, у результаті чого на його виході формується сигнал логічного нуля, схема І блокується й надходження імпульсів на лічильник припиняється. Проміжок часу, протягом якого імпульси від джерела  $U_s$  надходили на вхід лічильника із частотою проходження  $F = 10 \text{ Гц}$ , дорівнює  $\Delta t = t_2 - t_1 = U_x/v$ .

Зареєстроване лічильником за цей час число імпульсів  $N = F \cdot T_{\text{ЧУ}} / v = 10 \cdot 2,5 / 1 = 25$  збігається з показаннями індикаторів  $2^0 + 2^3 + 2^4 = 25$ .

### **Устаткування й апаратура:**

Комп'ютер, програми комп'ютерного моделювання Electronics Workbench.

### **Порядок виконання роботи**

1. Розрахуйте коефіцієнт підсилення напруги ОП і вихідної напруги ЦАП у схемі на рис. 4.1 для випадку, коли в положенні, що відповідає логічній одиниці, встановлений тільки перемикач С. Результати розрахунку перевірте на моделі.

2. Замініть перемикачі А, В, С, D програмними перемикачами (реле часу), що імітують послідовно в часі з інтервалом 5 з появи кодових комбінацій 0001, 0011, 0111 і 1111.

3. За допомогою формули (4.1) розрахуйте вихідну напругу ЦАП на рис. 4.1 для всіх 16 комбінацій перемикачів А, В, С, D і зрівняйте отримані результати з результатами моделювання.

4. Замініть перемикачі А, В, С, D у схемі на рис. 4.2 програмними перемикачами, що імітують послідовно в часі з інтервалом 5 із проявом кодових комбінацій 0001, 0010, 0100 і 1000.

5. Використовуючи формулу (4.1) і результати моделювання, розрахуйте еквівалентну напругу  $U_{\text{он}}$  для схеми на рис. 4.3 а.

6. Перевірте працездатність схеми на рис. 4.4, б і дослідіть залежність частоти вихідного сигналу від вхідної напруги в діапазоні 20 мВ...10 В. Перевірте справедливість формули (4.2).

7. Перевірте працездатність схеми перетворювача на рис. 4.6 при  $U_{\text{Г}} = 4...40$  В з оцінкою лінійності перетворення в цьому діапазоні.

8. Використовуючи дані на рис. 4.8 і 4.9, встановіть, яким кодовим комбінаціям генератора слова відповідають рівні вихідної напруги ЦАП у точках установки візирних лінійок на осцилограмі рис. 4.9. Визначити розв'язну здатність ЦАП (ціну молодшого розряду – МР).

9. Складіть схему для випробування ЦАП з опорними джерелами струму.

10. Проведіть випробування схеми перетворювача на рис. 4.14 а при значеннях параметрів F1, F2, і F3, збільшених в 10 і 100 разів у порівнянні з

розглянутим випадком. Визначити мінімальну вхідну напругу, при якій не лінійність перетворення не перевищує 10%.

11. Керуючись даними, визначить основні характеристики АЦП на рис. 4.16 а.

12. В АЦП на рис. 4.16 а обнуління (скидання) лічильника здійснюється програмою автоматично в момент пуску. Яким образом це може бути реалізоване в практичній конструкції АЦП аналогічного типу? Розробіть схему обнуління лічильника перед кожним циклом перетворення й проведіть її випробування.

### **Зміст звіту**

1. Електричні схеми, показання приладів і параметри підібраних елементів.
2. Опис елементів, використаних в електричних схемах.
3. Результати дослідження.

### ***Відповіді усно на контрольні питання***

1. За яким законом вибираються опори в ЦАП з ваговими резисторами?
2. Отримайте вираження для розрахунку вихідної напруги ЦАП у загальному вигляді й перевірте його на моделі.
3. Чим відрізняється ЦАП сходового типу від ЦАП з ваговими резисторами? До якого типу ЦАП він відноситься?
4. Що з себе представляє АЦП прямого перетворення, у яких пристроях його доцільно використовувати?
5. Які додаткові пристрої необхідно підключити до схеми на рис. 4.4 б, щоб отримати цифровий відлік вимірюваної напруги?
6. Що з себе представляють інтегральні таймери й чому вони так називаються?
8. Чим викликана популярність інтегрального таймера NE555?
9. Проведіть аналіз і випробування перетворювача напруга-частота й мультивібратора на NE555.
10. Чи використовується ЦАП у складі бібліотечного АЦП?
11. Проведіть якісний порівняльний аналіз осцилограм на рис. 4.11 і 4.12.

12. Проведіть порівняльний аналіз даних на рис. 4.11 і даних, зареєстрованих у текстовому файлі.

13. Ознайомтеся зі схемою включення в АЦП бібліотечного ЦАП DAC 1, а також із застосуванням бібліотечних АЦП і ЦАП в імпульсно-кодovому, використовуваному в цифрових системах зв'язку.

14. Охарактеризуйте два способи перетворення, що врівноважує, і проведіть їхній порівняльний аналіз за тривалістю процесу зрівноважування.

### Список використаної літератури

1. Карлащук В.И. Электронная работа на IBM PC. Программа Electronics Workbench и её применение. М.: Солон-Р, 1999, 500с.
2. Фолкенберри Л. Применения операционных усилителей и линейных ИС. М.: Мир, 1985, 573с.
3. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/Под ред. В.А. Лапунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320с.
4. Информационно-измерительная техника и электроника: учебник для высш. Учеб. Заведений/Под редакцией Г.Г. Раннева. – М.: издательский центр «Акадкмия», 2006. – 512 с.
5. Т.С. Рахтор Цифровые измерения. Методы и схемотехник. – М.: Техносфера, 2004. – 376 с.
6. Лімонов О.С. Цифрова обробка сигналів: Конспект лекцій. – Вид-во “ТЕС”, Одеса, 2011. – 115 с.
7. Великий В.І., Перелигін Б.В. Проектування автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища: Конспект лекцій. – Одеса: „Екологія”, 2015. – 170 с.