

**Міністерство освіти і науки України**  
**УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Фізичний факультет**  
**Кафедра оптики**

**Кедюлич В.М., Гуранич П.П.**

# **РАДІОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ**

**Лабораторний практикум з курсу**  
**„Основи схемотехніки”**

**Ужгород – 2018**

# РАДІОЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

Лабораторний практикум з курсу „Основи схемотехніки”  
для студентів спеціальності 172– Телекомунікації та радіотехніка

Фізичний факультет Ужгородського національного університету  
Кафедра оптики

Курс - 3  
Семестр - 6

Автори: кандидат фіз.-мат. наук, доцент КЕДЮЛИЧ ВІКТОР МИХАЙЛОВИЧ  
кандидат фіз.-мат. наук, доцент ГУРАНИЧ ПАВЛО ПАВЛОВИЧ

Відповідальний за випуск:  
кандидат фіз.-мат. наук,  
доцент КЕДЮЛИЧ ВІКТОР МИХАЙЛОВИЧ

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
1. Лабораторна робота №1 .....	5
Схеми включення транзисторів у підсилюючих каскадах	
2. Лабораторна робота №2 .....	14
Режими роботи транзисторів у підсилюючих каскадах	
3. Лабораторна робота №3 .....	24
Підсилюючі каскади	
4. Лабораторна робота №4 .....	32
Операційні підсилювачі	
5. Лабораторна робота №5 .....	42
Генератори електричних коливань	
6. Лабораторна робота №6 .....	50
Комбінаційні схеми	
Література .....	58

## ВСТУП

Даний посібник представляє собою другу частину методичних розробок для проведення лабораторних робіт з курсу "Основи радіоелектроніки" для студентів спеціальностей "Фізика", "Прикладна фізика". Тут містяться описи шести лабораторних робіт, тематика яких була продиктована умовою якнайширшого охоплення всіх розділів цього курсу. Опис кожної лабораторної роботи містить короткі теоретичні відомості, необхідні для її виконання, та експериментальну частину, де наведені схеми експериментальних установок та порядок виконання роботи. експериментального розділу кожної лабораторної роботи включено моделювання та аналіз досліджуваних схем на персональному комп'ютері з використанням спеціалізованих пакетів прикладних програм. Це дає змогу студентам більш детально ознайомитися з роботою схем та глибше зрозуміти процеси, що відбуваються в тому чи іншому радіотехнічному пристрої. Разом з цим, комп'ютерне моделювання дозволяє проаналізувати роботу схем, виконання яких в традиційному варіанті представляє певні технічні

## Лабораторна робота №1

### Схеми включення транзисторів у підсилюючих каскадах

**Мета роботи:** ознайомлення з основними характеристиками та параметрами підсилювачів електричних сигналів на біполярних транзисторах. Дослідити роботу підсилюючих каскадів з різними схемами включення транзисторів та визначити їх основні характеристики.

## Теоретичні відомості

### 1. Загальні відомості про підсилювачі електричних сигналів

*Підсилювач* - пристрій, призначений для підсилення потужності електричних сигналів. Підсилювач представляє собою активний чотириполюсник з двома вхідними та двома вихідними клемми (див.рис.1). Вхідні клемми призначені для подачі вхідного сигналу, який необхідно підсилити. До вихідних клем підсилювача під'єднують опір навантаження  $R_n$ . На вході підсилювача діє вхідна напруга  $U_{вх}$  та вхідний струм  $I_{вх}$ , вихідна напруга  $U_{вих}$  знімається з опору навантаження  $R_n$ , через який протікає вихідний струм  $I_{вих}$ . Кожен підсилювач містить джерело живлення  $E$ . Підсилення потужності електричних сигналів відбувається за рахунок енергії джерела живлення.

Основні параметри підсилювачів :

1. **Коефіцієнт підсилення напруги  $k_u$**  - відношення напруги вихідного сигналу до напруги вхідного сигналу:

$$k_u = U_{вих} / U_{вх} . \quad (1)$$

2. **Коефіцієнт підсилення струму  $k_i$**  - відношення вихідного струму до вхідного :

$$k_i = I_{вих} / I_{вх} . \quad (2)$$



Рис.1. Підсилювач електричних сигналів як чотириполюсник.

3. **Коефіцієнт підсилення потужності  $k_p$**  - відношення потужності вихідного сигналу до потужності вхідного:

$$k_p = \frac{P_{вих}}{P_{вх}} = \frac{U_{вих} I_{вих}}{U_{вх} I_{вх}} = k_u k_i . \quad (3)$$

4. **Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)** - залежність коефіцієнта підсилення від частоти сигналу (рис.2).

5. **Діапазон підсилюваних частот  $\Delta f$**  - діапазон частот, в межах якого нерівномірність АЧХ  $\Delta k$  не перевищує заданої величини (див. рис.2):

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} . \quad (4)$$

6. **Вхідний опір** - опір входу підсилювача для змінного струму.

7. **Вихідний опір** - опір виходу підсилювача для змінного струму.

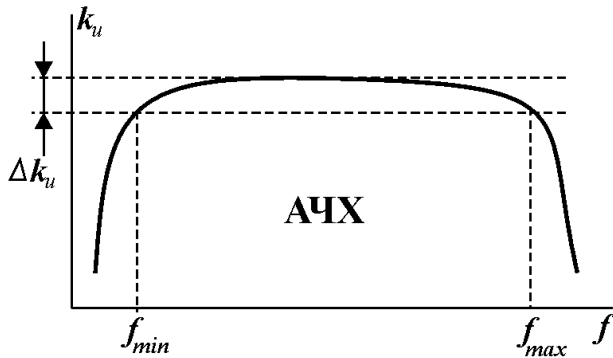


Рис.2. Амплітудно-частотна характеристика підсилювача.

8. **Амплітудна характеристика підсилювача** - залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного. З виразу (1) отримуємо:

$$U_{\text{вих}} = k_u U_{\text{вх}} . \quad (5)$$

Тому амплітудна характеристика ідеального підсилювача має вид прямої лінії з нахилом, що рівний коефіцієнту підсилення.

8. **Коефіцієнт нелінійних спотворень.** Нелінійні спотворення обумовлені відхиленням амплітудної характеристики реального підсилювача від прямої лінії

(рис.3). Ці спотворення проявляються у виді нових компонент спектру частот, які відсутні у вхідному сигналі. Якщо підсилювач вносить нелінійні спотворення, то його амплітудна характеристика описується наступним виразом :

$$U_{\text{вих}} = a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2 + a_3 U_{\text{вх}}^3 + \dots + a_k U_{\text{вх}}^k , \quad (6)$$

де  $U_{\text{вх}}$ ,  $U_{\text{вих}}$  - амплітуди вхідного та вихідного гармонічних сигналів,  $a_i$  - коефіцієнти, що визначають вид амплітудної характеристики,  $k$  - порядок нелінійності, що визначає число гармонік на виході. При подачі на вхід підсилювача з такою амплітудною характеристикою гармонічного сигналу з частотою  $f$ , вихідний сигнал буде представляти собою суму гармонік з частотами  $f, 2f, 3f, \dots, nf$  і амплітудами  $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ .

Коефіцієнт нелінійних спотворень представляє собою відношення кореня квадратного із суми квадратів напруг гармонік до напруги основної частоти (першої гармоніки) :

$$k_r = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (7)$$

Тому коефіцієнт нелінійних спотворень часто називають **коефіцієнтом гармонік**.

Коефіцієнт підсилення напруги  $k_u$  та коефіцієнт підсилення

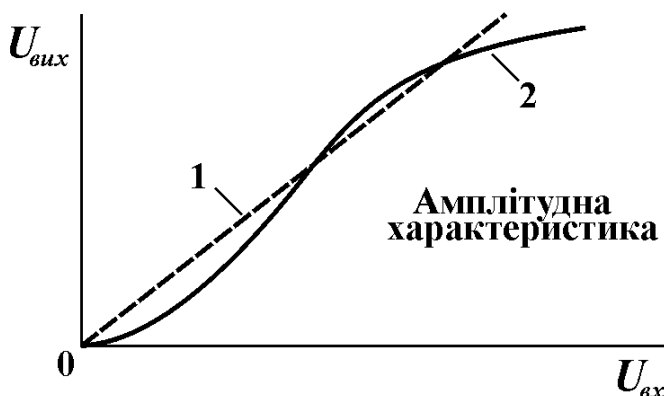


Рис.3. Амплітудна характеристика ідеального підсилювача (1) та реального підсилювача (2).

потужності  $k_p$  часто виражають в спеціальних логарифмічних одиницях - децибелах:

$$k_p (\text{дБ}) = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} . \quad (8)$$

Враховуючи, що  $P \sim U^2$ , для  $k_u$  отримуємо :

$$k_u (\text{дБ}) = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} . \quad (9)$$

## 2. Класифікація підсилювачів

Як правило, підсилювачі будують на активних елементах - транзисторах та електронних лампах. Тому розрізняють *транзисторні підсилювачі* та *лампові підсилювачі*. В сучасних радіотехнічних пристроях використовують в основному транзисторні підсилювачі.

Найменша підсилювальна одиниця підсилювача називається *підсилюючим каскадом*. Кожен каскад складається з джерела живлення, транзистора та схеми зміщення, яка забезпечує *режим роботи транзистора* за постійним струмом. Тому розрізняють однокаскадні та багатокаскадні підсилювачі. Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача рівний добутку коефіцієнтів підсилення окремих каскадів. Якщо коефіцієнти підсилення окремих каскадів виразити в децибелах, то сумарний коефіцієнт підсилення рівний їх сумі. В залежності від місця каскаду в підсилювачі розрізняють *каскади попереднього підсилення* та *вихідні каскади*.

В залежності від способу зв'язку між каскадами багатокаскадного підсилювача розрізняють підсилювачі з *безпосереднім зв'язком*, підсилювачі з *ємнісним зв'язком* та підсилювачі з *трансформаторним зв'язком* (див.рис.4).

В залежності від смуги підсилюваних частот розрізняють підсилювачі *постійного струму*, *смугові підсилювачі* та *резонансні підсилювачі* (див.рис.5). В підсилювачах постійного струму застосовують безпосередній зв'язок між каскадами, так як конденсатор і трансформатор не передають постійний струм. В якості опору навантаження в резонансних підсилювачах використовуються коливальні контури. Смугові підсилювачі поділяють на підсилювачі низьких частот (ПНЧ) та високих частот (ПВЧ). ПНЧ, що підсилюють звукові частоти (20 Гц÷20кГц), називають підсилювачами звукових частот (ПЗЧ). Смугові підсилювачі, що працюють в діапазоні частот 50 Гц ÷5 МГц, називають відеопідсилювачами. Смугові підсилювачі високих частот, що підсилюють сигнали в радіочастотному діапазоні називають підсилювачами радіочастоти.

Підсилювачі, призначені для підсилення потужності різниці вхідних сигналів називають *диференційними підсилювачами*. Підсилювачі постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, виконані у виді інтегральних мікросхем, називають *операційними підсилювачами*. Вхідним каскадом операційного підсилювача є диференційний каскад.

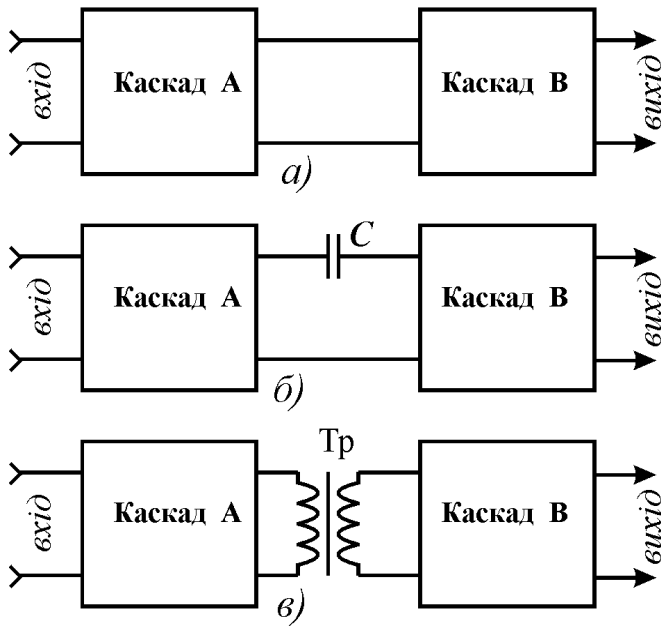


Рис.4. Способи зв'язку між каскадами багатокаскадного підсилювача: а) безпосередній зв'язок, б) ємнісний зв'язок, в) трансформаторний зв'язок.

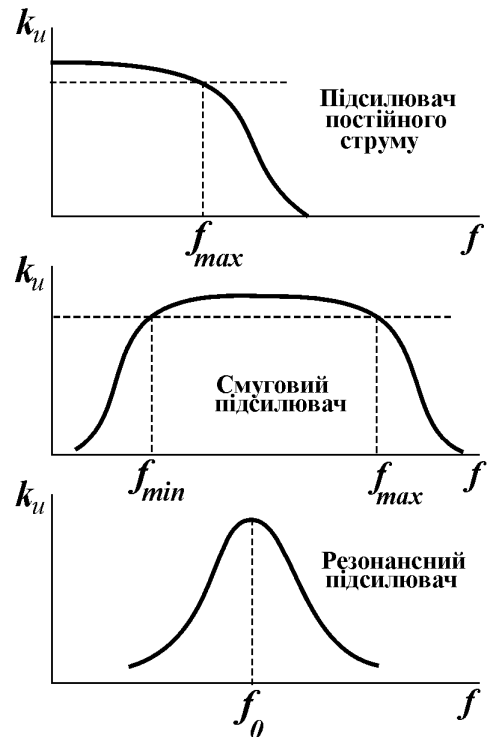


Рис.5. Амплітудно-частотні характеристики підсилювачів.

### 3. Схеми включення транзисторів у підсилювальних каскадах

Згідно з рис.1, кожен підсилювач має чотири виводи - два вхідні та два вихідні, а транзистор має тільки три виводи: емітер, колектор та базу. Тому, в транзисторному підсилюючому каскаді один із виводів транзистора має бути спільним для входу і виходу. Таким чином, в підсилюючому каскаді транзистор може бути включений за однією із трьох можливих схем включення: схема зі *спільним емітером* (СЕ), схема зі *спільним колектором* (СК) та схема зі *спільною*

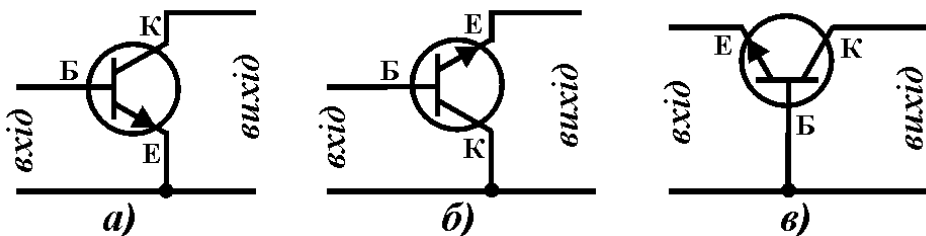


Рис.6. Схеми включення транзистора в підсилюючих каскадах: а) схема зі спільним емітером, б) схема зі спільним колектором, в) схема зі спільною базою.

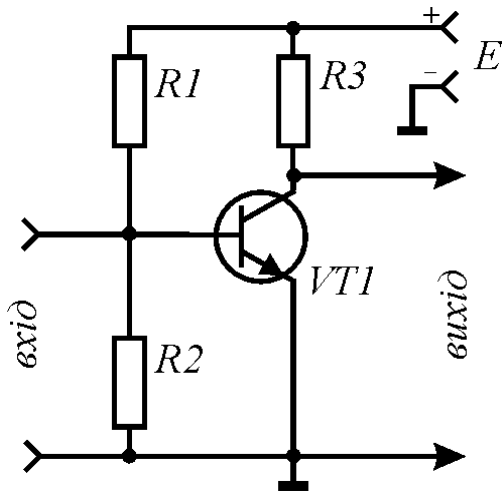


Рис.7. Включення транзистора за схемою зі спільним емітером.

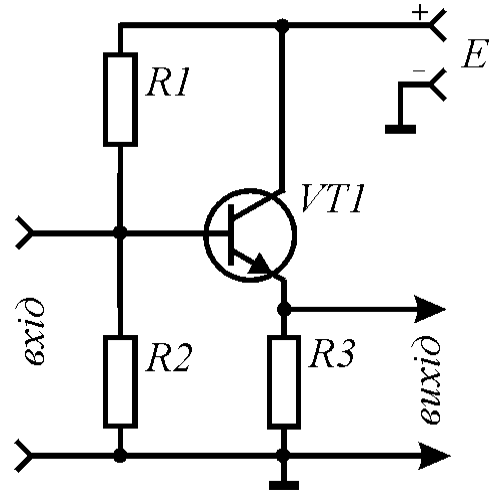


Рис.8. Включення транзистора за схемою зі спільним колектором.

**базою** (СБ) (див. рис.6). Всі основні характеристики підсилюючих каскадів залежать від схеми включення транзистора.

В схемі зі спільним емітером спільним виводом для вхідного і вихідного сигналу є емітер транзистора (див.рис.7). Резистори  $R1$  та  $R2$  утворюють подільник напруги для подачі зміщення на базу транзистора. Резистор  $R3$  являється навантаженням каскаду.

Дана схема включення транзистора дозволяє отримати підсилення як напруги, так і струму, тому коефіцієнт підсилення потужності при такому включенні є найбільшим. Однак він сильно залежить від зміни режиму роботи транзистора, температури та заміні екземплярів транзисторів. Вхідний опір такого каскаду, в залежності від типу транзистора та резисторів  $R1$  і  $R2$ , складає десятки - тисячі Ом. Вихідний опір визначається опором навантаження  $R3$ . Коефіцієнт нелінійних спотворень при включенні транзистора за схемою зі СЕ більший, ніж при інших включеннях, однак таке включення застосовується найбільш часто, так як дозволяє отримати найбільше підсилення потужності.

В схемі зі спільним колектором, спільним виводом для вхідного і вихідного сигналу є колектор транзистора (див.рис.8), хоча безпосередньо з наведеної схеми це не видно. Однак, необхідно врахувати, що опір джерела живлення  $E$  є дуже малим. Тому спільний заземлений вивід для вхідного і вихідного сигналу через малий опір джерела живлення підключений до колектора транзистора. Саме тому дана схема включення транзистора є схемою зі спільним колектором. Як і в попередньому випадку, резистор  $R3$  виступає в ролі навантаження каскаду, а резистори  $R1$  та  $R2$  використовуються для подачі напруги зміщення на базу транзистора.

Дана схема включення транзистора підсилює тільки струм. Коефіцієнт підсилення струму також залежить від режиму роботи транзистора, температури та заміни екземплярів транзисторів. Коефіцієнт підсилення напруги при такому включенні транзистора близький до одиниці, тому такий каскад не підсилює

напругу:  $U_{вих} \approx U_{вх}$ . Саме тому його ще називають **емітерним повторювачем**. Перевагою такої схеми включення є великий вхідний опір і малий вихідний. Тому емітерний повторювач застосовують для узгодження вхідних і вихідних опорів між каскадами.

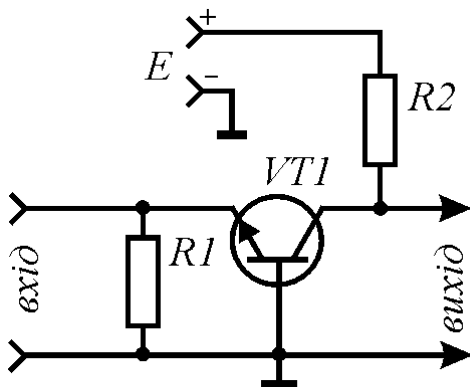


Рис.9. Включення транзистора за схемою зі спільною базою.

В схемі зі спільною базою, спільним виводом для вхідного і вихідного сигналу є база транзистора (див.рис.9). Включення транзистора зі СБ дозволяє отримати підсилення тільки напруги. Коефіцієнт підсилення струму при такому включенні близький до одиниці і мало змінюється при зміні режиму роботи транзистора, температури і заміні екземплярів транзисторів. Вхідний опір транзистора при включенні зі СБ є меншим, ніж при інших включеннях, а вихідний - більшим. Перевагою такої схеми включення є дуже малий коефіцієнт нелінійних спотворень та широкий діапазон підсилюваних частот. Тому таку схему, як правило, застосовують в радіочастотних підсилювачах.

## Резюме

1. Підсилення потужності електричних сигналів відбувається за рахунок енергії джерела живлення.
2. Схема включення транзистора зі спільним емітером підсилює і напругу, і струм.
3. Схема включення транзистора зі спільним колектором підсилює тільки струм.
4. Схема включення транзистора зі спільною базою підсилює тільки напругу.

## Порядок виконання роботи

### 1. Дослідження роботи підсилювального каскаду з включенням транзистора за схемою зі спільним емітером

1. Зібрати схему установки для дослідження каскаду зі спільним емітером (рис.10). В якості вольтметра В1 використати вольтметр В7-26. В якості В2 та А1 використати вмонтовані в лабораторний пристрій К4822-2 комбіновані електровимірювальні пристрої. Встановити вольтметр В1 на діапазон вимірювання постійної напруги 1 Вольт, вольтметр В2 - на діапазон 10 Вольт, а амперметр А1 - на діапазон 0,25 мА. Включити живлення установки та перевірити її працездатність.

**Увага! При монтажі установки обов'язково дотримуйтесь вказаної на рис.1 полярності включення електровимірювальних приладів у схему. При відхиленні стрілки приладів у крайнє ліве або зашкалюванні її у крайнє праве положення негайно вимкніть живлення схеми!**

- Користуючись показами вольтметра В1, потенціометром  $R2$  встановити вхідну напругу  $U_{вх}$  рівною 0,7 В. За допомогою амперметра А1 виміряти вхідний струм  $I_{вх}$ . За допомогою вольтметра В2 виміряти вихідну напругу  $U_{вих}$ . Дані занести в таблицю 1.
- Потенціометром  $R2$  встановити вхідну напругу  $U_{вх}$  рівною 0,8 В. Знову виміряти вхідний струм та вихідну напругу. Дані занести в таблицю 1.
- Обчислити приріст вхідної напруги  $\Delta U_{вх}$ , приріст вихідної напруги  $\Delta U_{вих}$ , приріст вхідного струму  $\Delta I_{вх}$  та приріст вихідного струму  $\Delta I_{вих} = \Delta U_{вих} / R_K$ .
- Обчислити вхідний та вихідний опір каскаду:  $R_{вх} = \Delta U_{вх} / \Delta I_{вх}$ ,  $R_{вих} = \Delta U_{вих} / \Delta I_{вих}$ . Дані розрахунків занести в таблицю 1.
- Обчислити коефіцієнт підсилення за напругою  $k_u = \Delta U_{вих} / \Delta U_{вх}$ , коефіцієнт підсилення за струмом  $k_i = \Delta I_{вих} / \Delta I_{вх}$  та коефіцієнт підсилення потужності  $k_p = k_u k_i$  каскаду з включенням транзистора за схемою зі спільним емітером. Дані розрахунків занести в таблицю 1.

## 2. Дослідження роботи підсилювального каскаду з включенням транзистора за схемою зі спільним колектором

- Зібрати схему установки для дослідження каскаду зі спільним колектором (рис.11). Встановити вольтметр В1 на діапазон вимірювання постійної напруги 10 Вольт, вольтметр В2 - на діапазон 10 Вольт, а амперметр А1 - на діапазон 0,25 мА. Включити живлення установки та перевірити її працездатність.

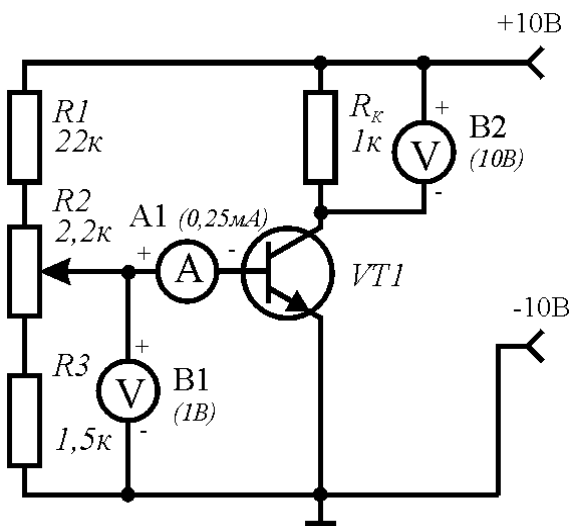


Рис.10. Схема установки для дослідження каскаду зі спільним емітером.

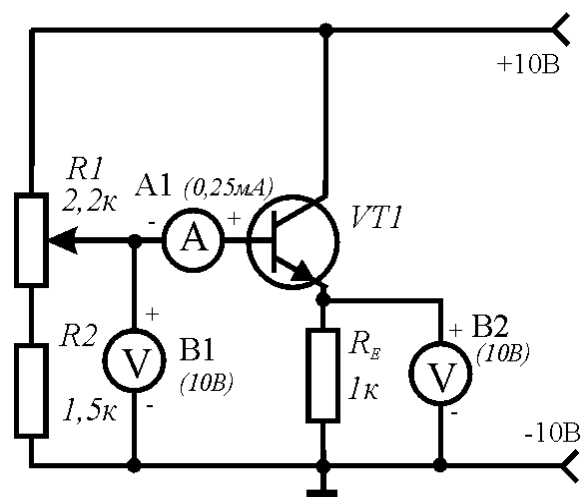


Рис.11. Схема установки для дослідження каскаду зі спільним колектором.

Таблиця 1

	$U_{ex}$	$U_{вих}$	$I_{ex}$	$I_{вих}$	$\Delta U_{ex}$	$\Delta U_{вих}$	$\Delta I_{ex}$	$\Delta I_{вих}$	$R_{ex}$	$R_{вих}$	$k_u$	$k_i$	$k_p$
СЕ													
СК													
СБ													

- Потенціометром  $R1$  встановити вхідну напругу каскаду  $U_{ex}$  рівною 6 В. Виміряти вхідний струм  $I_{ex}$  та вихідну напругу  $U_{вих}$ . Дані занести в таблицю 1.
- Встановити вхідну напругу  $U_{ex}$  рівною 8 В. Знову виміряти вхідний струм та вихідну напругу. Дані занести в таблицю 1.
- Обчислити приріст вхідної напруги  $\Delta U_{ex}$ , приріст вихідної напруги  $\Delta U_{вих}$ , приріст вхідного струму  $\Delta I_{ex}$  та приріст вихідного струму  $\Delta I_{вих} = \Delta U_{вих} / R_E$ .
- Обчислити вхідний та вихідний опір каскаду:  $R_{ex} = \Delta U_{ex} / \Delta I_{ex}$ ,  $R_{вих} = \Delta U_{вих} / \Delta I_{вих}$ . Дані розрахунків занести в таблицю 1.
- Обчислити коефіцієнт підсилення за напругою  $k_u = \Delta U_{вих} / \Delta U_{ex}$ , коефіцієнт підсилення за струмом  $k_i = \Delta I_{вих} / \Delta I_{ex}$  та коефіцієнт підсилення потужності  $k_p = k_u k_i$  каскаду з включенням транзистора за схемою зі спільним колектором. Дані розрахунків занести в таблицю 1.

### 3. Дослідження роботи підсилювального каскаду з включенням транзистора за схемою зі спільною базою

- Зібрати схему установки для дослідження каскаду зі спільною базою (рис.12). Встановити вольтметр В1 на діапазон вимірювання постійної напруги 1 Вольт, вольтметр В2 - на діапазон 10 Вольт, а амперметр А1 - на діапазон 1 мА. Включити живлення установки та перевірити її працездатність.
- Потенціометром  $R2$  встановити вхідну напругу каскаду  $U_{ex}$  рівною 0,3 В. Виміряти вхідний струм  $I_{ex}$  та вихідну напругу  $U_{вих}$ . Дані занести в таблицю 1.
- Встановити вхідну напругу  $U_{ex}$  рівною 1 В. Знову виміряти вхідний струм та вихідну напругу. Дані занести в таблицю 1.
- Обчислити приріст вхідної напруги  $\Delta U_{ex}$ , приріст вихідної напруги  $\Delta U_{вих}$ , приріст вхідного струму  $\Delta I_{ex}$  та приріст вихідного струму  $\Delta I_{вих} = \Delta U_{вих} / R_5$ .
- Обчислити вхідний та вихідний опір каскаду:  $R_{ex} = \Delta U_{ex} / \Delta I_{ex}$ ,  $R_{вих} = \Delta U_{вих} / \Delta I_{вих}$ . Дані розрахунків занести в таблицю 1.

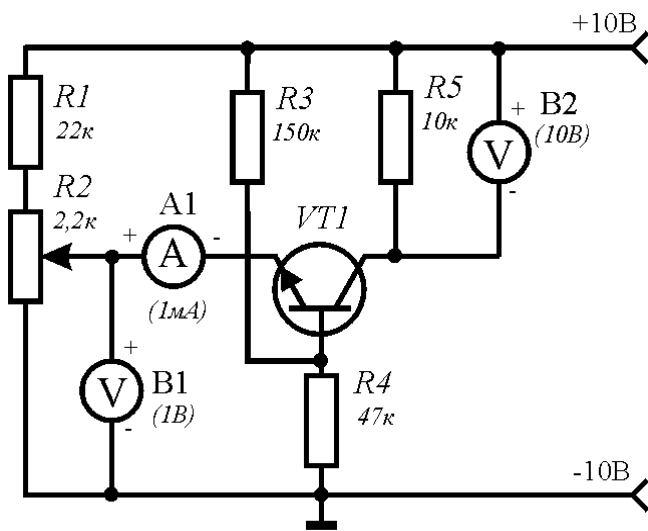


Рис.12. Схема установки для дослідження каскаду зі спільною базою.

6. Обчислити коефіцієнт підсилення за напругою  $k_u = \Delta U_{вих} / \Delta U_{вх}$ , коефіцієнт підсилення за струмом  $k_i = \Delta I_{вих} / \Delta I_{вх}$  та коефіцієнт підсилення потужності  $k_p = k_u k_i$  каскаду з включенням транзистора за схемою зі спільною базою. Дані розрахунків занести в таблицю 1.

7. Порівняти вхідні та вихідні опори, коефіцієнти підсилення за напругою, коефіцієнти підсилення за струмом та коефіцієнти підсилення потужності каскадів з різними схемами включенням транзистора та зробити відповідні висновки.

#### 4. Моделювання роботи підсилюючих каскадів з різними схемами включення транзисторів на ПК

1. Синтезувати підсилюючі каскади зі СЕ, СК та СБ, використовуючи пакет прикладних програм PCAD або WORKBENCH.
2. Дослідити роботу та визначити основні характеристики цих каскадів при змінному вхідному сигналі.
3. Зробити висновки.

## Лабораторна робота №2

Режими роботи транзисторів  
у підсилюючих каскадах

**Мета роботи:** ознайомлення з основними режимами роботи транзисторів у підсилювальних каскадах. Дослідити вплив режиму роботи транзистора на форму вихідного сигналу та основні характеристики підсилювальних каскадів.

## Теоретичні відомості

## 1. Побудова динамічної характеристики підсилюючого каскаду

На рис.1а представлена схема вихідного кола транзисторного каскаду з включенням *n-p-n* транзистора за схемою зі спільним емітером. У цьому колі протікає струм  $I_K$ . Вихідна напруга  $U_{EK}$  знімається з колектора транзистора. Таку схему можна представити у виді подільника напруги живлення (рис.1б), в якому роль "нижнього" резистора відіграє опір між емітером та колектором транзистора  $R_{EK}$ .

Струм, що протікає через подільник, згідно закону Ома, рівний

$$I_K = \frac{E}{R_K + R_{EK}}, \quad (1)$$

а вихідна напруга такого подільника дається виразом

$$U_{EK} = R_{EK} I_K = \frac{R_{EK}}{R_K + R_{EK}} E. \quad (2)$$

Суттєвим є те, що опір транзистора  $R_{EK}$  може змінюватись в дуже широких межах і залежить від вхідного струму. Це, згідно з виразами (1) та (2) приводить до зміни

вихідного струму  $I_K$  та вихідної напруги  $U_{EK}$ , можливі значення яких визначаються вихідними статичними характеристиками транзистора (див.рис.2). При  $R_{EK} = \infty$  (закритий транзистор), згідно з виразами (1) та (2), отримуємо

$$I_K = 0, \quad U_{EK} = E.$$

Такій ситуації відповідає точка А на вихідних характеристиках (рис.2). При  $R_{EK} = 0$  (повністю відкритий транзистор) маємо

$$I_K = E / R_K, \quad U_{EK} = 0.$$

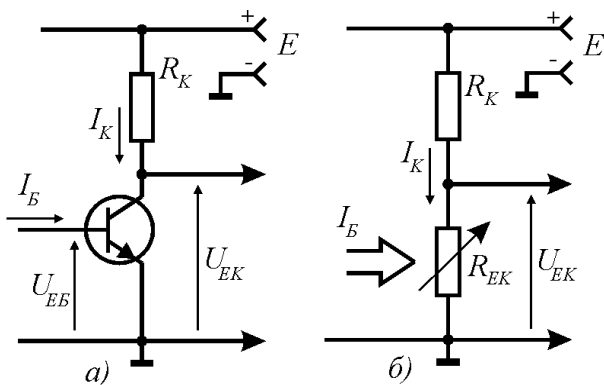


Рис.1. Схема вихідного кола транзисторного каскаду (а) та його еквівалентна схема (б).

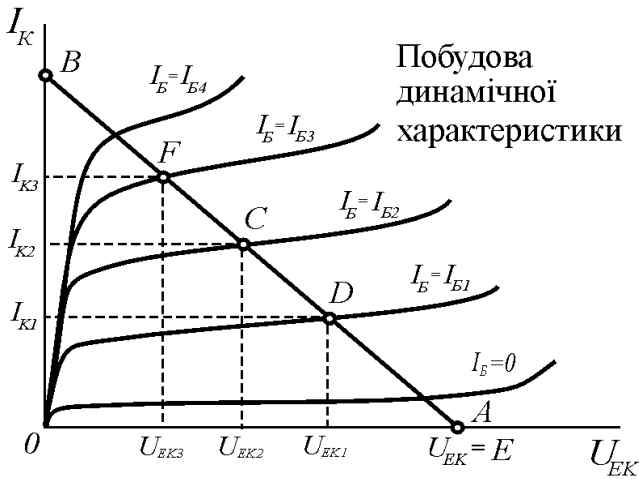


Рис.2. Вихідні характеристики транзистора та побудова динамічної характеристики.

Цей стан відповідає точці *B* на вихідних характеристиках. Лінія *AB*, що з'єднує ці дві точки, називається **динамічною характеристикою каскаду**. Певним значенням напруги  $U_{EK}$  та струму  $I_K$  відповідає точка на динамічній характеристиці, яка називається **робочою точкою** (наприклад, точка *C* на рис.2). **Положення цієї точки визначається струмом бази** (вхідним струмом). При струмі бази  $I_B = I_{B1}$  напруга  $U_{EK} = U_{EK1}$  а струм  $I_K = I_{K1}$  (точка *D* на рис.2). При струмі бази  $I_B = I_{B3}$  напруга  $U_{EK} = U_{EK3}$  а струм  $I_K = I_{K3}$  (точка *F* на рис.2) і т.д. Таким чином, зміна вхідного струму приводить до змін вихідної напруги та вихідного струму, причому зміна вихідних величин значно перевищує зміну вхідних, тобто відбувається їх підсилення.

Величина вхідного струму бази  $I_B$ , від якого, як було показано вище, залежить і вихідний струм і вихідна напруга, задається напругою між емітером та базою  $U_{EB}$  у відповідності з вхідними статичними характеристиками транзистора  $I_B = f(U_{EB})$ . Для роботи транзистора у підсилюючому каскаді необхідно задати режим його роботи за постійним струмом та режим роботи за змінним струмом.

## 2. Режим роботи транзистора за постійним струмом

Режим роботи транзистора у підсилюючому каскаді за постійним струмом визначається положенням робочої точки на динамічній характеристиці. Положення робочої точки задається вхідною напругою  $U_{EB}$ .

При відсутності вхідної напруги ( $U_{EB} = 0$ ), згідно з рис.3а, вхідний струм бази теж рівний нулю ( $I_B = 0$ ). Цей стан відповідає точці *A* на динамічній характеристиці каскаду (рис.3б). Як видно, в цьому стані струм, що протікає через транзистор  $I_K = I_{Kmin}$  є дуже малим, а спад напруги на транзисторі  $U_{EK} = U_{EKmax}$  є максимальним і наближається до величини напруги живлення  $E$ . Такий режим роботи транзистора називається **режимом відсічки**. В режимі відсічки транзистор є повністю закритим.

Збільшення вхідної напруги  $U_{EB} = U_{EB1} > 0$  приводить до збільшення вхідного струму  $I_B = I_{B1} > 0$  (див рис.3а). Робоча точка змінює своє положення на динамічній характеристиці (точка *B* на рис.3б). В такому стані транзистор характеризується певними значеннями вихідної напруги  $U_{EK1}$  та вихідного струму  $I_{K1}$ . Такий режим роботи транзистора називається **активним режимом**.

При деякій величині вхідної напруги  $U_{EB} = U_{EBmax}$  вхідний струм досягає величини  $I_B = I_{Bmax}$ . Цьому випадку відповідає точка *C* на динамічній характеристиці каскаду (рис.3б). В такому режимі спад напруги на транзисторі є мінімальним  $U_{EK} = U_{EKmin}$ , а струм, що протікає через транзистор є максимальним  $I_K = I_{Kmax}$ .

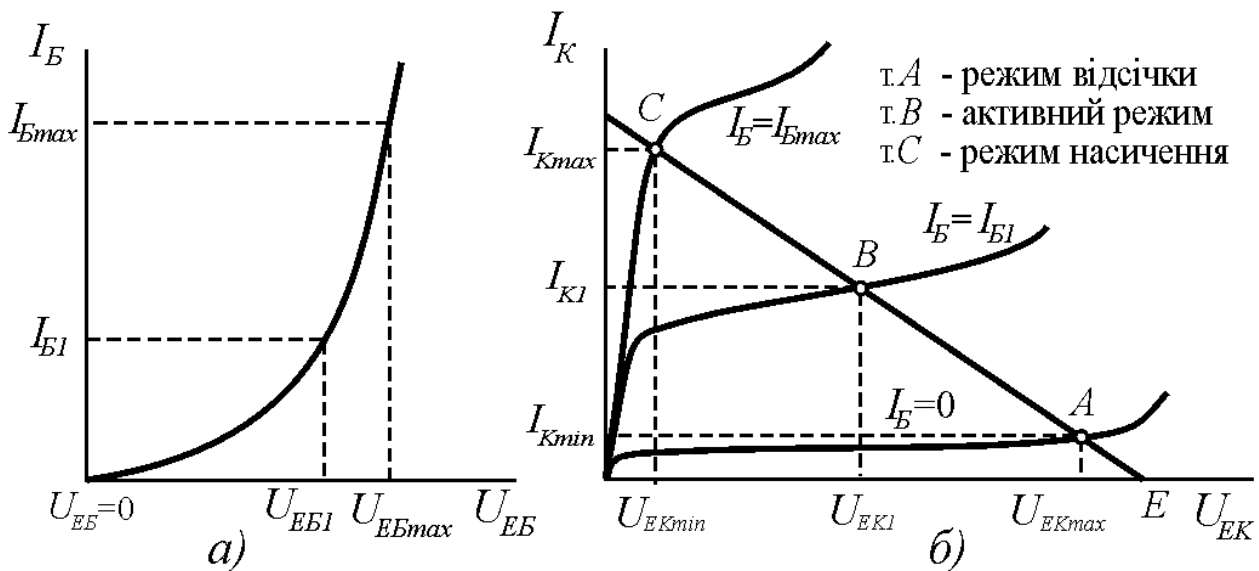


Рис.3. Режими роботи транзистора у підсилюючому каскаді за постійним струмом.

Подальше збільшення вхідної напруги та вхідного струму вже не приводить до змін відповідних вихідних величин. Тому такий режим роботи транзистора називається **режимом насичення**. Транзистор в такому режимі роботи є максимально відкритим.

### 3. Режими роботи транзистора за змінним струмом

В активному режимі робочу точку транзистора вибирають в середині динамічної характеристики (точка С на рис.4б). Для цього на базу транзистора необхідно подати деяку постійну напругу  $U_{EB} = U_{EB2}$  для створення деякого струму бази  $I_{B2}$  (див.рис.4а). Цю напругу називають **напругою зміщення**. Як правило, для цього застосовують подільник напруги на резисторах  $R1$  та  $R2$  (див.рис.5). Змінюючи опори цих резисторів, можна змінювати напругу та струм бази, а значить, задавати положення робочої точки на динамічній характеристиці каскаду.

При подачі на вхід такого каскаду змінної напруги, напруга на базі буде змінюватись від  $U_{EB1}$  до  $U_{EB3}$  (рис.4а).

У відповідності з цим, струм бази буде змінюватись від  $I_{B1}$  до  $I_{B3}$ . Це приведе до зміни за законом вхідного сигналу і вихідних величин  $U_{EK}$  та  $I_K$ , причому, як вже наголошувалось, зміни вихідних величин перевищують зміни вхідних.

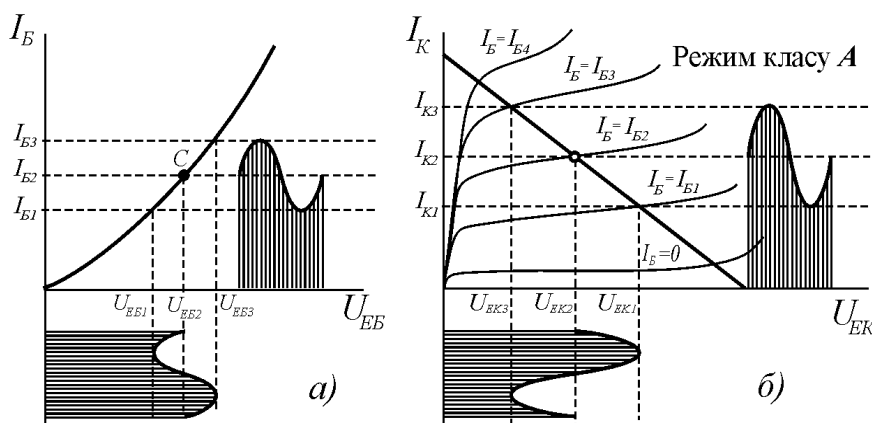


Рис.4. Робота транзисторного каскаду в режимі класу А.

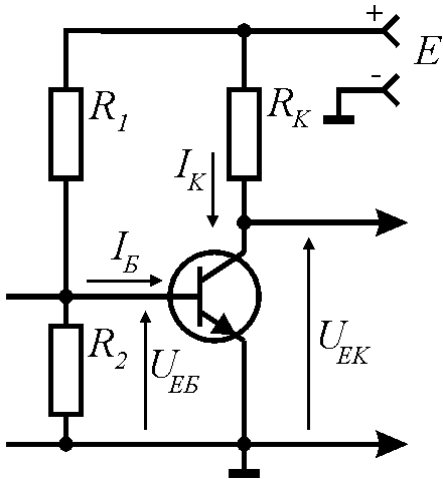


Рис.5. Схема подачі напруги зміщення на базу транзистора.

Як видно з рис.4, збільшення вхідної напруги приводить до зменшення вихідної і навпаки. Тому включення транзистора зі спільним емітером інвертує фазу вхідного сигналу на  $180^\circ$ .

Особливістю такого режиму роботи транзисторного каскаду є те, що вихідний сигнал діє на протязі всього періоду вхідного підсилюваного сигналу. Такий режим роботи транзистора за змінним струмом називають **режимом класу А**.

При відсутності напруги зміщення  $U_{EB0}=0$  транзистор переходить в режим відсічки. При подачі на вхід такого каскаду вхідного змінного сигналу струм бази  $I_B$  буде змінюватись від  $I_B=0$  до деякого значення  $I_B=I_{B2}$  (див. рис.6а). У відповідності з цим, вихідний струм буде змінюватись від  $I_K=I_{Kmin}$  до  $I_K=I_{K2}$ , а вихідна

напруга - від  $U_{EKmax}$  до  $U_{EK2}$  (див. рис.6б). Як видно, вихідний сигнал діє тільки за час половини періоду вхідного сигналу. За час дії другої половини періоду вхідного сигналу транзистор знаходиться у режимі відсічки. Такий режим роботи підсилювального каскаду за змінним струмом називається **режимом класу В**. Необхідно відмітити, що часто режим роботи А та режим роботи В транзистора у підсилювальних каскадах комбінують: такий режим роботи транзистора називають **режимом класу АВ**. Для цього, на базу транзистора, що працює в режимі В подають невелику напругу зміщення. Це приводить до того, що транзистор відсікає частину сигналу, меншу за половину періоду.

Якщо на базу транзистора подати від'ємну напругу зміщення  $U_{EB0}<0$ , то, як видно із рис.7, вихідний сигнал буде діяти за час, що менший за половину періоду вхідного сигналу. Такий режим роботи підсилювального каскаду за змінним струмом називається **режимом класу С**.

При подачі на вхід транзистора імпульсного сигналу з досить великою амплітудою, транзистор буде по чергово переходити в режим відсічки та в режим

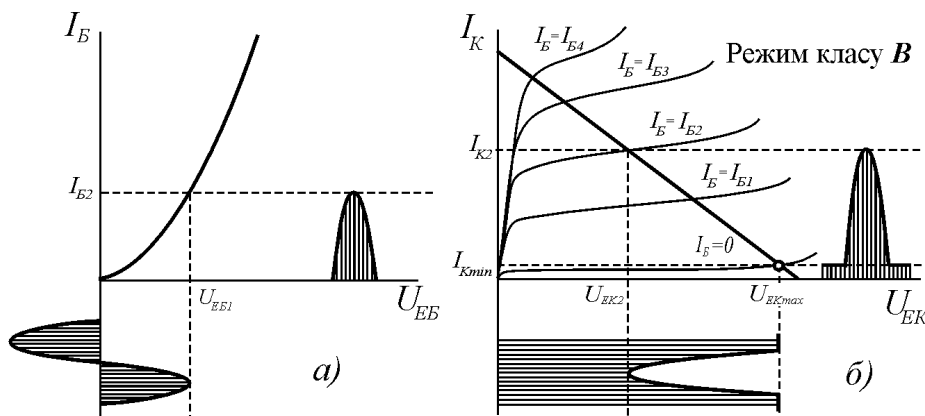


Рис.6. Робота транзисторного каскаду в режимі класу В.

насичення (див. рис.8). Такий режим роботи транзистора називають **ключовим**. В ключовому режимі транзистор працює, наприклад, в генераторах прямокутних імпульсів (мультивібраторах).

Коефіцієнт корисної дії каскаду, в якому транзистор працює в

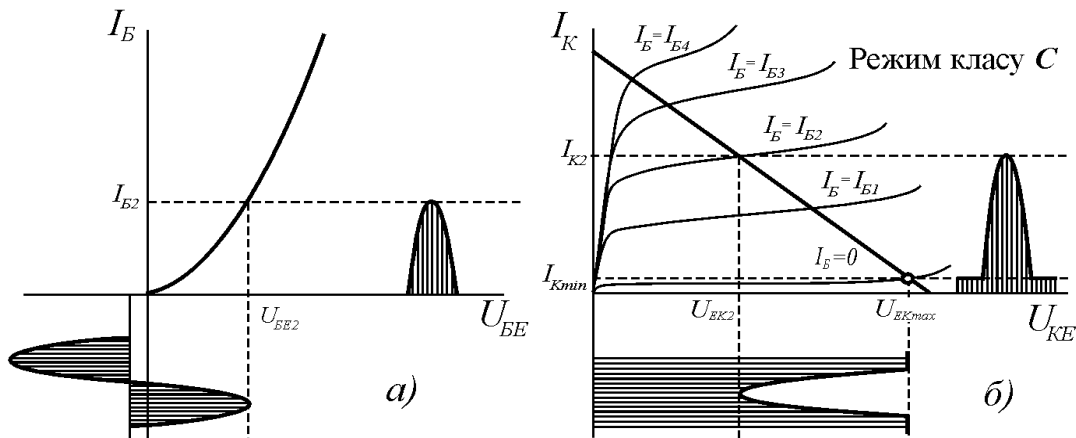


Рис.7. Робота транзисторного каскаду в режимі класу С.

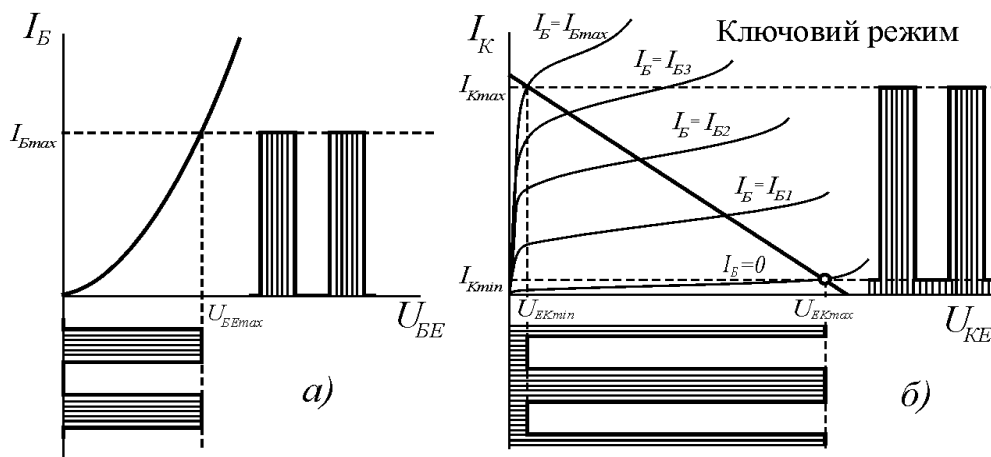


Рис.8. Робота транзисторного каскаду в ключовому режимі.

режимі А, є дуже низьким (близько 30%), так як постійна складова вихідного струму перевищує корисну змінну складову вихідного сигналу. Це приводить до того, що потужність, яка розсіюється на транзисторі у виді теплових втрат є більшою, ніж потужність корисного сигналу. Тому режим класу А використовується для підсилення малих сигналів у вхідних каскадах підсилювачів або коли вимогами економічності можна знехтувати.

Режим класу В застосовується у двотактних вихідних каскадах підсилювачів (див.лаб.роб.№9). ККД каскаду, в якому транзистор працює в режимі В складає близько 70%. Це пояснюється тим, що в цьому режимі транзистор є відкритим тільки за час дії половини періоду вихідного сигналу. За час дії другої половини періоду вихідного сигналу транзистор знаходиться у режимі відсічки, струм через нього не протікає і теплові втрати відсутні.

Режим класу С використовується в амплітудних детекторах, коли необхідно виділити сигнали, що відрізняються за амплітудою. Така необхідність виникає, наприклад, в пристроях синхронізації розгортки телевізійних приймачів та

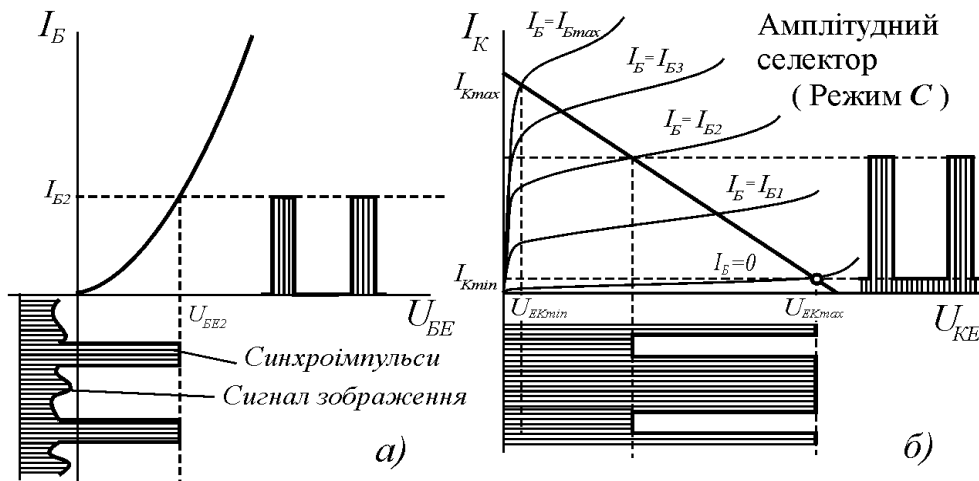


Рис.9. Використання режиму роботи транзистора класу С для виділення сигналів, що відрізняються за амплітудами.

моніторів. Вхідний відеосигнал в таких пристроях представляє собою суміш сигналу зображення та імпульсів синхронізації. Для виділення імпульсів синхронізації використовують каскад, в якому транзистор працює в режимі класу С (див рис.9).

## Резюме

1. За постійним струмом транзистор може працювати в таких режимах:

- режим відсічки (напруга на транзисторі максимальна, струм через транзистор мінімальний);
- режим насичення (напруга на транзисторі мінімальна, струм через транзистор максимальний);
- режим підсилення (напруга на транзисторі та струм, що протікає через нього мають проміжкові значення).

2. По відношенню до змінного струму транзистор може працювати в таких режимах:

- режим класу **A** (вихідний сигнал діє протягом всього періоду вхідного сигналу);
- режим класу **B** (вихідний сигнал діє протягом половини періоду вхідного сигналу);
- режим класу **AB** (вихідний сигнал діє за час, більший половини періоду вхідного сигналу);
- режим класу **C** (вихідний сигнал діє за час, менший половини періоду вхідного сигналу);
- ключовий режим (транзистор періодично знаходиться в режимах відсічки та насичення).

3. Режим роботи транзисторного каскаду за змінним струмом визначається положенням робочої точки на динамічній характеристиці каскаду.

4. Положення робочої точки визначається напругою (струмом) зміщення на базі транзистора.

## Порядок виконання роботи

### 1. Дослідження амплітудної та динамічної характеристики підсилюючого каскаду

- Зібрати схему установки для дослідження режимів роботи транзистора у підсилюючих каскадах (рис.10). Для зняття динамічної характеристики генератор та осцилограф, показані на рис.10, можна не включати. В якості вольтметра В1 використати універсальний вольтметр В7-26, в якості вольтметра В2 та амперметра А1 використати вмонтовані в лабораторний пристрій К4822-2 комбіновані електровимірювальні пристрої. Встановити вольтметр В1 на діапазон вимірювання постійної напруги 10 Вольт, вольтметр В2 - на діапазон 10 Вольт, а амперметр А1 - на діапазон 25 мА. Включити живлення установки та перевірити її працездатність.
- Поворотом ручки потенціометра  $R1$  послідовно встановлювати значення вхідної напруги  $U_{вх}$ , задані в таблиці 1. Контроль вхідної напруги проводити вольтметром В1. При цьому для кожної величини  $U_{вх}$  виміряти величину вихідної напруги  $U_{вих}$  та вихідного струму  $I_{вих}$ . Контроль вихідної напруги проводити вольтметром В2, а вихідного струму - амперметром А1. Дані занести в таблицю 1.

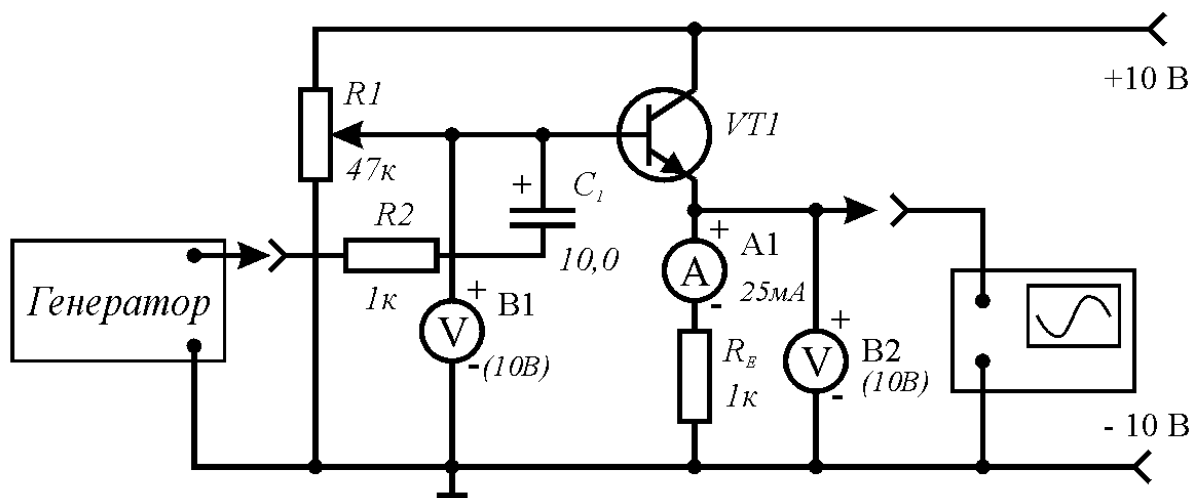


Рис.10. Схема установки для дослідження режимів роботи транзисторів у підсилюючих каскадах.

3. Для кожної величини вхідної напруги визначити напругу між емітером та колектором транзистора  $U_{EK}$  за формулою

$$U_{EK} = E - U_{вих} , \quad (3)$$

де  $E$  - напруга джерела живлення (для даної схеми вона складає 10 В). Дані занести в таблицю 1.

4. Використовуючи дані таблиці 1, побудувати амплітудну характеристику підсилюючого каскаду  $U_{вих}=f(U_{вх})$ . Побудувати динамічну характеристику каскаду  $I_K=f(U_{EK})$ . При цьому можна вважати  $I_K=I_{вих}$ .
5. На побудованих характеристиках вказати області, де транзистор працює в підсилювальному режимі, режимі відсічки та насичення.

Таблиця 1

$U_{вх} , В$	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
$U_{вих} , В$														
$I_{вих} , МА$														
$U_{ЕК} , В$														

## 2. Дослідження режиму класу А роботи транзистора в підсилюючому каскаді

1. До схеми експериментальної установки підключити, згідно з рис.10, генератор гармонічних сигналів, вмонтований в лабораторний пристрій К4822-2, та осцилограф С1-67.
2. Потенціометром  $R1$  встановити вхідну напругу  $U_{вх}=5$  В. Включити живлення генератора гармонічних сигналів. На осцилографі, підключеному до виходу схеми, повинен спостерігатись неспотворений синусоїдальний сигнал. Такий режим роботи схеми відповідає режиму роботи транзистора класу А.
3. Зарисувати епюри вихідного сигналу в режимі класу А.
4. Визначити коефіцієнт корисної дії каскаду в режимі класу А. Для цього необхідно за допомогою осцилографа визначити амплітуду вихідного сигналу  $U_m$  (див. рис.11), а за показами амперметра А1 - струм  $I_{вих}$ . Повну потужність  $P_{ПОВ}$ , що споживається схемою, та потужність корисного сигналу на виході схеми  $P_{КОР}$  визначаємо за співвідношеннями

$$P_{ПОВ} = I_{вих} E , \quad P_{КОР} = \frac{U_m^2}{2R_E} , \quad (4)$$

де  $E=10$  В (напруга джерела живлення). Коефіцієнт корисної дії визначається відношенням корисної та повної потужності:

$$\eta = \frac{P_{КОР}}{P_{ПОВ}} \times 100\% . \quad (5)$$

**2. Дослідження режиму класу АВ роботи транзистора в підсилюючому каскаді**

1. Потенціометром *R1* встановити вхідну напругу  $U_{вх}=4 В$ . На осцилографі, підключеному до виходу схеми, повинен спостерігатись спотворений синусоїдальний сигнал з "відрізаною" частиною від'ємного напівперіоду (рис.12). Такий режим роботи схеми відповідає режиму роботи транзистора класу АВ.

Таблиця 2

$U_{вх}, В$	4,0	3,0	2,0	1,0	0,7
$T$					
$\tau$					
$\phi$					

2. Зарисувати епюри вихідного сигналу в режимі класу АВ.

3. Визначити кут відсічки вихідного сигналу. Для цього, використовуючи осцилограф, визначити період вихідного

сигналу  $T$  та тривалість відсічки  $\tau$  (див.рис.12). Кут відсічки знаходимо зі співвідношення

$$\phi = \frac{\tau}{T} \times 360^{\circ} \quad (6)$$

4. Визначити кут відсічки вихідного сигналу для вхідних напруг 3 В, 2 В, 1 В, 0.7 В. Дані занести в таблицю 2.

**3. Дослідження режиму класу В роботи транзистора в підсилюючому каскаді**

1. Потенціометром *R1* встановити вхідну напругу, рівною 0.7 В. При цьому, згідно з таблицею 2, кут відсічки має складати близько  $180^{\circ}$ . Це означає, що відсікається половина (один напівперіод) гармонічного сигналу (див. рис.13). Такий режим роботи транзистора відповідає режиму класу В.

2. Зарисувати епюри вихідного сигналу в режимі класу В.

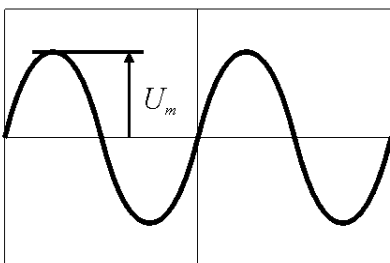


Рис.11. Епюри вихідного сигналу при роботі каскаду в режимі класу А

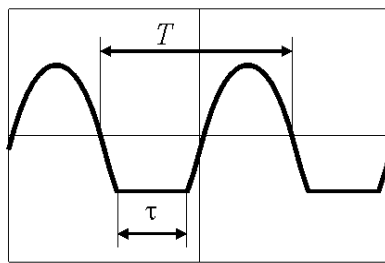


Рис.12. Епюри вихідного сигналу при роботі каскаду в режимі класу АВ

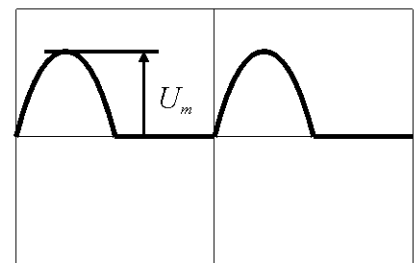


Рис.13. Епюри вихідного сигналу при роботі каскаду в режимі класу В

3. Визначити коефіцієнт корисної дії каскаду в режимі класу В. Для цього необхідно за допомогою осцилографа визначити амплітуду вихідного сигналу  $U_m$  (див. рис.13), а за показами амперметра А1 - струм  $I_{вих}$ . Повну потужність  $P_{ПОВ}$ , що споживається схемою, та потужність корисного сигналу на виході схеми  $P_{КОР}$  визначаємо за співвідношеннями

$$P_{ПОВ} = I_{вих}E , \quad P_{КОР} = \frac{U_m^2}{4R_E} , \quad (7)$$

де  $E=10$  В (напруга джерела живлення). Коефіцієнт корисної дії визначається відношенням корисної та повної потужності за співвідношенням (5).

#### 4. Дослідження режиму класу С роботи транзистора в підсилюючому каскаді

1. Потенціометром  $R1$  встановити вхідну напругу, рівною 0,2 В. Визначити кут відсічки  $\varphi$ . Його величина має бути більшою за  $180^\circ$ . Такий режим роботи транзистора відповідає режиму класу С.
2. Зарисувати епюри вихідного сигналу в режимі класу С.
3. Порівняти коефіцієнти корисної дії каскадів при роботі в режимах А та В. Зробити відповідні висновки.

#### 5. Моделювання роботи підсилюючого каскаду в різних режимах роботи транзистора на ПК.

1. Синтезувати підсилюючий каскад на ПК, використовуючи пакет прикладних програм PCAD або WORKBENCH.
2. Змінюючи напругу зміщення, дослідити роботу схеми в режимах А, В, АВ, С та ключовому режимі.
3. Зробити висновки.

## Лабораторна робота №3

### Підсилюючі каскади

**Мета роботи:** ознайомлення з основними типами транзисторних підсилюючих каскадів: резистивно-ємнісним каскадом, двотактним вихідним каскадом та диференційним підсилювачем. Дослідити роботу та визначити основні характеристики вказаних типів каскадів.

### Теоретичні відомості

#### 1. Резистивно-ємнісний підсилюючий каскад

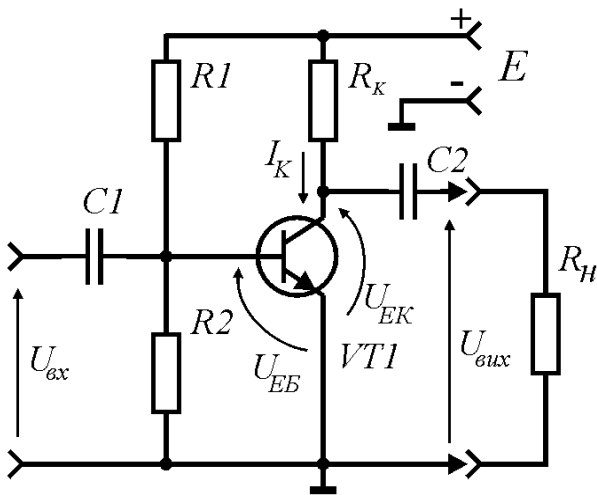


Рис.1. Принципова електрична схема RC-каскаду.

Принципова електрична схема RC-каскаду показана на рис.1. Вихідне коло такого каскаду складається з послідовно включених резистора  $R_K$  та транзистора. Резистор  $R_n$  виступає в ролі навантаження каскаду. Вихідний сигнал знімається з колектора транзистора через розділовий конденсатор  $C_2$ . Резистори  $R_1$  та  $R_2$  утворюють подільник напруги живлення для подачі зміщення на базу транзистора. Напруга зміщення задає положення робочої точки на динамічній характеристиці каскаду, тобто режим роботи транзистора. Вхідний сигнал через розділовий конденсатор  $C_1$  подається на базу транзистора.

Розглянемо часові діаграми роботи такого каскаду (рис.2). При відсутності вхідного сигналу  $U_{вх}=0$  на базі транзистора діє постійна напруга зміщення  $U_{EB}=U_{зм}$  (рис.2б). Ця напруга зміщення відкриває транзистор і через нього протікає постійний струм спокою  $I_{K0}$  (рис.2в). Спад напруги на транзисторі при відсутності вхідного сигналу рівний  $U_{EK0}$  (рис.2г). Так як конденсатор постійний струм не пропускає, то вихідний сигнал буде рівний нулю  $U_{вих}=0$  (рис.2.д).

При подачі на вхід каскаду змінного сигналу, вхідна напруга додається до напруги зміщення і на базі транзистора буде діяти сигнал, зображений на рис.2б. За законом цього сигналу буде змінюватись і напруга  $U_{EK}$  і струм колектора  $I_K$  (рис.2в,2г). Ці сигнали представляють собою суму постійної складової та змінної складової. Розділовий конденсатор  $C_2$  відсікає постійну складову, тому на виході каскаду отримуємо тільки підсилений змінний сигнал (рис.2д). Як видно з наведених діаграм, такий каскад інвертує фазу вхідного сигналу на  $180^\circ$ .

Основними параметрами  $RC$  каскаду є:

- коефіцієнт підсилення напруги  $k_u = U_{вих}/U_{вх}$ ;
- вхідний опір  $R_{вх}$ ;
- вихідний опір  $R_{вих}$ ;
- амплітудно-частотна характеристика (АЧХ)  $k_u = k_u(f)$ .

Коефіцієнт підсилення залежить від режиму роботи транзистора за постійним струмом, коефіцієнта передачі струму бази  $h_{21E}$  та від опору  $R_K$ . Збільшення колекторного опору веде до збільшення коефіцієнта підсилення.

Так як опір джерела живлення  $E$  є дуже малим, то для вхідного змінного сигналу виводи "+" та "-" джерела живлення є еквівалентними. Тому вхідний опір підсилюючого каскаду визначається паралельно включеними (для змінного струму) опором резисторів  $R1$  та  $R2$ . Вихідний опір такого каскаду практично рівний опору резистора  $R_K$ .

Вид амплітудно-частотної характеристики підсилюючого каскаду залежить від ємності конденсаторів  $C1$  та  $C2$  та частотних властивостей транзистора. При зменшенні частоти вхідного сигналу зростає реактивний опір конденсаторів, що приводить до зменшення коефіцієнта підсилення каскаду. На високих частотах зменшуються підсилювальні властивості транзистора, що також приводить до

зменшення коефіцієнта підсилення. Тому для розширення робочої смуги частот в сторону низьких частот необхідно ємності конденсаторів  $C1$  та  $C2$  вибирати якомога більшими, а для розширення смуги частот підсилювача в сторону високих частот необхідно застосовувати височастотні транзистори або вводити спеціальні коректуючі кола.

Суттєвим недоліком схеми  $RC$ -каскаду, приведеної на рис.1, є відсутність температурної стабілізації струму колектора. Струм колектора транзистора такого каскаду сильно залежить від температури. Збільшення температури приводить до зростання струму через транзистор, що, в свою чергу, приводить до ще більшого його розігріву і подальшого збільшення колекторного струму. Процес наростає лавиноподібно, що може привести до теплового пробію і виходу транзистора з ладу. Тому застосовують різні схеми температурної стабілізації положення робочої точки.

При *емітерній стабілізації* в коло емітера включають додатковий резистор  $R_E$

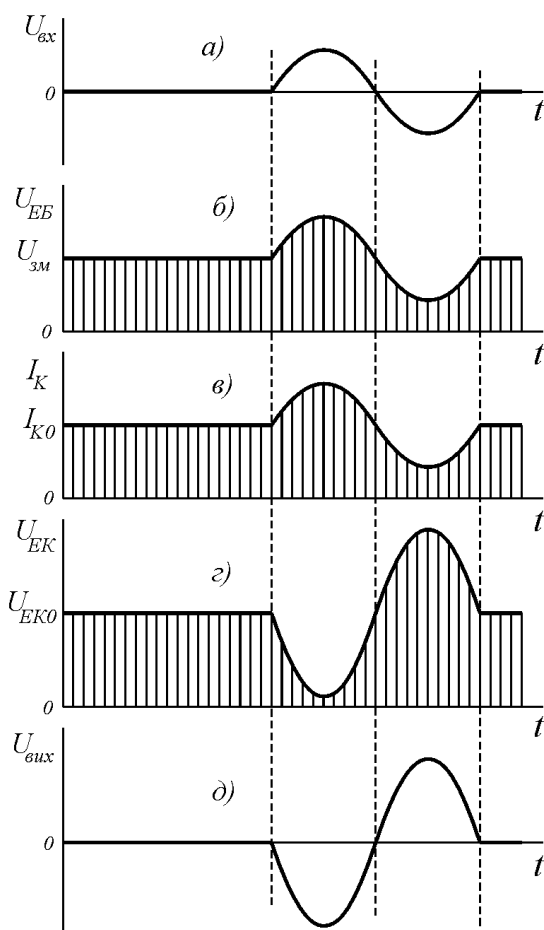


Рис.2. Часові діаграми роботи  $RC$ -каскаду.

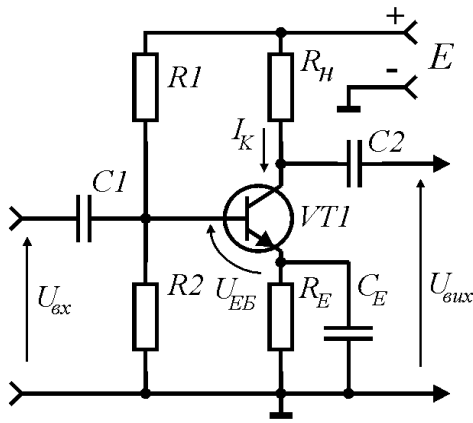


Рис.3. Схема  $RC$ -каскаду з емітерною стабілізацією положення робочої точки.

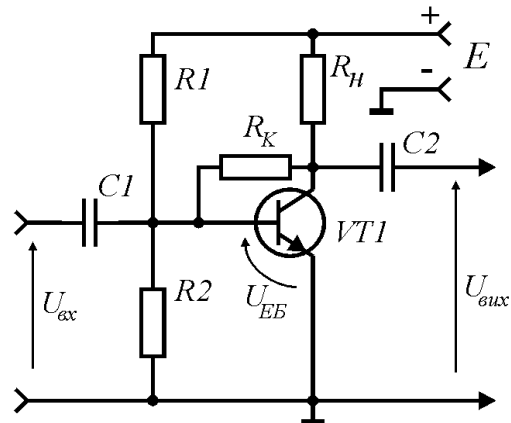


Рис.4. Схема  $RC$ -каскаду з колекторною стабілізацією положення робочої точки.

(рис.3). Збільшення температури приводить до збільшення струму через цей резистор, внаслідок чого збільшується падіння напруги на ньому. Так як напруга вхідного сигналу та напруга на резисторі  $R_E$  знаходяться в протифазі, то результуюча напруга між емітером та базою транзистора зменшується і струм через транзистор повертається до свого попереднього значення.

Емітерна стабілізація робочої точки є досить ефективною і застосовується найбільш часто. Ефективність стабілізації є тим більшою, чим більший опір резистора  $R_E$ , однак при цьому зменшується коефіцієнт підсилення каскаду. Тому резистор  $R_E$  часто шунтують конденсатором великої ємності ( $C_E$  на рис.3), опір якого для змінного струму є дуже малим. Це приводить до того, що змінна складова вихідного струму протікає через конденсатор, а не через резистор, внаслідок чого збільшується коефіцієнт підсилення каскаду за змінним струмом.

При **колекторній стабілізації** робочої точки між колектором та базою транзистора включають опір  $R_K$  (див. рис.4), який передає частину вихідної напруги на вхід каскаду. Збільшення струму через транзистор внаслідок нагрівання приводить до зменшення напруги на колекторі, а значить, і на базі транзистора, що приводить до повернення струму через транзистор до попереднього значення.

Колекторну стабілізацію застосовують досить рідко внаслідок її меншої ефективності в порівнянні зі схемами емітерної стабілізації. Часто колекторну та емітерну стабілізацію робочої точки застосовують одночасно, створюючи, тим самим, схему **комбінованої стабілізації**. За своєю суттю і емітерна, і колекторна стабілізація робочої точки полягає у введенні в підсилювач від'ємного зворотнього зв'язку, коли частина сигналу з виходу підсилювача подається в протифазі на його вхід (див.лаб.роб.№10).

## 2. Двотактний вихідний каскад

Основною вимогою, що ставиться до вихідних каскадів підсилювачів, є забезпечення потрібної потужності в навантаження при максимально можливому

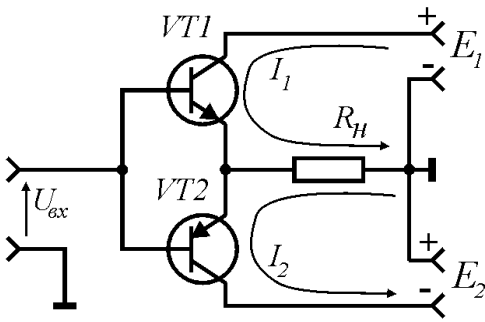


Рис.5. Принципова електрична схема двотактного вихідного каскаду.

використанні енергії джерела живлення (максимальному ККД). Тому транзистори у вихідних каскадах працюють в режимі великих амплітуд напруг та струмів. В таких режимах на колекторі транзисторів розсіюється велика потужність, що виділяється у виді тепла. Тому у вихідних каскадах застосовують потужні транзистори та приймають спеціальні засоби для відводу від них тепла. Найчастіше транзистори вихідних каскадів встановлюють на радіатори, а в деяких випадках навіть застосовують вентилятори.

Однотактні вихідні каскади застосовують дуже рідко, адже в таких каскадах транзистори працюють в режимі класу А, коефіцієнт корисної дії якого не перевищує 40%. Тому найчастіше в якості вихідних використовують двотактні каскади, в яких транзистори працюють в режимі класу В, що дозволяє забезпечити відносно великий ККД (близько 70%).

Принципова електрична схема найпростішого двотактного вихідного каскаду з транзисторами різного типу провідності наведена на рис.5. Застосування транзисторів різного типу провідності дозволяє відмовитися від включення на виході розділового конденсатора, однак при цьому необхідні два джерела живлення  $E_1$  та  $E_2$ . Транзистори в каскаді, зображеному на рис.5, включені за схемою зі

спільним колектором, тому такий каскад підсилює тільки струм. Це означає, що підсилення напруги до заданої величини повинні забезпечити каскади попереднього підсилення.

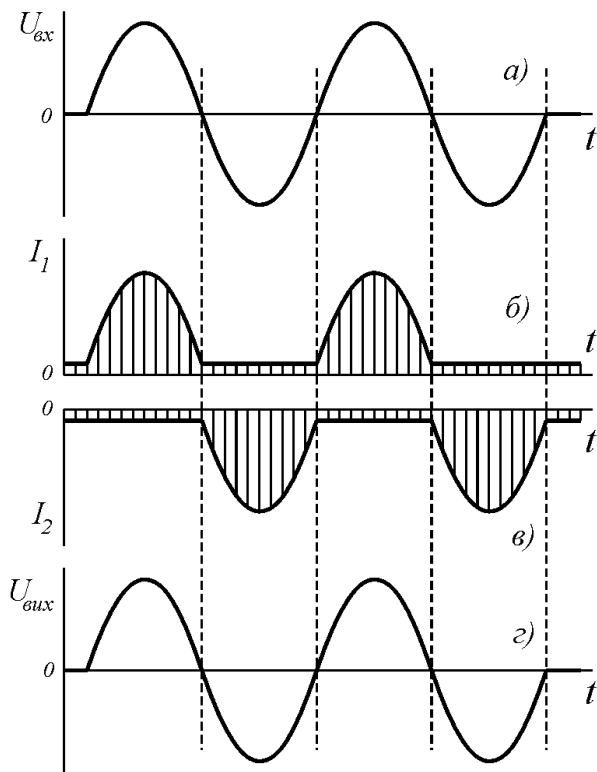


Рис.6. Часові діаграми роботи двотактного вихідного каскаду.

При подачі на вхід такого каскаду змінного сигналу, транзистори по чергово відкриваються і закриваються. Під час дії додатнього напівперіоду вхідного сигналу транзистор  $VT_1$  відкривається і через відкритий транзистор та опір навантаження  $R_n$  протікає струм  $I_1$  від джерела живлення  $E_1$ . Транзистор  $VT_2$  в цей час закритий (переходить в режим відсічки). Під час дії від'ємного напівперіоду вхідного сигналу відкривається транзистор  $VT_2$  і через цей відкритий транзистор та опір навантаження  $R_n$  протікає струм  $I_2$  від джерела живлення  $E_2$ . В цей час транзистор  $VT_1$  є закритим. Часові діаграми роботи двотактного вихідного каскаду представлені на рис.6.

Для передачі максимальної потужності в навантаження вихідний опір такого каскаду

повинен дорівнювати опору навантаження  $R_n$ . Якщо таку умову виконати не вдається, то опір навантаження включають до виходу каскаду через спеціальний узгоджувачий трансформатор.

Слід відмітити, що коефіцієнт нелінійних спотворень двотактного вихідного каскаду є більшим, ніж однокласного каскаду, що працює в режимі класу А. Тому часто транзистори в двотактних підсилювачах переводять в режим класу АВ. Для цього на бази транзисторів подають невелику напругу зміщення для запобігання їх переходу в режим відсічки. Це дозволяє зменшити коефіцієнт нелінійних спотворень, хоча і дещо зменшує ККД каскаду.

### 3. Диференційний підсилювач

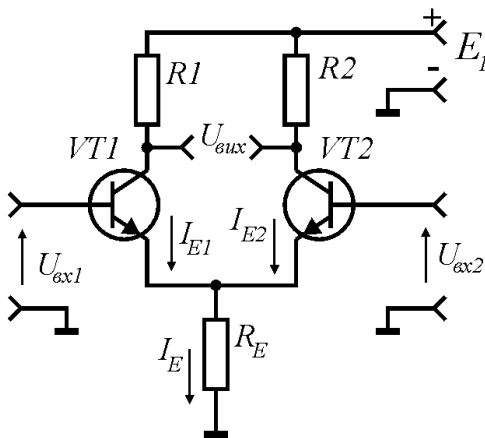


Рис.7. Принципова електрична схема диференційного підсилювача.

Диференційний підсилюючий каскад представляє собою двохтранзисторну схему з об'єднаними емітерами, що призначена для підсилення різниці вхідних сигналів. Принципова електрична схема такого підсилювача наведена на рис.7. Як видно, диференційний каскад має два входи та два виходи. Вхідний сигнал може бути поданий симетрично - між базами транзисторів або несиметрично - між базою одного з транзисторів та спільним провідником. При несиметричній подачі вхідного сигналу на один із входів інший вхід, що не використовується, повинен бути під'єднаний до спільного провідника або безпосередньо, або через резистор. Вихідний сигнал також можна знімати симетрично - між колекторами транзисторів, або несиметрично - між колектором одного з транзисторів та спільним провідником. Якщо сигнал подається на вхід та знімається з виходу несиметрично, то диференційний каскад може бути інвертуючим та неінвертуючим. При несиметричному виході один із колекторів може бути з'єднаний безпосередньо з виводом джерела живлення без колекторного резистора.

Як видно з рис.7, струм, що протікає через резистор  $R_E$  рівний сумі струмів, що протікають у вітках диференційного каскаду

$$I_E = I_{E1} + I_{E2} . \quad (1)$$

Опір резистора  $R_E$  вибирають таким, щоб струм через нього  $I_E$  був практично постійним і не залежав від величини вхідних та вихідних сигналів. Для цього його опір повинен бути якомога більшим, однак при цьому зменшується коефіцієнт підсилення каскаду. Тому часто замість резистора  $R_E$  в коло включають так званий генератор струму, що забезпечує постійність  $I_E$ .

При симетричному виході і відсутності сигналів на входах вихідна напруга буде дорівнювати нулю, так як при однакових параметрах транзисторів та однакових колекторних опорах через них будуть протікати однакові струми  $I_{E1} =$

$I_{E2}$ , що спричинить однакові падіння напруги на цих опорах. При подачі на один із входів сигналу, струм у відповідній вітці зміниться, що спричинить зміну колекторної напруги і появу вихідного сигналу. З виразу (1) видно, що зміна струму в одній вітці приводить до протилежної зміни струму в іншій вітці диференційного підсилювача, так як  $I_E = const$ . Тому диференційний каскад підсилює тільки різницю напруг на входах:

$$U_{вих} = k_u (U_{вх1} - U_{вх2}) . \quad (2)$$

При однакових (синфазних) вхідних сигналах  $U_{вх1} = U_{вх2}$ , тому вихідний сигнал буде рівний нулю. При  $U_{вх2} = 0$  з виразу (2) отримуємо:

$$U_{вих} = k_u U_{вх1} . \quad (3)$$

При  $U_{вх1} = 0$  маємо

$$U_{вих} = -k_u U_{вх2} . \quad (4)$$

Таким чином, при подачі вхідного сигналу на один із входів вихідний сигнал буде співпадати за фазою з вхідним, а при подачі сигналу на інший вхід, вихідний сигнал буде інвертувати фазу вхідного сигналу на  $180^\circ$ . Тому один із входів диференційного підсилювача називають інвертуючим, а інший - неінвертуючим.

Диференційні каскади широко використовуються в різних радіотехнічних пристроях. Основна їх перевага - зручність побудови інвертуючих та неінвертуючих підсилювачів. Найбільш часто їх застосовують в операційних підсилювачах, де диференційний каскад є першим вхідним каскадом таких підсилювачів (див.лаб.роб.№10).

## Резюме

1. У резистивно-ємнісному каскаді збільшення колекторного опору веде до збільшення коефіцієнта підсилення, а збільшення емітерного опору веде до зменшення коефіцієнта підсилення.
2. У двотактному вихідному каскаді транзистори працюють в режимі класу В. Кожен транзистор підсилює тільки один напівперіод вхідного сигналу.
3. Диференційний каскад підсилює тільки різницю вхідних сигналів і має інвертуючий та неінвертуючий входи.

## Порядок виконання роботи

### 1. Дослідження характеристик підсилюючого RC-каскаду

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи RC-каскаду (рис.8). В якості генератора використати вмонтований в лабораторний пристрій К4822-2 генератор гармонічних сигналів. Перевірити працездатність схеми.

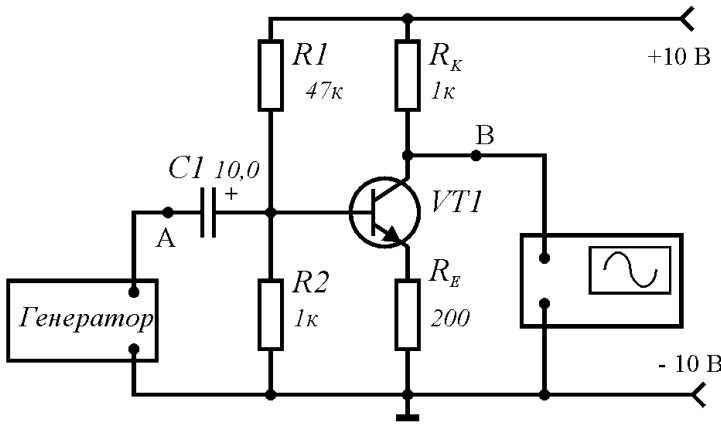


Рис.8. Схема установки для дослідження роботи RC-каскаду.

Таблиця 1

$R_E = 200 \text{ Ом}$	$R_K$	1,0 к	1,5 к	3,3 к	4,7 к
	$k_u$				
$R_K = 1,5 \text{ кОм}$	$R_E$	100	200	330	470
	$k_u$				

$R_E = \text{const.}$

## 2. Дослідження роботи диференційного підсилювача

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи диференційного підсилювача (рис.9). Перевірити її працездатність.
2. Підключити осцилограф до точки A схеми і потенціометром R1 встановити вхідну напругу лівого плеча диференційного підсилювача рівною нулю  $U_{вх1} = 0$ .
3. Підключити осцилограф до точки B схеми і виміряти вхідну напругу  $U_{вх2}$  правого плеча диференційного підсилювача.
4. Підключити осцилограф до точки D схеми і виміряти вихідну напругу  $U_{вих2}$  правого плеча підсилювача. Визначити коефіцієнт підсилення  $k_u$  при несиметричному виході:

$$k_u = U_{вих2} / U_{вх2} \tag{6}$$

5. Підключити осцилограф до точки C диференційного підсилювача і виміряти вихідну напругу лівого плеча диференційного підсилювача. Впевнитись у тому, що вихідні напруги лівого і правого плеча однакові  $U_{вих1} = U_{вих2}$ .

2. Підключивши осцилограф до точки A схеми (рис.8), виміряти вхідну напругу  $U_{вх}$ . Підключивши осцилограф до точки B схеми, виміряти вихідну напругу  $U_{вих}$ . Визначити коефіцієнт підсилення каскаду:

$$k_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} \tag{5}$$

3. При незмінному емітерному опорі  $R_E = 200 \text{ Ом}$ , послідовно змінюючи колекторний опір  $R_K$  на вказані в таблиці 1 значення, визначити коефіцієнт підсилення каскаду. Дані занести в таблицю 1.

4. Встановити колекторний опір рівним  $R_K = 1,5 \text{ кОм}$ . Послідовно змінюючи емітерний опір  $R_E$  на вказані в таблиці 1 значення, визначити коефіцієнт підсилення каскаду. Дані занести в таблицю 1.

5. Побудувати залежності  $k_u = f(R_K)$  при  $R_E = \text{const}$  та  $k_u = f(R_E)$  при  $R_K = \text{const}$ .

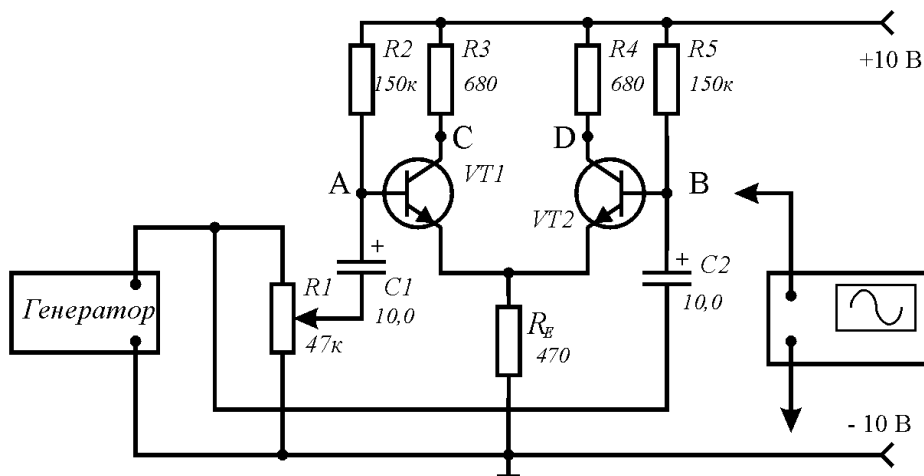


Рис.9. Схема установки для дослідження роботи диференційного підсилювача.

6. Осциллографом виміряти вихідну напругу  $U_{вих12}$  при симетричному виході між точками C і D схеми. Визначити коефіцієнт підсилення при симетричному виході:

$$k_u = U_{вих12} / U_{вх2} . \quad (7)$$

Порівняти коефіцієнти підсилення при симетричному і несиметричному виходах.

7. Змінюючи потенціометром R1 вхідну напругу  $U_{вх1}$  лівого плеча диференційного підсилювача, впевнитись, що при будь-якому його положенні вихідні напруги кожного плеча однакові, а напруга між двома плечами рівна їх сумі.

Таблиця 2

$U_{вх1}$				
$U_{вх2}$				
$U_{вих12}$				

8. Змінюючи положення ручки потенціометра R1 від мінімального до максимального положення, записати декілька значень напруг  $U_{вх1}$ ,  $U_{вх2}$  та  $U_{вих12}$ . Дані занести в таблицю 2.

Побудувати залежність  $U_{вих12} = f(U_{вх1} - U_{вх2})$ .

9. Зробити висновки.

### 3. Моделювання роботи основних типів підсилюючих каскадів на ПК

1. Синтезувати RC-, двотактний та диференційний каскад на ПК, використовуючи пакет прикладних програм PCAD або WORKBENCH.
2. Дослідити часові залежності сигналів на входах і виходах цих каскадів.
3. Зробити висновки.

## Лабораторна робота №4

## Операційні підсилювачі

**Мета роботи:** ознайомлення з основними параметрами та характеристиками операційних підсилювачів (ОП). Дослідження роботи інвертуючого та неінвертуючого підсилювача, суматора на основі ОП.

## Теоретичні відомості

## 1. Загальна характеристика операційних підсилювачів

**Операційним** називають диференційний підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, виконаний у виді інтегральної мікросхеми. Термін *операційний* означає, що даний підсилювач може виконувати математичні операції. Термін *диференційний* означає, що такий підсилювач підсилює різницю вхідних сигналів. Тому операційний підсилювач має два входи і один вихід (див.рис.1). Один із входів називають *неінвертуючим*, так як вихідний сигнал знаходиться у фазі з вхідним. Другий вхід називають *інвертуючим*, так як вихідний сигнал знаходиться у протифазі з вхідним. Інвертуючий вхід ОП позначають знаком інверсії (рис.1). Операційний підсилювач складається з диференціального каскаду на вході, підсилювача напруги та вихідного каскаду, призначеного для підсилення потужності вихідного сигналу. Для живлення ОП використовують два різнополярних джерела живлення  $E1$  та  $E2$ .

Ідеальний операційний підсилювач характеризується такими параметрами:

- нескінченно великий коефіцієнт підсилення  $k_u = \infty$ ;
- нескінченно великий вхідний опір  $R_{вх} = \infty$ ;
- нульовий вихідний опір  $R_{вих} = 0$ .

Реальні операційні підсилювачі мають коефіцієнт підсилення  $k_u = 10^3 - 10^6$ , вхідний опір складає сотні - тисячі кілоом, а вихідний - десятки-сотні ом. Інтегральні ОП є універсальними. Вони можуть виконувати не тільки математичні операції, але і застосовуватись в різних генеруючих, підсилюючих та перетворюючих сигнали пристроях. Результуючі характеристики пристроїв, побудованих на операційних підсилювачах, повністю визначаються параметрами зовнішніх зворотних зв'язків.

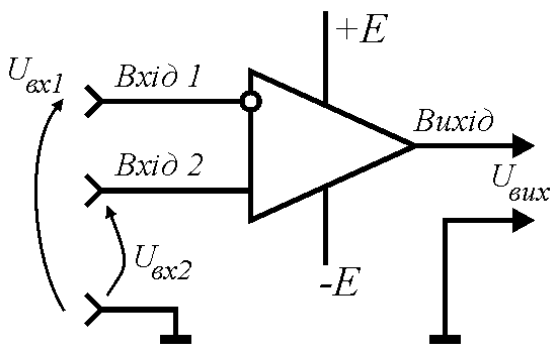


Рис.1. Операційний підсилювач.

## 2. Зворотні зв'язки у підсилювачах

**Зворотнім зв'язком** називають передачу частини енергії вихідного сигналу на

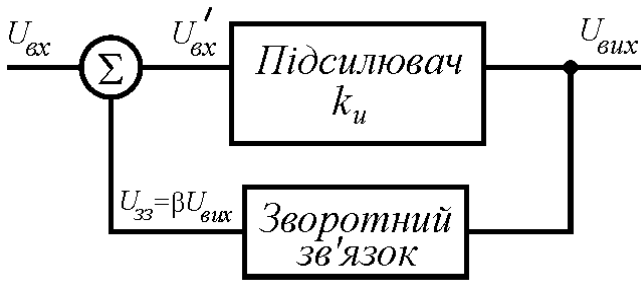


Рис.2. Структурна схема підсилювача зі зворотнім зв'язком.

вхід підсилювача. Якщо сигнал зворотнього зв'язку (ЗЗ) співпадає за фазою з вхідним сигналом, то такий зворотній зв'язок називається **додатнім**. Якщо сигнал зворотнього зв'язку знаходиться в протифазі з вхідним сигналом, то такий зворотній зв'язок називається **від'ємним**. Розрізняють зворотні зв'язки за **напругою**, коли на вхід підсилювача передається частина вихідної напруги, та за **струмом**, коли на вхід підсилювача передається частина

вихідного струму. Окрім цього, в залежності від способу подачі частини вихідного сигналу на вхід підсилювача, розрізняють **послідовний** та **паралельний** зворотній зв'язок. При послідовному ЗЗ частина вихідного сигналу подається послідовно з вхідним сигналом, а при паралельному - паралельно.

Розглянемо структурну схему підсилювача зі зворотнім зв'язком (див.рис.2). Підсилювач без ЗЗ характеризується коефіцієнтом підсилення  $k_u$ . Через коло зворотнього зв'язку на вхід підсилювача подається частина вихідного сигналу

$$U_{зз} = \beta U_{вих} . \tag{1}$$

Коефіцієнт  $\beta$  називається **коефіцієнтом передачі** кола зворотнього зв'язку, або, для простоти - **коефіцієнтом зворотнього зв'язку**. Як видно з рис.2, на вході підсилювача буде діяти вхідний сигнал

$$U'_{вх} = U_{вх} + U_{зз} = U_{вх} + \beta U_{вих} . \tag{2}$$

Цей сигнал буде підсилений в  $k_u$  раз:

$$U_{вих} = k_u U'_{вх} = k_u U_{вх} + \beta k_u U_{вих} . \tag{3}$$

Коефіцієнт підсилення підсилювача зі зворотнім зв'язком буде

$$k = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} = k_u + \beta k_u k . \tag{4}$$

Звідси

$$k = \frac{k_u}{1 - \beta k_u} . \tag{5}$$

При цьому вважається, що при додатньому  $\beta$  зворотній зв'язок є додатнім, а при від'ємному  $\beta$  - від'ємним. З виразу (5) слідує, що при  $\beta=0$  (зворотній зв'язок відсутній) коефіцієнт підсилення  $k=k_u$ . Збільшення коефіцієнта  $\beta$  при додатньому ЗЗ збільшує коефіцієнт підсилення каскаду, який при  $\beta k_u=1$  стає рівним нескінченності. Збільшення коефіцієнта  $\beta$  при від'ємному зворотньому зв'язку зменшує коефіцієнт

підсилення каскаду, який при  $\beta = -1$  (100%-й від'ємний зворотній зв'язок) стає рівним одиниці (вважається, що  $k_u \gg 1$ ).

Додатній зворотній зв'язок, що збільшує коефіцієнт підсилення, реалізується в генераторах електричних сигналів. У підсилювачах використовують тільки від'ємний ЗЗ. Хоча коефіцієнт підсилення зменшується, однак при цьому покращуються всі основні експлуатаційні параметри підсилювача: збільшується температурна стабільність, зменшуються нелінійні спотворення та коефіцієнт гармонік, розширюється смуга підсилюваних частот, збільшується вхідний опір і зменшується вихідний. Ведення в підсилювач додатнього зворотнього зв'язку погіршує ці параметри.

Слід відмітити, що в загальному випадку коефіцієнт зворотнього зв'язку  $\beta$  є комплексною величиною, що означає його частотну залежність. Введення частотозалежного ЗЗ дозволяє коректувати АЧХ підсилювачів, будувати активні фільтри та генератори гармонічних сигналів.

### 3. Інвертуючі та неінвертуючі підсилювачі

Для випадку від'ємного зворотнього зв'язку коефіцієнт  $\beta$  є від'ємним. Тому вираз (5) запишемо у виді

$$k = \frac{k_u}{1 + \beta k_u} \quad (6)$$

Розділимо чисельник і знаменник даного співвідношення на  $k_u$ :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_u} + \beta} \quad (7)$$

При досить великому коефіцієнті підсилення  $k_u$ , що має місце у випадку операційного підсилювача, першим доданком у знаменнику виразу (7) можна знехтувати в силу його малості. Тоді отримуємо:

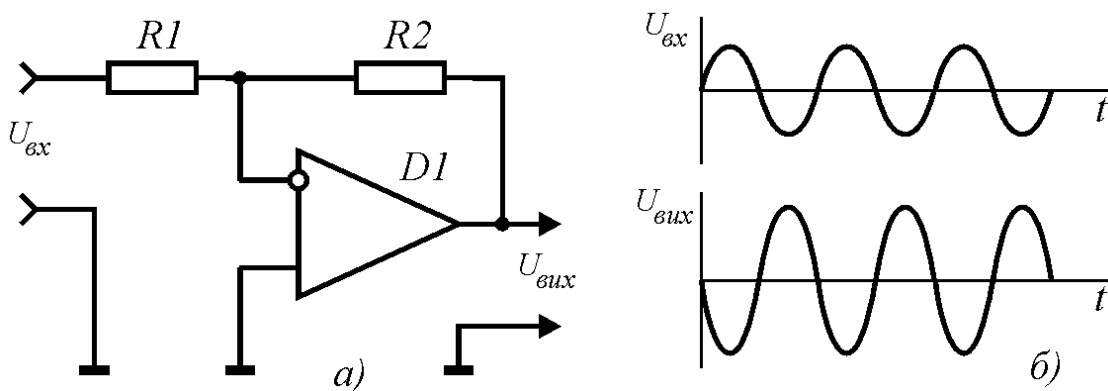


Рис.3. Принципова електрична схема інвертуючого підсилювача (а) та часові діаграми його роботи (б).

$$k_u = \frac{1}{\beta} . \quad (8)$$

Це означає, що коефіцієнт підсилення каскаду зі зворотнім зв'язком  $k$  вже не залежить від коефіцієнта підсилення самого каскаду  $k_u$ , а **визначається тільки коефіцієнтом  $\beta$ , тобто властивостями самого зворотнього зв'язку!** Це дозволяє на основі операційних підсилювачів будувати каскади з заданим коефіцієнтом підсилення.

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП наведена на рис.3 (виводи живлення операційного підсилювача для спрощення не показані). Вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід. Резистори  $R1$  та  $R2$  утворюють коло від'ємного зворотнього зв'язку, через яке частина вихідного сигналу подається на інвертуючий вхід. Коефіцієнт передачі ЗЗ дається виразом

$$\beta = \frac{R1}{R2} . \quad (9)$$

Підставляючи співвідношення (9) у (8) отримуємо

$$k = \frac{R2}{R1} . \quad (10)$$

Вхідний опір такого підсилювача практично рівний опору резистора  $R1$ .

Принципова електрична схема неінвертуючого підсилювача наведена на рис.4. Вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід. На інвертуючий вхід подається напруга від'ємного зворотнього зв'язку, що знімається з подільника на резисторах  $R1$  та  $R2$ . Коефіцієнт передачі напруги такого подільника дається виразом

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2} . \quad (11)$$

Підставляючи (11) у (8) отримуємо

$$k = \frac{R1 + R2}{R1} . \quad (12)$$

Вхідний опір такого підсилювача є дуже великим і визначається типом застосованих ОП.

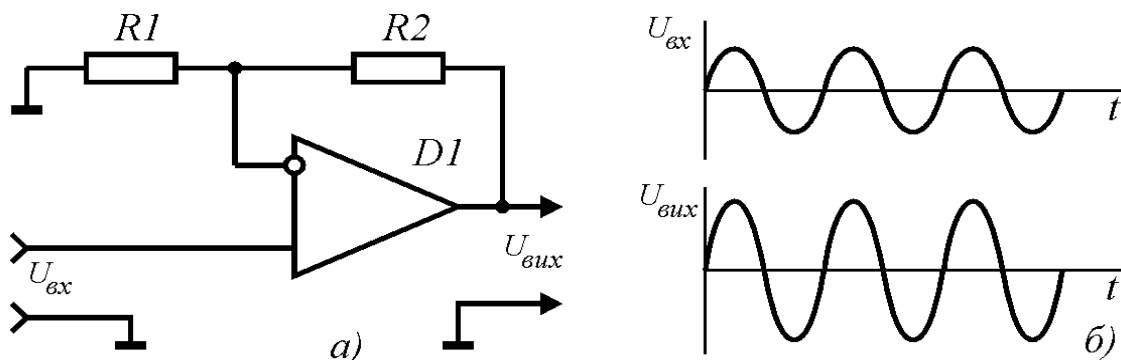


Рис.4. Принципова електрична схема неінвертуючого підсилювача (а) та часові діаграми його роботи (б).

Таким чином, на основі ОП можна будувати інвертуючі та неінвертуючі підсилювачі, коефіцієнт підсилення яких визначається виключно опорами резисторів зворотнього зв'язку і не залежить від типу застосованих ОП.

#### 4. Схеми для виконання математичних операцій на основі ОП

**Суматором** називають електронний пристрій, призначений для сумування вхідних сигналів. Принципова електрична схема суматора, побудованого на основі операційного підсилювача, наведена на рис.5. Для кожного з входів коефіцієнт підсилення  $k_i$  рівний

$$k_1 = \frac{R_{33}}{R_1}, k_2 = \frac{R_{33}}{R_2}, k_3 = \frac{R_{33}}{R_3}, \dots, k_n = \frac{R_{33}}{R_n}. \quad (13)$$

Вихідна напруга такого підсилювача дається виразом

$$U_{\text{вих}} = -\frac{R_{33}}{R_1}U_1 - \frac{R_{33}}{R_2}U_2 - \frac{R_{33}}{R_3}U_3 - \dots - \frac{R_{33}}{R_n}U_n = \\ = -(k_1U_1 + k_2U_2 + k_3U_3 + \dots + k_nU_n) \quad (14)$$

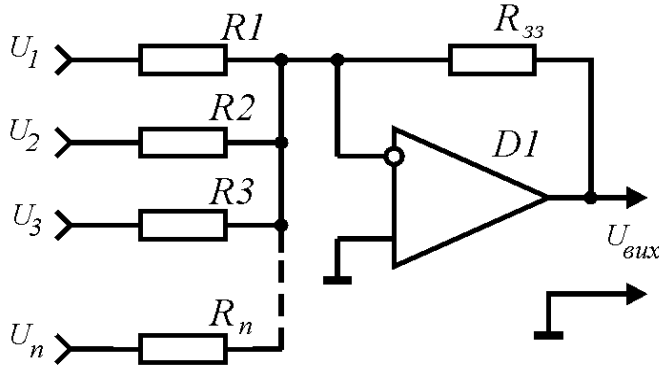


Рис.5. Принципова електрична схема суматора на ОП.

Знак "-" показує, що вихідна напруга має протилежний до суми вхідних напруг знак, так як вхідні сигнали подаються на інвертуючий вхід операційного підсилювача.

При всіх однакових опорах схеми  $R_1=R_2=R_3=\dots=R_n=R_{33}$  отримуємо

$$U_{\text{вих}} = -(U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n), \quad (15)$$

тобто вихідна напруга рівна сумі вхідних, але має протилежний знак.

**Інтегратор** призначений для часового інтегрування вхідного сигналу

(рис.6). Коло зворотнього зв'язку такого підсилювача представляє собою інтегруючу ланку. Вихідна напруга інтегруючого підсилювача пропорційна інтегралу вхідної напруги

$$U_{\text{вих}} = -\frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (16)$$

Принципова електрична схема **диференціатора** представлена на рис.7. Коло від'ємного зворотнього зв'язку представляє собою диференціюючу ланку. Вихідна напруга диференціюючого підсилювача пропорційна диференціалу вхідного сигналу:

$$U_{\text{вих}} = -RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}. \quad (17)$$

Для виконання операцій логарифмування та антилогарифмування застосовують операційні підсилювачі, в яких роль опорів від'ємного зворотнього зв'язку

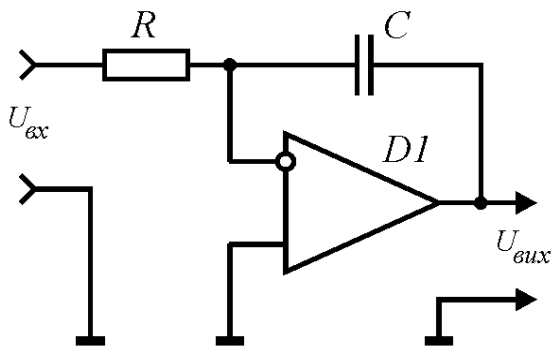


Рис.6. Принципова електрична схема інтегруючого підсилювача.

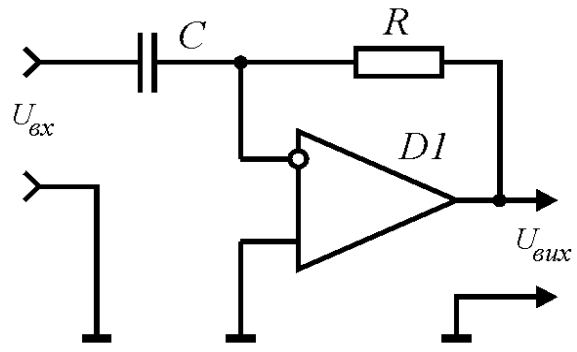


Рис.7. Принципова електрична схема диференціюючого підсилювача.

виконують напівпровідникові діоди (див.рис.8), так як їх вольт-амперна характеристика має експоненціальну залежність. Вихідна напруга *логарифмуючого підсилювача* (рис.8а) пропорційна логарифму вхідного сигналу:

$$U_{вих} = -k_1 \ln(k_2 U_{вх}) , \tag{18}$$

де коефіцієнти  $k_1$  та  $k_2$  залежать від типу застосованого діода. Вихідна напруга антилогарифмуючого підсилювача (рис.8б) змінюється за законом

$$U_{вих} = -k_1 \exp(k_2 U_{вх}) . \tag{19}$$

Таким чином, на основі ОП можна побудувати не тільки підсилювачі сигналів, але і схеми, що виконують математичні операції над вхідними аналоговими сигналами. Похибка виконання математичних операцій буде тим меншою, чим більше реальні параметри операційних підсилювачів будуть наближатись до параметрів ідеальних ОП.

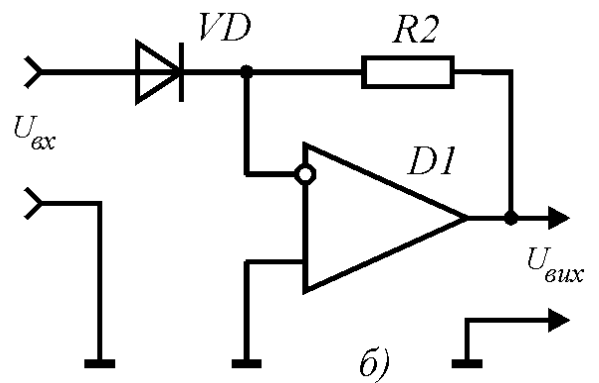
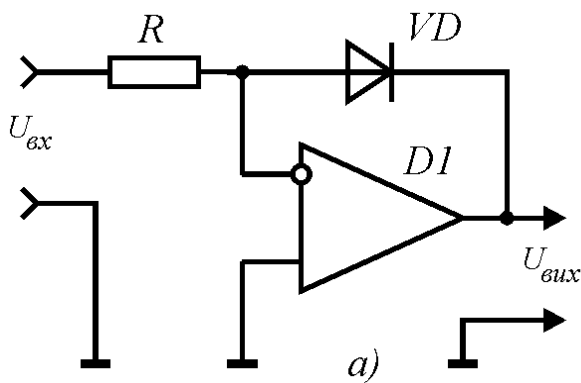


Рис.8. Принципова електрична схема логарифмуючого (а) та антилогарифмуючого (б) підсилювача.

### Резюме

1. Операційні підсилювачі мають великий коефіцієнт підсилення, великий вхідний опір і малий вихідний опір.
2. При подачі сигналу на неінвертуючий вхід операційного підсилювача, вихідний сигнал буде співпадати за фазою з вхідним. При подачі

сигналу на інвертуючий вхід операційного підсилювача, вихідний сигнал буде знаходитись в протифазі з вхідним.

2. Додатній зворотний зв'язок збільшує коефіцієнт підсилення каскаду, а від'ємний - зменшує.
3. В підсилювачах електричних сигналів використовують від'ємний зворотній зв'язок, а в генераторах - додатній.
4. На основі операційних підсилювачів можна побудувати схеми, що виконують математичні операції над вхідними сигналами.

## Порядок виконання роботи

### 1. Дослідження роботи інвертуючого підсилювача

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи інвертуючого підсилювача (рис.9). В якості генератора використати вмонтований в лабораторний пристрій К4822-2 генератор гармонічних сигналів. Включити живлення установки та генератора і перевірити працездатність схеми.

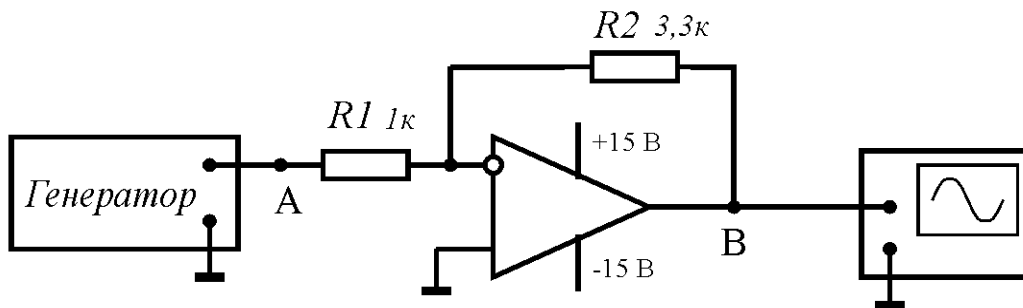


Рис.9. Схема установки для дослідження роботи інвертуючого підсилювача.

2. Під'єднати осцилограф до точки А схеми і виміряти величину вхідної напруги  $U_{вх}$ . Під'єднати осцилограф до точки В схеми і виміряти величину вихідної напруги  $U_{вих}$ . Визначити коефіцієнт підсилення інвертуючого підсилювача:

$$k_u = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} \cdot \quad (20)$$

**Примітка.** Так як для визначення коефіцієнта підсилення береться відношення вхідних і вихідних сигналів, то в якості  $U_{вх}$  і  $U_{вих}$  можна брати не дійсні, а амплітудні значення, що значно спрощує їх визначення за осцилографом.

3. При незмінному опорі  $R2=3,3$  кОм, послідовно змінюючи опір  $R1$  на вказані в таблиці 1 значення, визначити коефіцієнт підсилення каскаду. Дані занести в таблицю 1.

## 2. Дослідження роботи неінвертуючого підсилювача

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи неінвертуючого підсилювача (рис.10). Включити живлення установки та генератора і перевірити працездатність схеми.
2. Під'єднати осцилограф до точки *A* схеми і виміряти величину вхідної напруги  $U_{вх}$ .

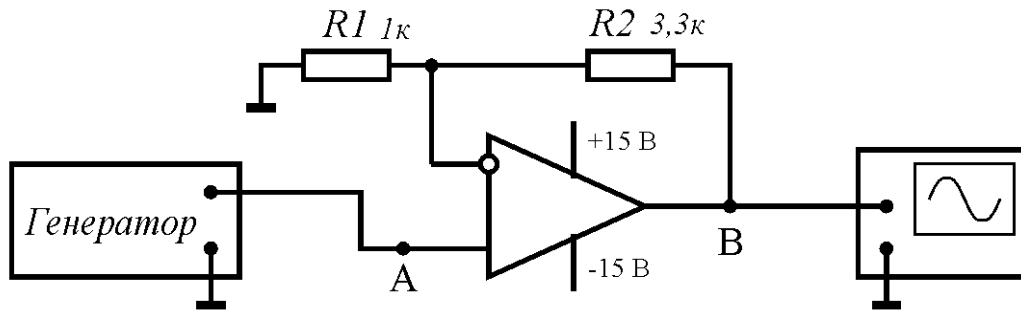


Рис.10. Схема установки для дослідження роботи неінвертуючого підсилювача.

Під'єднати осцилограф до точки *B* схеми і виміряти величину вихідної напруги  $U_{вих}$ . Використовуючи співвідношення (20) визначити коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача.

3. При незмінному опорі  $R2=3,3$  кОм, послідовно змінюючи опір  $R1$  на вказані в таблиці 1 значення, визначити коефіцієнт підсилення каскаду. Дані занести в таблицю 1.
4. Визначити теоретичні коефіцієнти підсилення інвертуючого та неінвертуючого підсилювачів для різних величин опорів  $R1$ :

- для інвертуючого: 
$$k_u = \frac{R2}{R1} ;$$

- для неінвертуючого: 
$$k_u = \frac{R1 + R2}{R1} .$$

Дані занести в таблицю 1. Порівняти експериментально визначені та теоретично обраховані коефіцієнти підсилення інвертуючого та неінвертуючого підсилювачів. Пояснити можливі розбіжності.

Таблиця 1.

<i>R1</i>		1,0 к	2,2 к	3,3 к	4,7 к	8,2 к
Інверт.	$k_u$ (експ)					
	$k_u$ (теор)					
Неінверт.	$k_u$ (експ)					
	$k_u$ (теор)					

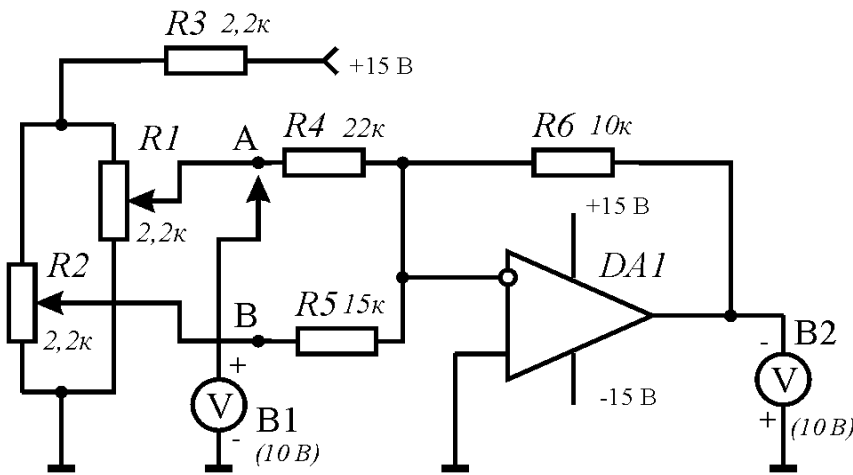


Рис.11. Схема установки для дослідження роботи суматора на основі ОП.

### 3. Дослідження роботи суматора на основі операційного підсилювача

1. Зібрати схему суматора на основі операційного підсилювача (див.рис.11). В якості вольтметрів V1 та V2 для контролю вхідних та вихідних напруг використати вмонтовані в лабораторний пристрій K4822-2 комбіновані електровимірювальні пристрої. Встановити

обидва вольтметри на діапазон вимірювань постійної напруги 10 В. Включити живлення схеми та перевірити її працездатність.

2. Під'єднати вольтметр V1 до точки A схеми і потенціометром R1 встановити величину вхідної напруги  $U_1$  рівною 1 В. Під'єднати вольтметр V1 до точки B схеми і потенціометром R2 встановити величину вхідної напруги  $U_2$  рівною 2 В. Вольтметром V2 виміряти величину вихідної напруги  $U_{вих}$ . Дані занести в таблицю 2.
3. Послідовно встановлювати величини вхідних напруг, вказані в таблиці 2 і вимірювати величину вихідної напруги суматора. Дані занести в таблицю 2.
4. Теоретично обчислити величину вихідної напруги суматора за співвідношенням

$$U_{вих} = -\left(\frac{R6}{R4}U_1 + \frac{R6}{R5}U_2\right). \tag{21}$$

Дані занести в таблицю 2.

5. Порівняти експериментально визначені та теоретично розраховані величини вихідної напруги суматора і пояснити можливі розбіжності.

Таблиця 2

$U_1, B$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$U_2, B$	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0
$U_{вих}, B$					
$U_{вих}^{теор}, B$					

#### **4. Дослідження роботи інтегруючого та диференціюючого підсилювача на ПК**

1. Синтезувати схеми інтегруючого та диференціюючого підсилювача, використовуючи пакет прикладних програм PCAD або WORKBENCH.
2. Подаючи на вхід схеми сигнали різної форми дослідити часові залежності вихідних сигналів.
3. Зробити висновки.

## Лабораторна робота №5

## Генератори електричних сигналів

**Мета роботи:** ознайомлення з принципом генерування електричних сигналів та основними параметрами і характеристиками генераторів. Дослідження роботи генератора гармонічних сигналів на основі операційного підсилювача.

## Теоретичні відомості

## 1. Класифікація та принципи роботи генераторів електричних сигналів

*Генераторами* називають автоколивальні системи, в яких енергія джерела живлення перетворюється в енергію електричних коливань. За формою коливань, що генеруються, розрізняють *генератори гармонічних сигналів* та *генератори імпульсів*. В залежності від форми вихідних імпульсів існують генератори прямокутних імпульсів, генератори трикутних, пилкоподібних, трапецеїдальних імпульсів та генератори імпульсів спеціальної форми. Генератори прямокутних імпульсів, в яких активні елементи працюють в ключовому режимі, називають *мультивібраторами*. За типом пасивних елементів, що включені в коло зворотнього зв'язку, розрізняють *LC-*, *RLC-* та *RC-*генератори. За типом збудження розрізняють *генератори з самозбудженням* та *генератори із зовнішнім збудженням*. Генератори з самозбудженням називають також *автогенераторами*.

Розглянемо паралельний коливальний контур (рис.1а), втрати в якому представлені опором  $r$ . Замикання ключа приведе до зарядки конденсатора  $C$  до напруги джерела живлення  $E$ . Після розмикання ключа в такому контурі виникнуть електричні коливання з кутовою частотою

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

При відсутності втрат  $r=0$  (ідеальний коливальний контур), коливання в контурі

будуть незатухаючими. В реальному коливальному контурі  $r>0$ , тому амплітуда коливань буде зменшуватись з часом за експоненціальним законом, що характеризується декрементом затухання (див.рис.1б). Для отримання незатухаючих коливань необхідно скомпенсувати втрати енергії в контурі. Це можна зробити двома шляхами. Перший полягає у введенні в

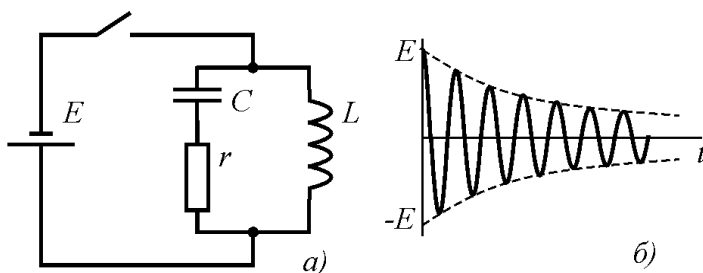


Рис.1. Автоколивальні процеси в коливальному контурі.

коливальну систему елемента з від'ємним опором  $R_{(-)}$ , наприклад тунельного діода. При цьому необхідно забезпечити виконання умови

$$R_{(-)} > r . \tag{2}$$

Такий спосіб компенсації втрат в контурі застосовується досить рідко, тому розглядатися тут не буде. Другий, найбільш поширений спосіб полягає у використанні підсилювача з додатнім зворотнім зв'язком. Таким чином, автогенератор повинен містити такі елементи :

- частотовибірну систему (коливальний контур, RC-ланка);
- підсилювач (з джерелом живлення);
- коло додатнього зворотнього зв'язку.

Частота генерації визначається властивостями частотовибірної системи, причому немає ніяких обмежень на місцезнаходження цієї системи в генераторі: вона може бути частиною підсилювача (частотовибірний підсилювач) або частиною кола зворотнього зв'язку (частотовибірний зворотній зв'язок). Тому структурну схему автогенератора зображають у виді підсилювача з колом зворотнього зв'язку (див.рис.2).

Підсилювач на структурній схемі рис.2. характеризується коефіцієнтом підсилення  $k$  :

$$U_2 = kU_1 . \tag{3}$$

Коло зворотнього зв'язку характеризується коефіцієнтом передачі  $\beta$  :

$$U_1 = \beta U_2 \tag{4}$$

Коефіцієнт підсилення підсилювача та коефіцієнт передачі кола зворотнього зв'язку в загальному випадку є комплексними величинами, так як вони залежать від частоти. Підставляючи вираз (3) в (4) отримуємо

$$U_1 = k\beta U_1 . \tag{5}$$

Звідси отримуємо

$$k\beta = 1 . \tag{6}$$

Вираз (6) представляє собою умову **самозбудження** генератора. Часто умову самозбудження (6) розбивають на дві умови, в яких фігурують не комплексні, а дійсні величини:

$$k\beta = 1 , \tag{7}$$

$$\varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi n , \tag{8}$$

де  $\varphi_k$  - зсув фаз між вхідним і вихідним сигналом підсилювача,  $\varphi_\beta$  - зсув фаз між вхідним і вихідним сигналом кола зворотнього зв'язку,  $n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ . Вираз (7) називають **балансом амплітуд**, вираз (8) називають **балансом фаз**. Умова балансу фаз вимагає, щоб вхідний і вихідний сигнал підсилювача були

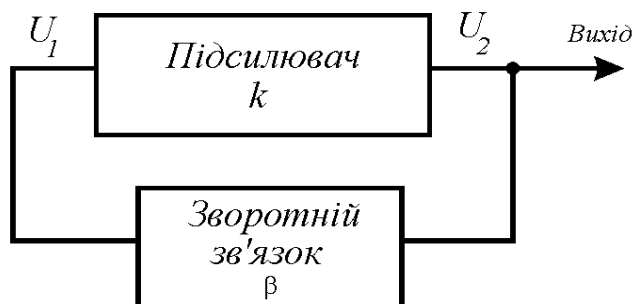


Рис.2. Структурна схема генератора електричних коливань.

синфазні. А це, по суті, означає, що в генераторах електричних сигналів **зворотній зв'язок має бути додатнім**.

Таким чином, для побудови генератора електричних коливань необхідні підсилювач, коло додатнього зворотнього зв'язку та виконання умов балансу амплітуд та балансу фаз.

## 2. LC - генератор

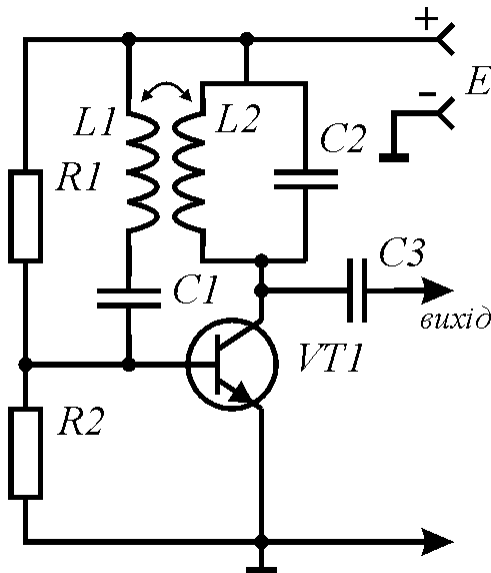


Рис.3. Принципова електрична схема LC-генератора на біполярному транзисторі.

На рис.3 представлена принципова електрична схема одного із варіантів LC-генератора з індуктивним зворотнім зв'язком. В якості активного елемента виступає транзистор VT1, на базу якого подається напруга зміщення з резисторів R1 та R2. Навантаженням транзистора являється коливальний контур на елементах L2, C2. Сигнал зворотнього зв'язку з виходу підсилювача через індуктивно зв'язані котушки L1, L2 та конденсатор C1 поступає на базу транзистора. При забезпеченні умов балансу амплітуд та балансу фаз на резонансній частоті коливального контура виникають гармонічні коливання, які через розділовий конденсатор C3 поступають на вихід генератора.

Застосування коливальних LC-контурів є ефективним на досить високих частотах (від 200 кГц і вище), так як на низьких частотах габаритні розміри та вартість коливальних контурів різко збільшуються. Тому для побудови генераторів низьких частот в якості зворотнього зв'язку застосовують RC-ланки, а в якості активних елементів - транзистори або операційні підсилювачі.

## 3. RC - генератори

На низьких частотах (до 200 кГц) застосовують RC генератори. На рис.4 наведена принципова електрична схема RC генератора з операційним підсилювачем в якості активного елемента. Коло зворотнього зв'язку утворене трьома фазозсуваючими RC-ланками R3C1, R4C2, R5C3. Фазовий зсув трьох таких ланок рівний  $\varphi_{\beta}=180^{\circ}$ . Для виконання умови балансу фаз (8), підсилювач повинен також зсувати фазу підсилюваного сигналу на  $180^{\circ}$ . Саме тому з RC ланок сигнал подається на інвертуючий вхід операційного підсилювача. Коефіцієнт передачі кола зворотнього зв'язку складає  $\beta=1/29$ . Тому, для виконання умови балансу амплітуд (7) коефіцієнт підсилення операційного підсилювача повинен бути  $k>29$ . Потрібний коефіцієнт підсилення задається колом від'ємного зворотнього зв'язку, утвореного резисторами R1 та R2:

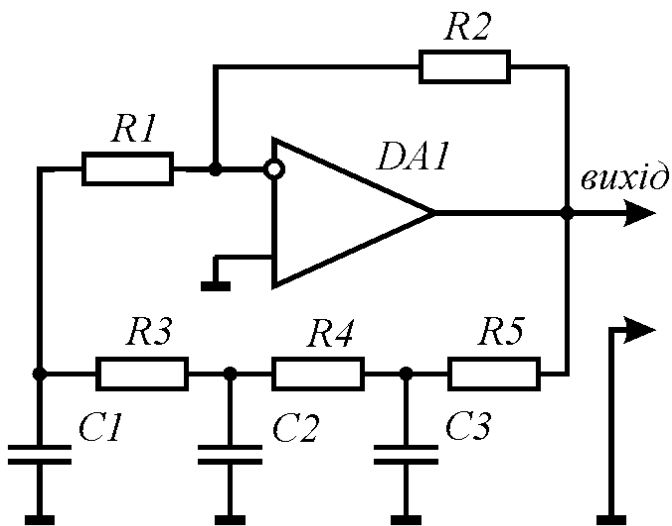


Рис.4. Принципова електрична схема RC-генератора з фазозсуваючими ланками.

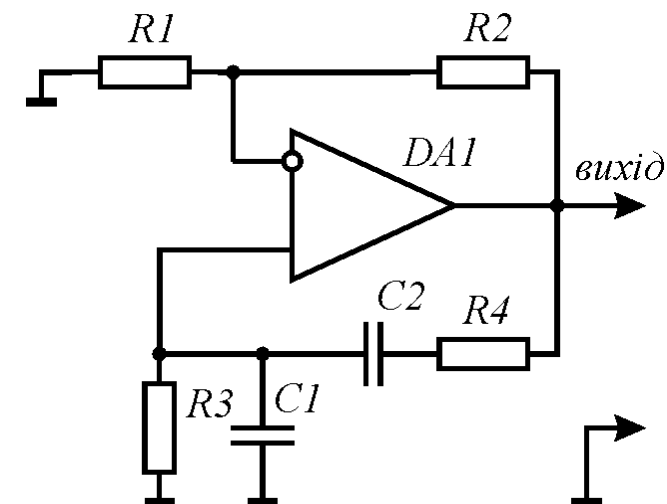


Рис.5. Принципова електрична схема RC-генератора з мостом Віна.

$$k = \frac{R2}{R1} \quad (9)$$

При однакових опорах резисторів  $R3=R4=R5=R$  та ємностях конденсаторів  $C1=C2=C3=C$  фазозсуваючої ланки частота генерації задається виразом

$$f = \frac{1}{RC} \quad (10)$$

На рис.5 наведена принципова електрична схема RC-генератора гармонічних коливань з мостом Віна в якості кола зворотнього зв'язку. Міст Віна складається з послідовно включених резистора  $R4$  і конденсатора  $C2$  та паралельно включених резистора  $R3$  та конденсатора  $C1$ . Така ланка забезпечує зсув фази вихідного сигналу на  $360^\circ$ , тому, для виконання умови балансу фаз (8), сигнал з кола зворотнього зв'язку подається на неінвертуючий вхід операційного підсилювача. Коефіцієнт передачі моста Віна складає  $\beta=1/3$ , тому, для виконання умови балансу амплітуд (7), коефіцієнт підсилення операційного підсилювача повинен бути більше трьох  $k>3$ . Потрібний коефіцієнт підсилення задається колом від'ємного зворотнього зв'язку на резисторах  $R1$  та  $R2$ :

$$k = \frac{R1 + R2}{R1} \quad (11)$$

При однакових номіналах схеми  $R3=R4=R$  та  $C1=C2=C$ , частота генерації визначається формулою (10).

#### 4. Мультивібратор

Мультивібратор - це імпульсний генератор з додатнім зворотнім зв'язком, в якому підсилювальні елементи (транзистори, операційні підсилювачі) працюють в ключовому режимі. На відміну від RC-генераторів гармонічних коливань, в мультивібраторах застосовується дуже сильний додатній зворотній зв'язок, в результаті чого активні елементи почергово входять то в режим насичення, то в режим відсічки. Сильний додатній зворотній зв'язок отримують, наприклад,

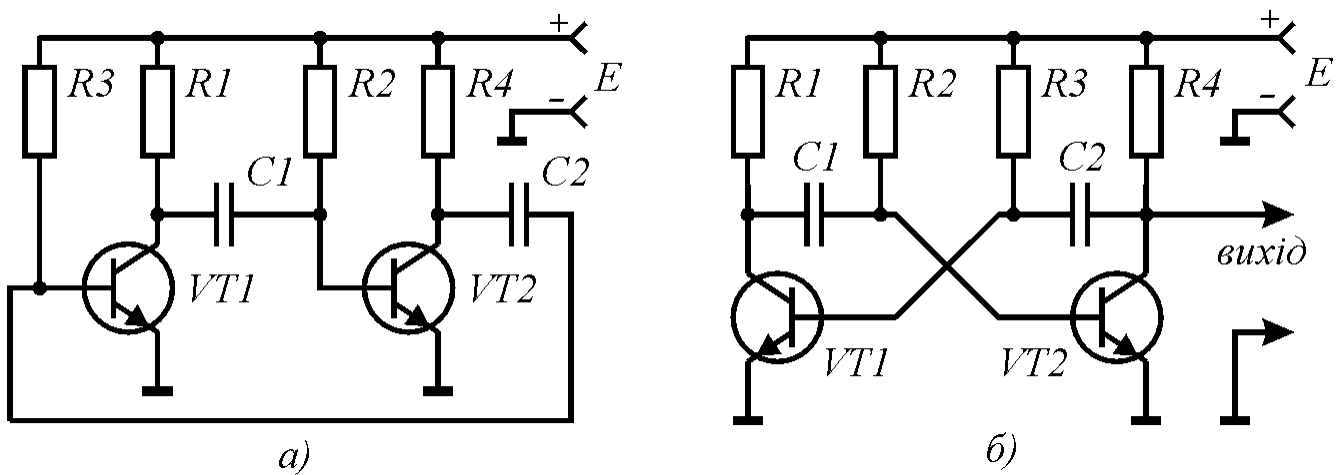


Рис.6. Принципова електрична схема транзисторного мультівібратора.

безпосереднім з'єднанням виходу двохкаскадного транзисторного підсилювача з його входом (див. рис.6а). Схему, представлену на рис.1а, часто зображують симетрично, як показано на рис.6б. Не вдаючись в подробиці роботи цієї схеми, відмітимо, що в кожен момент часу один із транзисторів є відкритим (знаходиться в режимі насичення), а інший - закритим (знаходиться в режимі відсічки). Зміна цих станів пов'язана з процесами зарядки та розрядки конденсаторів  $C1$  та  $C2$ . Тому, через певні проміжки часу, що визначаються постійними часу зарядки конденсаторів, відкритий транзистор закривається, а закритий - відкривається. Процес періодично повторюється, що приводить до появи на виході цієї схеми послідовності прямокутних імпульсів (див.рис.7). Важливою характеристикою цієї послідовності є скважність - відношення періоду повторення імпульсів до їх тривалості:

$$q = \frac{T}{\tau} . \quad (12)$$

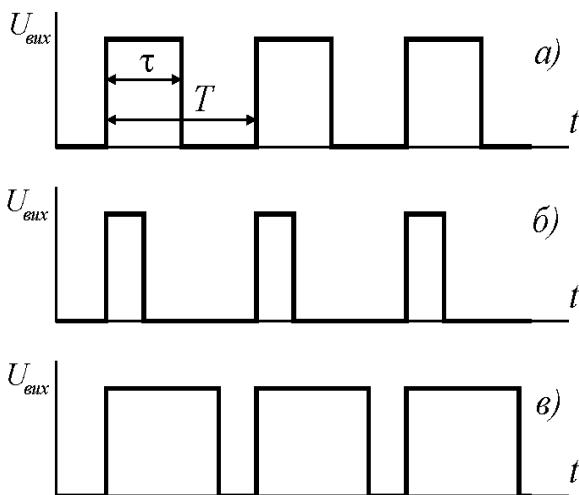


Рис.7. Послідовності вихідних імпульсів симетричного (а) та несиметричного (б,в) мультівібраторів.

Мультівібратор, схема якого представлена на рис.6б може бути симетричним та несиметричним. У симетричного мультівібратора номінали відповідних елементів кожного плеча є однаковими (однаковими є опори  $R1$  і  $R4$ ,  $R2$  і  $R3$  та ємності  $C1$  і  $C2$ ). У симетричного мультівібратора скважність імпульсів рівна двом (див.рис.7а). У несиметричних мультівібраторів скважність може бути як більша двох (рис.7б), так і менша двох (див.рис.7в). Слід відмітити, що мультівібратор на рис.6б має два рівноправні виходи: вихідний сигнал можна знімати з колектора будь-якого транзистора

або з обох одночасно. Сигнали на цих виходах знаходяться в протифазі.

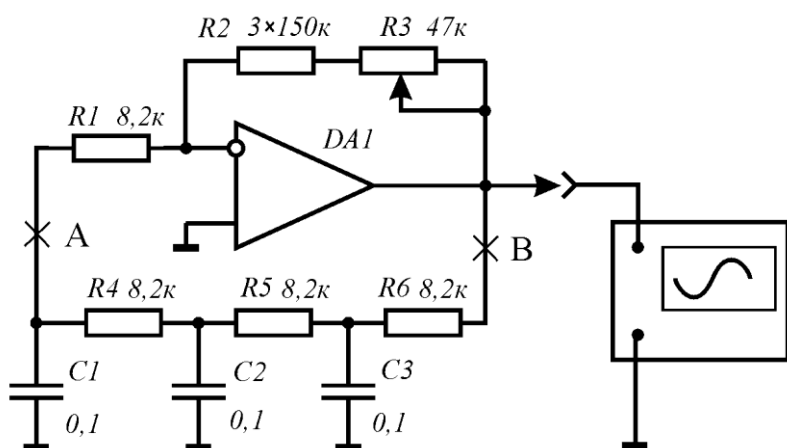
### Резюме

1. В генераторах електричних коливань енергія джерела живлення постійного струму перетворюється в енергію коливань змінного струму.
2. Для отримання генерації в підсилувач необхідно ввести коло додатнього зворотнього зв'язку та забезпечити умову балансу амплітуд та балансу фаз.
3. Частота генерації визначається властивостями частотовибірної ланки.
4. На високих частотах застосовують LC-генератори, а на низьких - RC-генератори.
5. В якості генераторів прямокутних імпульсів використовують мультивібратори, в яких активні елементи працюють в ключовому режимі.

## Порядок виконання роботи

### 1. Дослідження роботи RC-генератора з фазозсуваючими ланками

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи RC-генератора гармонічних сигналів (рис.8). Включити живлення установки та перевірити працездатність схеми.
2. Поворотом ручки змінного резистора R3 добитися появи на виході схеми стійкого неспотвореного гармонічного вихідного сигналу.
3. Приєднавши до виходу схеми частотомір, визначити частоту генерації  $f_T$  RC-генератора.



4. Виключити живлення схеми. Омметром виміряти сумарний опір резисторів зворотнього зв'язку  $R=R2+R3$ . Визначити коефіцієнт підсилення операційного підсилувача за співвідношенням

$$k_u = \frac{R}{R1} .$$

(13)

Рис.8. Схема установки для дослідження роботи RC-генератора гармонічних сигналів з фазозсуваючими ланками.

5. Розірвати коло зворотнього зв'язку в точках A та B схеми. До входу фазозсуваючої RC-ланки під'єднати зовнішній

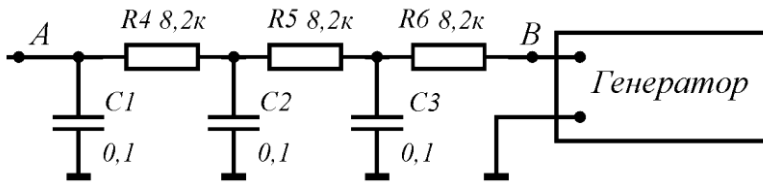


Рис.9. Схема для вимірювання коефіцієнта передачі RC-ланки.

генератор гармонічних сигналів (див.рис.9). Встановити частоту вихідного сигналу цього генератора рівною  $f_T$ .  
6. Під'єднати осцилограф до точки B фазозсуваючої ланки і визначити вхідну напругу  $U_{вх}$ , що подається

на цю ланку із зовнішнього генератора.

7. Під'єднати осцилограф до точки A фазозсуваючої ланки і визначити вихідну напругу  $U_{вих}$ . Визначити коефіцієнт передачі  $\beta$  кола зворотнього зв'язку:

$$\beta = \frac{U_{вих}}{U_{вх}} \quad (14)$$

8. Перевірити виконання умови балансу амплітуд  $\beta k_u = 1$ .

## 2. Дослідження роботи RC-генератора з мостом Віна

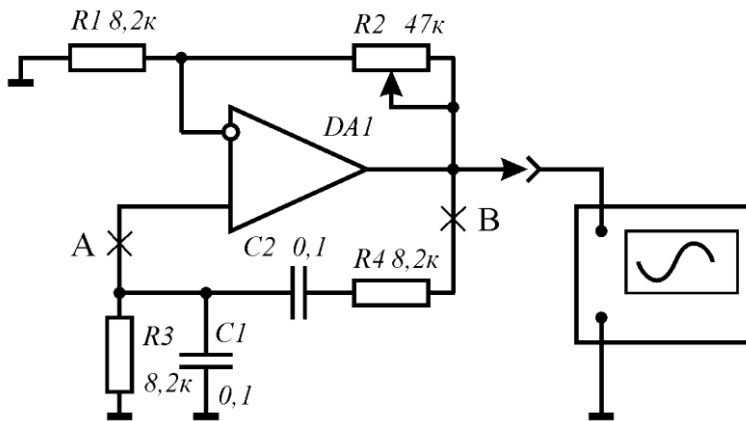


Рис.10. Схема установки для дослідження роботи RC-генератора гармонічних сигналів з мостом Віна.

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи RC-генератора гармонічних сигналів з мостом Віна (рис.10). Включити живлення установки та перевірити працездатність схеми.

2. Поворотом ручки змінного резистора R2 добитися появи на виході схеми стійкого неспотвореного гармонічного вихідного сигналу.

3. Приєднавши до виходу схеми частотомір, визначити частоту генерації  $f_T$  RC-генератора.

4. Виключити живлення схеми. Омметром виміряти опір резистора зворотнього зв'язку R2. Визначити коефіцієнт підсилення операційного підсилювача за співвідношенням

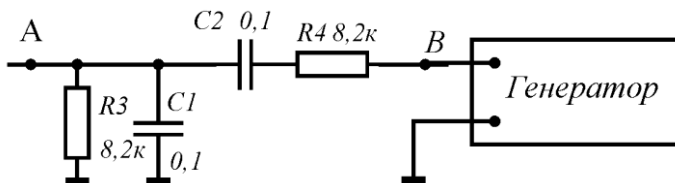


Рис.11. Схема для вимірювання коефіцієнта передачі моста Віна.

$$k_u = \frac{R1 + R2}{R1} \quad (15)$$

5. Розірвати коло зворотнього зв'язку в точках  $A$  та  $B$  схеми. До входу кола зворотнього зв'язку під'єднати зовнішній генератор гармонічних сигналів (див.рис.11). Встановити частоту вихідного сигналу цього генератора рівною  $f_{\Gamma}$ .
6. Під'єднати осцилограф до точки  $B$  моста Віна і визначити вхідну напругу  $U_{вх}$ , що подається на цю ланку із зовнішнього генератора.
7. Під'єднати осцилограф до точки  $A$  моста Віна і визначити вихідну напругу  $U_{вих}$ . За співвідношенням (2) визначити коефіцієнт передачі  $\beta$  кола зворотнього зв'язку та перевірити виконання умови балансу амплітуд  $\beta k_u=1$ .

### 3. Дослідження роботи мультивібратора на операційному підсилювачі

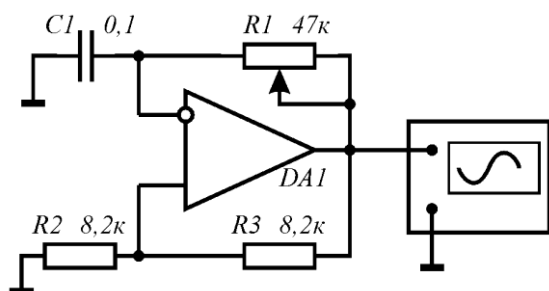


Рис.12. Схема установки для дослідження роботи мультивібратора на операційному підсилювачі.

1. Зібрати схему установки для дослідження роботи мультивібратора на операційному підсилювачі (див.рис.12). Під'єднавши до виходу схеми осцилограф, перевірити її працездатність.
2. Поворотом ручки регулятора  $R1$  добитися появи на виході схеми неспотворених прямокутних імпульсів.
3. Зарисувати епюри вихідного сигналу. Визначити амплітуду  $U_m$ , період повторення  $T$ , тривалість  $\tau$  та скважність  $q$  вихідних імпульсів (див. рис.7):

### 4. Дослідження роботи транзисторного мультивібратора на ПК

1. Синтезувати схему транзисторного мультивібратора, використовуючи пакет прикладних програм PCAD або WORKBENCH.
2. Дослідити форму та параметри імпульсів на обох входах мультивібратора в залежності від номіналів елементів схеми.
3. Зробити висновки.

## Лабораторна робота №6

### Комбінаційні схеми

**Мета роботи:** ознайомлення з основами алгебри логіки, способами задання комбінаційних функцій та синтезом логічних схем. Експериментальне встановлення таблиць істинності для різних комбінаційних схем.

## Теоретичні відомості

### 1. Основи алгебри логіки

Для математичного опису роботи обчислювальних пристроїв, синтезу та аналізу схем, широко використовується алгебра логіки. *Алгебра логіки* - частина математичної логіки, яку часто називають обчисленням суджень. Під *судженням* розуміють речення, що має зміст ствердження (правдивості) або заперечення (хибності), тобто розглядають тільки два можливі значення судження. Одне і те ж судження не може бути одночасно і правдивим, і хибним. Наявність тільки двох можливих значень в алгебрі логіки приводить до відповідності між логічними судженнями та двійковими числами в двійковій системі числення, що дозволяє описати роботу схем і блоків обчислювальної машини, проводити їх аналіз та синтез за допомогою алгебри логіки. Тому істинність та хибність суджень, для зручності, позначають числами двійкової системи, відповідно, "1" (логічна одиниця) та "0" (логічний нуль). Якщо твердження  $x$  істинне, то  $x=1$ , а якщо хибне, то  $x=0$ .

Слід мати на увазі, що значення логічного нуля та логічної одиниці не дають ніякої кількісної оцінки стану цифрових елементів, а лише умовно позначають ці стани, тому, в загальному випадку, їх не можна розглядати як числа. Однак, в дискретній автоматичній та обчислювальній техніці, де числова інформація представляється у двійковій системі числення, ці значення можна розглядати як елементи двійкового коду числа, тобто як цифри цієї системи числення.

Таким чином, *логічними змінними  $x$*  називають величини, які, незалежно від їх конкретної фізичної суті, можуть приймати тільки два значення - 0 і 1. *Логічною функцією  $F(x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$*  називають функцію  $n$  логічних змінних, яка також

може приймати тільки два значення - 0 і 1 (див.рис.1). Логічні функції бувають комбінаційними і часовими.

*Комбінаційними* називають функції, значення яких однозначно визначаються значеннями їх аргументів, незалежно від порядку, послідовності та часу надходження аргументів. Комбінаційні функції ще називають функціями без пам'яті, підкреслюючи відсутність у них властивості

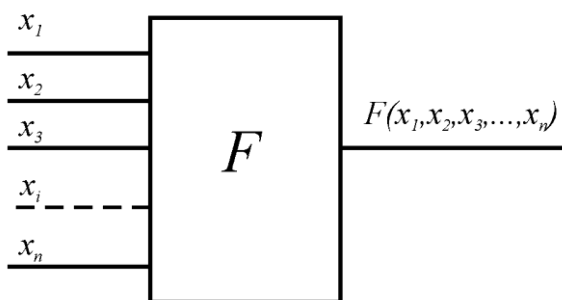


Рис.1. Логічна функція.

Таблиця 1

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F(x_1, x_2, x_3)$
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

запам'ятовувати інформацію. Така функція повністю "забуває" старі аргументи і реагує тільки на значення нових. Схеми, що реалізують комбінаційні функції називають **комбінаційними схемами**.

*Часові* логічні функції мають властивість запам'ятовувати інформацію, тому їх ще називають функціями з пам'яттю. Часові функції пам'ятають або попереднє значення аргументів, або попереднє значення функції і реагують як на нові, так і на попередні значення аргументів. В подальшому ми будемо розглядати тільки комбінаційні функції та схеми.

## 2. Комбінаційні функції та способи їх задання

Існують різні способи задання або представлення логічних функцій. Основними з них можна назвати наступні.

**Словесне представлення** відбиває взаємозв'язок аргументів із значеннями функцій. Наприклад: функція трьох аргументів приймає значення одиниці, якщо два або більше її аргументів рівні одиниці. У всіх інших випадках функція рівна нулю. Словесне представлення передуює будь-якому іншому способу представлення.

**Табличне представлення** реалізується, коли логічна функція задається у виді *таблиці істинності*, в якій виписуються всі можливі набори аргументів і для кожного набору встановлюється значення функції. Число наборів аргументів, а, значить, і число значень функції, рівне  $2^n$ , де  $n$  - число змінних. В таблиці 1 представлена функція, яка словесно задана в попередньому прикладі. Таблиці істинності функцій з великим числом змінних стають дуже громіздкими. В цьому випадку застосовують матричні таблиці істинності. Приклад матричного запису функції чотирьох змінних показано в таблиці 2.

**Аналітичний спосіб** задання функцій полягає в тому, що логічна функція  $F$  задається у виді алгебраїчного рівняння, в якому логічні змінні  $x_i$  зв'язані між собою знаками логічних операцій.

Таблиця 2

$x_3x_4$	$x_1x_2$			
$x_1x_2$	00	01	10	11
00	0	1	0	0
01	1	0	1	1
10	0	0	0	1
11	0	1	1	1

В алгебрі логіки особливе місце займають функції одної змінної та функції двох змінних, так як на їх основі, використовуючи принцип суперпозиції, можна реалізувати логічну функцію будь-якого числа змінних. Для одної змінної існує 4 різні логічні функції. Для двох змінних існує 16 різних логічних функцій, які називаються **елементарними**. Однак не всі вони є рівнозначними. Найбільш часто використовують три елементарні логічні функції, за допомогою яких можна реалізувати будь-яку логічну функцію будь-якого числа змінних: **АБО**, **І**, **НЕ**.

Таблиця 3

$x$	$F=\bar{x}$
1	0
0	1

Таблиця 4

$x_1$	$x_2$	$F=x_1+x_2$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблиця 5

$x_1$	$x_2$	$F=x_1x_2$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Найбільш простою є функція одної змінної НЕ (її ще називають інверсією). Словесний її опис полягає в наступному:

- функція приймає значення 1, якщо її аргумент має значення 0;
- функція приймає значення 0, якщо її аргумент має значення 1.

Таблиця істинності логічної функції НЕ наведена в таблиці 3. Таку функцію позначають рискою над змінною:  $F(x)=\bar{x}$ .

Таблиця 6

Ідемпотентні закони	$x+x=x$	$xx=x$
Комутативні закони	$x+y=y+x$	$xy=yx$
Асоціативні закони	$(x+y)+z=x+(y+z)$	$(xy)z=x(yz)$
Дистрибутивні закони	$x+yz=(x+y)(x+z)$	$x(y+z)=xy+xz$
Закони подвійності (теорема де Моргана)	$\overline{x+y}=\bar{x}\bar{y}$	$\overline{xy}=\bar{x}+\bar{y}$
Закони поглинання	$x(x+\bar{y})=x$	$x+x\bar{y}=x$
Закони склеювання	$(x+y)(x+\bar{y})=x$ $x+\bar{x}y=x+y$	$xy+x\bar{y}=x$ $x(\bar{x}+y)=xy$
Закони заперечення	$x+\bar{x}=1$ $0+x=x$ $1+x=1$	$x\bar{x}=0$ $1x=x$ $0x=0$
Закон подвійного заперечення		$\overline{(\bar{x})}=\bar{\bar{x}}=x$

Словесний опис функції АБО виражається так: функція приймає значення 1 якщо хоча б один із її аргументів має значення 1. Таблиця істинності логічної функції АБО наведена в таблиці 4. Як видно, дана функція приймає значення 0 тільки в одному випадку - коли всі її аргументи рівні 0. Логічну операцію АБО часто називають **диз'юнкцією** або **логічним сумуванням** і позначають знаком додавання "+":

$$F(x_1, x_2) = x_1 + x_2.$$

Логічна функція І приймає значення 1 тоді і тільки тоді, коли всі її аргументи рівні 1. Таблиця істинності цієї операції наведена в таблиці 5. Як видно з таблиці 5, якщо хоча б один із аргументів рівний 0, то функція І приймає значення 0. Логічну операцію

Ї часто називають **кон'юнкцією** або **логічним множенням** і позначають знаком множення, який дозволяється не ставити:  $F(x_1, x_2) = x_1 x_2$ .

Аналітична форма запису функцій дозволяє сформулювати основні закони алгебри логіки, які записані в таблиці 6 окремо для операцій АБО та І.

### 3. Синтез логічних схем

В цифрових радіоелектронних пристроях найпростіші логічні операції виконуються за допомогою **логічних елементів**, які виконані у виді інтегральних мікросхем. Найбільш поширені логічні елементи виконують функції АБО, І, НЕ, АБО-НЕ, І-НЕ. Умовні графічні позначення цих елементів на принципових електричних схемах наведено на рис.2. Логічні елементи працюють з двома рівнями електричних сигналів. Один із цих сигналів (як правило, низького рівня) означає логічний нуль. Інший (як правило, високого рівня) означає логічну одиницю. Рівні та полярності сигналів логічного нуля та логічної одиниці залежать від типу базового елемента та інтегральної технології, за якою виконана мікросхема.

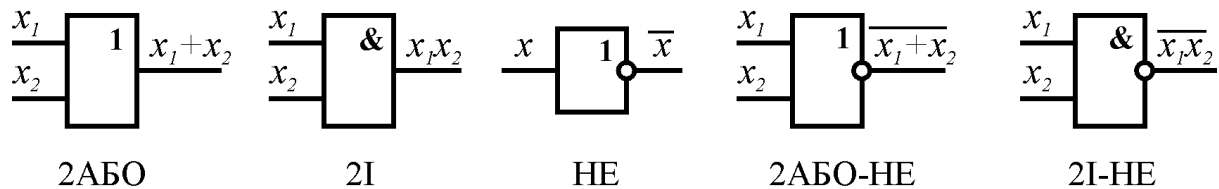


Рис.2. Умовні позначення логічних елементів на принципових схемах.

Рівні сигналів найбільш поширеної серії транзисторно-транзисторної логіки (ТТЛ) складають  $U^0 < 0,4$  В для сигналу логічного нуля і  $U^1 > 2,4$  В для сигналу логічної одиниці. Склад, число та функціональне призначення логічних елементів найбільш поширених серій мікросхем можна знайти в багаточисельних довідниках по цифровій мікросхемотехніці.

Для синтезу логічної схеми за її таблицею істинності необхідно:

- 1) записати логічну функцію в аналітичному виді;
- 3) мінімізувати отриману логічну функцію;
- 4) використовуючи аналітичний запис логічної функції синтезувати цифровий автомат з наявних логічних елементів.

Логічну функцію в аналітичному виді можна записати в двох основних формах. Одну з них називають **досконалою диз'юнктивною нормальною формою** (ДДНФ), іншу - **досконалою кон'юнктивною нормальною формою**. Функції, записані в обох нормальних формах, є еквівалентними. Однак схемна реалізація їх відрізняється типом логічних елементів.

- Досконала диз'юнктивна нормальна форма логічної функції  $n$  змінних предсталає собою суму добутків  $n$  змінних, для яких значення функції рівне одиниці. Окрема змінна береться без інверсії, якщо її значення в

таблиці істинності рівне одиниці, або з інверсією, якщо її значення рівне нулю.

- Досконала кон'юнктивна нормальна форма представляє собою добуток сум  $n$  змінних, для яких значення функції рівне нулю. Окрема змінна береться без інверсії, якщо її значення в таблиці істинності рівне нулю, або з інверсією, якщо її значення рівне одиниці.

Для прикладу, запишемо ДДНФ та ДКНФ функції, таблиця істинності якої наведена в таблиці 7:

$$\text{ДДНФ : } F = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 + \bar{x}_1\bar{x}_2x_3 + x_1\bar{x}_2x_3 + x_1x_2x_3; \tag{1}$$

$$\text{ДКНФ : } F = (x_1 + \bar{x}_2 + x_3)(x_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3)(\bar{x}_1 + x_2 + x_3)(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + x_3).$$

Таблиця 7

$x_1$	$x_2$	$x_3$	$F(x_1, x_2, x_3)$
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

Маючи аналітичний запис функції у виді ДДНФ або ДКНФ, можна побудувати комбінаційну схему на логічних елементах. Комбінаційна схема, побудована на основі ДДНФ логічної функції попереднього прикладу, наведена на рис.3. Як видно, для цього необхідно використати чотири логічних елемента І з трьома входами, один логічний елемент АБО з чотирьма входами та три інвертори. Комбінаційна схема, побудована на основі ДКНФ логічної функції попереднього прикладу, наведена на рис.4. Як видно, для цього необхідно використати чотири логічних елемента АБО з трьома входами, один логічний елемент І з чотирьма входами та три інвертори. Обидві схеми на рис.3 та рис.4 працюють однаково, так як реалізують одну і ту ж логічну функцію. Вибір між

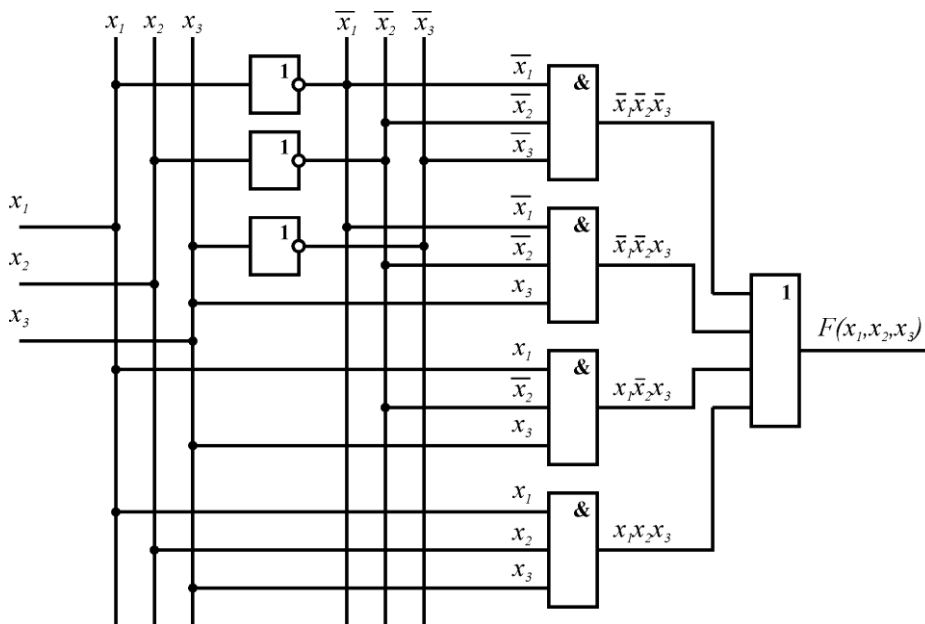


Рис.3. Комбінаційна схема, побудована на основі диз'юнктивної нормальної форми (1) логічної функції, заданої в таблиці 7.

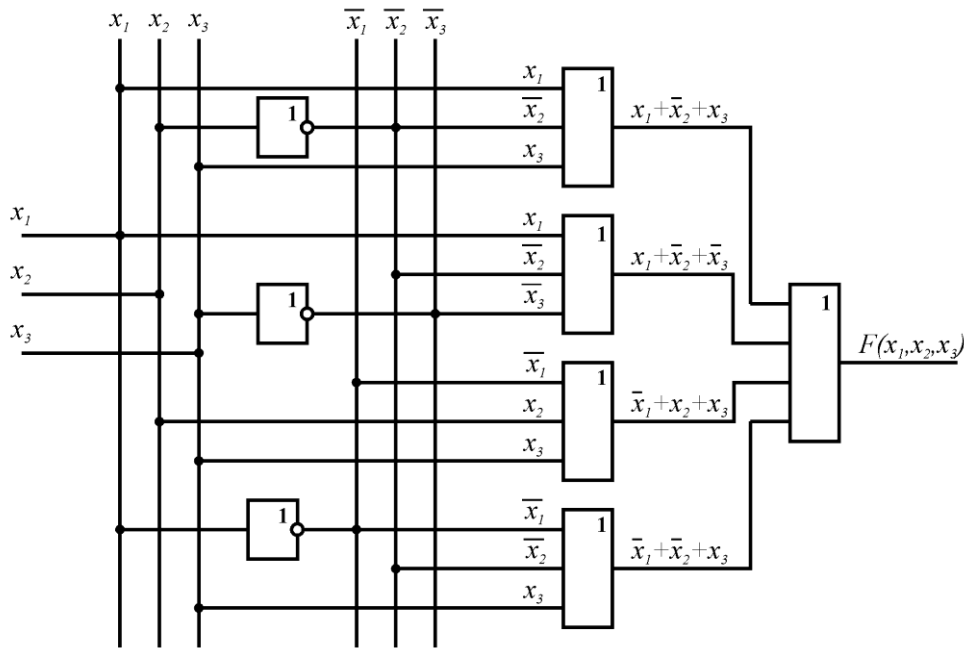


Рис.4. Комбінаційна схема, побудована на основі кон'юнктивної нормальної форми (1) логічної функції, заданої в таблиці 7.

ними повністю визначається розробником і проводиться на основі наявних логічних елементів.

Комбінаційні схеми, побудовані на основі ДДНФ та ДКНФ логічної функції однозначно реалізують цю функцію, однак вони не є оптимальними. В переважній більшості випадків структура таких комбінаційних схем є збитковою і може бути суттєво спрощена на основі формальних операцій, які називаються **мінімізацією логічних схем**. Метою мінімізації є отримання схеми, що має мінімальне число логічних елементів з мінімальним числом входів. Мінімізація базується на тотожних перетвореннях логічних функцій на основі теорії алгебри логіки та властивостей, що впливають із неї (див.табл.6). Проілюструємо мінімізацію ДДНФ логічної функції (1) попереднього прикладу. Враховуючи закони склеювання, маємо :

$$F = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 + \bar{x}_1\bar{x}_2x_3 + x_1\bar{x}_2x_3 + x_1x_2x_3 = \bar{x}_1\bar{x}_2(\bar{x}_3 + x_3) + x_1x_3(\bar{x}_2 + x_2) = \bar{x}_1\bar{x}_2 + x_1x_3 \tag{2}$$

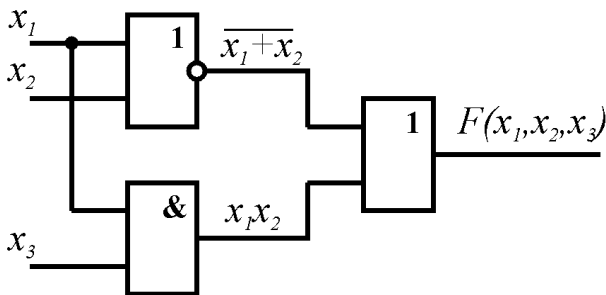


Рис.5. Комбінаційна схема, побудована на основі мінімізованої логічної функції (3).

Застосувавши до першого доданка правило де Моргана (див.табл.6), отримуємо:

$$F = \bar{x}_1\bar{x}_2 + x_1x_3 = \overline{x_1 + x_2} + x_1x_3 \tag{3}$$

Комбінаційна схема, що реалізує дану функцію, представлена на рис.5. Як видно, для реалізації такої функції необхідні всього три двохвходові логічні елементи: АБО-НЕ, АБО та І (порівняйте з комбінаційними схемами на рис.3 і 4 !). Таким чином, чим простіший логічний

вираз, що описує функцію, тим простіша і дешевша комбінаційна схема, що її реалізує.

Слід відмітити, що аналітичний метод мінімізації в загальному випадку досить складний, тому найбільшого поширення набули методи мінімізації за допомогою *діаграм Вейча* та *карт Карно*, перевагами яких є наглядність та простота використання при невеликому числі змінних. Однак, в будь-якому випадку вони базуються на основних теоремах алгебри логіки, а опис правил мінімізації за допомогою цих діаграм є дуже громіздким, тому в даному методичному посібнику вони не приводяться.

## Резюме

1. Логічна функція може приймати тільки два можливі значення - 0 або 1.
2. Значення комбінаційних функцій однозначно визначаються значеннями їх аргументів, незалежно від порядку, послідовності та часу надходження аргументів.
3. Основними елементарними логічними функціями є функції АБО, І, НЕ.

## Порядок виконання роботи

### 1. Дослідження роботи заданих комбінаційних схем

1. Зібрати схему установки для дослідження комбінаційних схем (рис.6) та перевірити її працездатність.
2. Під'єднати до схеми установки задану викладачем комбінаційну схему та подати на неї напругу живлення 5 В.

**Увага!** При встановленні комбінаційної схеми суворо дотримуйтесь полярності подачі на неї напруги живлення. При неправильній полярності напруги живлення комбінаційна схема вийде з ладу.

3. Перемикачами SA1-SA4 встановити на входах комбінаційної схеми першу комбінацію вхідних логічних сигналів  $x_1$ - $x_4$ , задану в таблиці 8. Записати в таблицю 8 логічний сигнал  $Y$  на виході схеми.

Примітка. На кожному із чотирьох входів комбінаційної схеми встановлено світлодіод, який показує рівень логічного сигналу на відповідному вході  $x_i$ . Якщо на вхід подано сигнал логічної одиниці, то світлодіод запалюється. Якщо на вхід подано сигнал логічного нуля, світлодіод погасає. Світлодіод, що показує логічний рівень на виході  $Y$ , вмонтовано в саму комбінаційну схему.

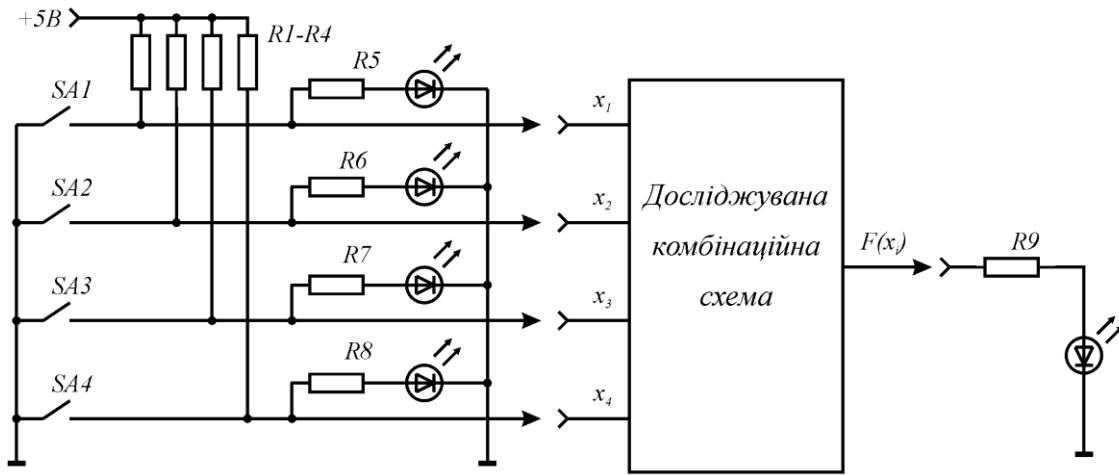


Рис.6. Схема установки для дослідження комбінаційних схем.

4. Послідовно встановити на входах схеми всі комбінації вхідних сигналів, задані в таблиці 8 та записати рівні вихідних сигналів. Після заповнення таблиці 8 вона буде представляти собою таблицю істинності даної комбінаційної схеми.
5. Використовуючи таблицю істинності записати досконалу диз'юнктивну та досконалу кон'юнктивну нормальні форми для виконуваної комбінаційною схемою логічної функції.
6. Використовуючи основні закони алгебри логіки мінімізувати логічну функцію.
7. За мінімізованою логічною функцією побудувати комбінаційну схему.
8. Зробити висновки.

Таблиця 8

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$x_1$	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
$x_2$	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
$x_3$	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
$x_4$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$Y$																

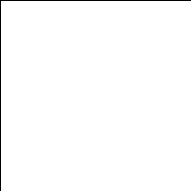
## 2. Дослідження роботи логічного аналізатора на ПК

1. Синтезувати комбінаційну схему на ПК, використовуючи пакет прикладних програм PCAD або WORKBENCH.
2. Використовуючи наявний в цих програмах логічний аналізатор, визначити таблицю істинності даної комбінаційної схеми, записати аналітичний вираз виконуваної логічної функції та мінімізувати її.
3. Зробити зворотнє перетворення: за отриманою функцією синтезувати комбінаційну схему.

## Література

1. Ефимчик М.К., Шушкевич С.С. Основы радиоэлектроники. Для физ. спец. ун-тов. Мн.:Изд."Университетское". - 1986. - 303 с.
2. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. Учебное пособие для вузов. М.: Радио и связь. - 1985. - 488 с.
3. В.С.Руденко и др. Основы промышленной электроники. К.: Выща школа. Головное издательство. - 1985. - 400 с.
4. Бессонов А.С. Теоретические основы электротехники . М.: Радио и связь. - 1983. - 450 с.
5. В.А. Скаржепа, А.Н.Луценко. Электроника и микросхемотехника. Часть I. К.: Выща школа. - 1989. - 431 с.
6. Г.И.Пухальский, Т.Я.Новосельцева. Проектирование дискретных устройств на интегральных микросхемах. М.: Радио и связь. - 1990. - 304 с.

## Примітки



Кедюлич В.М., Гуранич П.П., Герзанич О.І.

Радіоелектронні пристроїю

Лабораторний практикум з курсу „Основи радіоелектроніки”  
Видавництво Ужгородського університету. Здано в набір  
1.09.03. Підп. до друку 5.09.03. Формат 14Х20. Обєм  
5 ум.арк. Тираж 100 прим.