

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до лабораторних робіт з дисципліни  
„ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА”  
Ч. I. АНАЛОГОВА ЕЛЕКТРОНІКА  
для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей  
6.050801 — Мікро- та наноелектроніка  
6.050802 — Електронні пристрої та системи  
6.050902 — Радіоелектронні апарати  
6.051004 — Оптотехніка  
6.051402 — Біомедична інженерія

ЗАТВЕРДЖЕНО  
кафедрою біомедичних  
електронних пристроїв і  
систем  
Протокол №      від                      р.

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни „Електроніка та мікропроцесорна техніка” Ч.І. Аналогова електроніка для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 6.050801 — Мікро- та наноелектроніка, 6.050802 — Електронні пристрої та системи, 6.050902 — Радіоелектронні апарати, 6.051004 — Оптотехніка, 6.051402 — Біомедична інженерія/ Упоряд. А.І.Бих, Л.О. Авер'янова, Скляр О.І., , Є.А. Чугуй – Харків, ХНУРЕ, 2011.– 65с.

Упорядники А.І.Бих, Л.О. Авер'янова, О.І. Скляр, Є.А. Чугуй

Рецензент Жук М.І., канд. тех. наук, проф. каф. БМЕ

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
Лабораторна робота №1. Дослідження роботи біполярного транзистора .	5
1.1 Мета роботи .....	5
1.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи .....	5
1.3 Порядок виконання роботи .....	7
1.4 Зміст звіту .....	12
1.5 Контрольні запитання .....	12
Лабораторна робота №2. Дослідження роботи підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах .....	13
2.1 Мета роботи .....	13
2.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи .....	13
2.3 Порядок виконання роботи .....	17
2.4 Зміст звіту .....	23
2.5 Контрольні запитання та завдання .....	23
Лабораторна робота №3. Дослідження двокаскадного підсилювача напруги зі зворотними зв'язками .....	24
3.1 Мета роботи .....	24
3.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи .....	24
3.3 Порядок виконання роботи .....	26
3.4 Зміст звіту .....	32
3.5 Контрольні запитання та завдання .....	32
Лабораторна робота №4. Дослідження аналогових пристроїв на операційному підсилювачі .....	33
4.1 Мета роботи .....	33
4.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи .....	33
4.3 Порядок виконання роботи .....	37
4.4 Зміст звіту .....	44
4.5 Контрольні запитання та завдання .....	44
Лабораторна робота №5. Дослідження роботи вибіркового підсилювачів з RC-колами .....	45
5.1 Мета роботи .....	45
5.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи .....	45
5.3 Порядок виконання роботи .....	48
5.4 Зміст звіту .....	52
5.5 Контрольні запитання та завдання .....	53
Лабораторна робота №6. Дослідження роботи вторинних джерел живлення .....	53
6.1 Мета роботи .....	53
6.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи .....	53
6.3 Порядок виконання роботи .....	57
6.4 Зміст звіту .....	62
6.5 Контрольні запитання та завдання .....	62
Рекомендована література .....	64

## ВСТУП

Елементна база сучасної електроніки представлена як аналоговими пристроями, так і цифровими. Аналогова елементна база включає найпростіші елементи — діоди, транзистори, та пристрої на їх основі різних ступенів інтеграції.

**Суть та задачі дисципліни.** Дисципліна „Електроніка та мікропроцесорна техніка” Ч.І є однією з обов’язкових дисциплін для студентів, які вивчають електроніку. Її основою є дисципліни фізика, математика, фізичні основи електроніки, теоретичні основи електротехніки.

Метою вивчення дисципліни „Електроніка та мікропроцесори” Ч.І є засвоєння принципів побудови аналогових пристроїв, основним елементом яких є транзистор.

Окрім лекцій, під час вивчення цієї дисципліни, передбачено виконання лабораторних робіт з використанням лабораторних макетів, на яких виконані різні пристрої аналогової схемотехніки. Це дозволяє студентам набувати навичок роботи з реальними аналоговими пристроями.

**Опис лабораторного робочого місця.** Всі лабораторні роботи виконуються на лабораторному стенді УИЛС, або на окремих макетах. Під час виконання лабораторної роботи використовуються звуковий генератор, вольтметр та осцилограф.

**Порядок виконання лабораторних робіт.** На початку першого заняття всі студенти повинні ознайомитися з правилами техніки безпеки і розписатися про це в журналі обліку виконання лабораторних робіт. Студенти, які не ознайомилися з правилами техніки безпеки, до виконання лабораторних робіт не допускаються.

Кожній лабораторній роботі має передувати самостійна підготовка студентів, у процесі якої потрібно вивчити методичні вказівки до лабораторної роботи, конспект лекцій та рекомендовані літературні джерела. Перед початком лабораторної роботи викладач перевіряє підготовленість студентів до виконання конкретної лабораторної роботи, де студенти мають знати мету і порядок виконання роботи.

Результати виконання лабораторної роботи відображаються у звіті, який має містити: назву лабораторної роботи, мету роботи, схеми досліджуваних пристроїв, які вивчаються у даній лабораторній роботі, результати вимірювань у таблицях та графіках, а також результати теоретичних обчислень, які зазначені у методичних вказівках, та висновки.

До початку наступної лабораторної роботи студент має подати викладачеві повністю оформлений звіт про попередню роботу.

Залік з лабораторної роботи студент отримує після співбесіди з викладачем за темою виконання робіт.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

1.1 Мета роботи: Дослідження роботи біполярного транзистора та базових принципів побудови підсилювача на його основі

1.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи

Біполярний транзистор (надалі транзистор) – це електронний прилад, який має три виводи і може використовуватись для підсилення сигналів. Транзистор може мати  $n-p-n$  (рис. 1.1) або  $p-n-p$  (рис. 1.2) структуру. Виводи транзистора це — емітер, база, колектор. При схемотехнічному зображенні транзистора вивід емітера має стрілку, саме за напрямком цієї стрілки можна визначити тип структури транзистора (якщо стрілка направлена до бази, то структура транзистора  $p-n-p$  типу, якщо стрілка направлена від бази, то структура транзистора  $n-p-n$  типу).

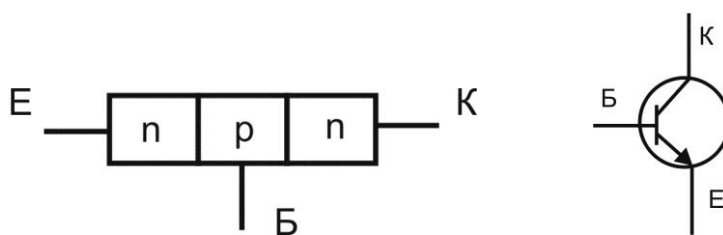


Рисунок 1.1 — Структура та умовне графічне зображення транзистора  $n-p-n$  структури

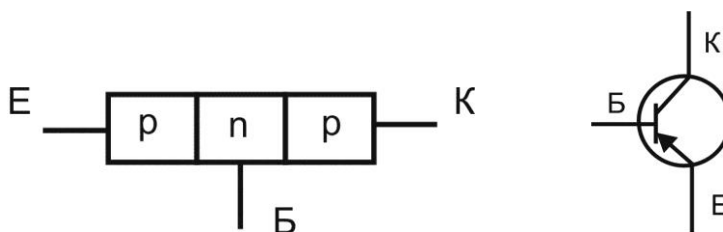


Рисунок 1.2 — Структура та умовне графічне зображення транзистора  $p-n-p$  структури

Напруга для живлення каскаду на транзисторі завжди подається між колектором та спільною точкою каскаду. Вхідними електродами, на які можуть подаватись сигнали, можуть бути як база, так і емітер. Вихідним електродом транзистора може бути або колектор, або емітер. Якщо вихідним електродом є емітер, то пристрій, на основі такого включення транзистора, називається емітерним повторювачем.

Кожен транзистор характеризується максимальними значеннями  $I_K$ ,  $I_B$ ,  $U_{KE}$ .

Робота транзистора, як активного нелінійного 4-полюсника може бути охарактеризована за допомогою сімейств статичних вхідних (для різних вихідних напруг живлення) та вихідних (для різних вхідних струмів) вольт-амперних (ВАХ) характеристик транзистора (рис.1.3 та 1.4).

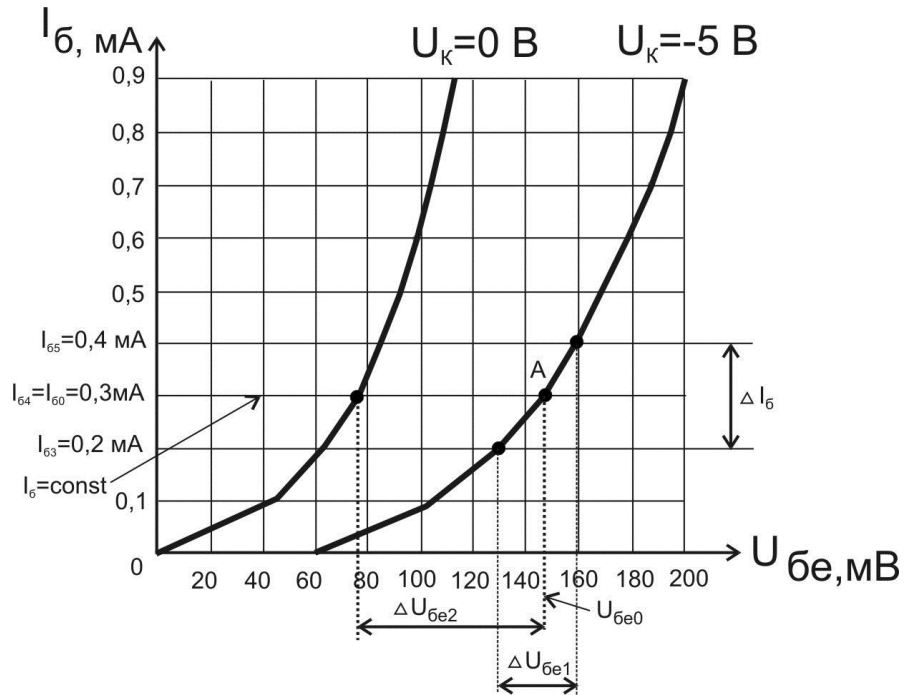


Рисунок 1.3 — Вид сімейства вхідних ВАХ характеристик германієвого транзистора р-п-р типу

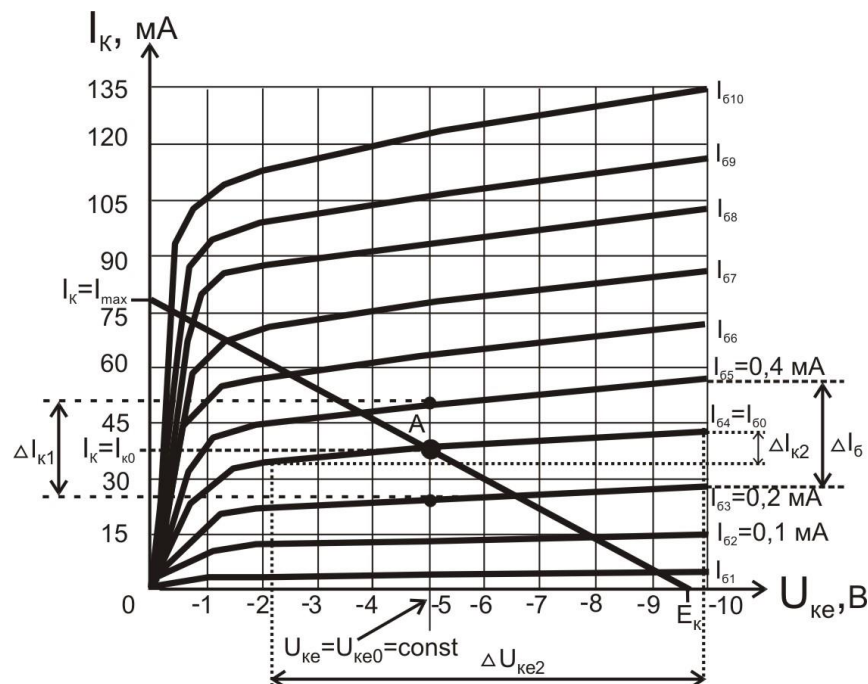


Рисунок 1.4 — Вид сімейства вихідних характеристик транзистора р-п-р типу

Існує три основні стани у роботі транзистора: активний (колекторний перехід зміщений у зворотному напрямку, емітерний – у прямому), відсічки (обидва  $p-n$  переходи транзистора зміщені у зворотному напрямку) та насичення (обидва  $p-n$  переходи зміщені у прямому напрямку).

На графіки вихідних характеристик транзистора наноситься навантажувальна характеристика, яка задається значенням  $E_K$  та  $I_{K\max}$ . За цією характеристикою можна визначити значення  $R_K = \frac{E_K}{I_{K\max}}$ . Навантажувальна характеристика являє собою сукупність можливих положень робочої точки для транзистора, які визначаються струмом бази. Положення робочої точки за відсутності динамічної складової вхідного сигналу визначає режим роботи каскаду на біполярному транзисторі. За положенням робочої точки можна визначити струми та напруги спокою транзистора ( $U_{ке0}, I_{бе0}$ ) у активному режимі, а також  $h$ -параметри транзистора:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{\beta e1}}{\Delta I_{\beta}} \right|_{U_{ке}=\text{const}}, [Ом]; \quad (1.1)$$

$$h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{\beta e2}}{\Delta U_{ке1}} \right|_{I_{\beta}=\text{const}}; \quad (1.2)$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_{к1}}{\Delta I_{\beta}} \right|_{U_{ке}=\text{const}}; \quad (1.3)$$

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_{к2}}{\Delta U_{ке2}} \right|_{I_{\beta}=\text{const}}, [См], \quad (1.4)$$

де графічне отримання всіх величин показано на рис. 1.3 та 1.4, крім величини  $\Delta U_{ке1}$ , цю величину отримують як різницю двох колекторних напруг  $\Delta U_{ке1} = U_{K2}|_{U_K=-5B} - U_{K1}|_{U_K=0B}$  (саме з цією метою слід знімати дві вхідні характеристики для різних значень  $U_K$ ).

Ці параметри дозволяють отримати інформацію про вхідний та вихідний опір транзистора, про коефіцієнти підсилення напруги та струму цим транзистором.

### 1.3 Порядок виконання роботи

На стенді УИЛС зібрати схему для дослідження статичних характеристик біполярного транзистора (рис. 1.5).

Досліджуваний транзистор є транзистором типу П214. Як джерело вхідного сигналу використовується блок постійної напруги **E1** стенду УИЛС (20 В); для зміни величини вхідного сигналу використовується змінний додатковий опір ( $R_{\beta}$ ), який відградуєвано у величинах струму бази; для встановлення напруги живлення транзистора використовується джерело

постійної напруги  $E_2$  стенду УИЛС, де напругу можна змінювати у межах від 0 до 10 В; для вимірювання напруг використовується цифровий вольтметр; для вимірювання струмів використовується міліамперметр.

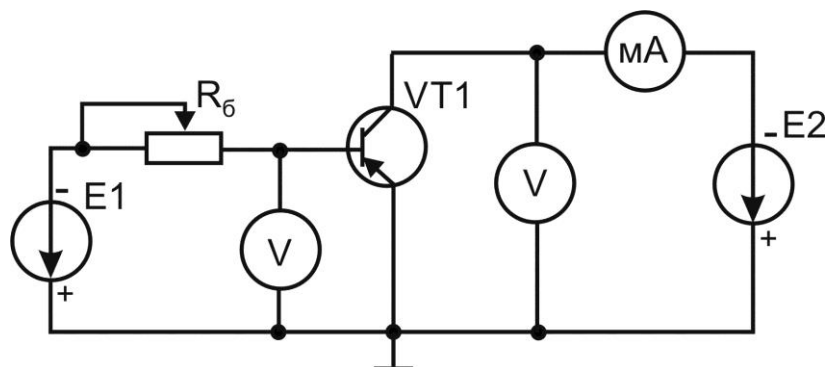


Рисунок 1.5 — Схема для дослідження статичних характеристик транзистора

### 1.3.1 Дослідження вхідних статичних характеристик транзистора

1.3.1.1 Для двох значень  $U_K$  провести вимірювання потенціалу бази при зміні вхідного струму бази, отримані дані занести в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 — Вхідні напруги  $U_{\text{бе}}$  при різних напругах живлення транзистора та при зміні вхідного струму бази

Вхідний струм	$I_{\text{б}}, \text{мА}$									
Вхідна напруга	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$U_{\text{бе}}, \text{мВ}$ при $U_K=0\text{В}$										
$U_{\text{бе}}, \text{мВ}$ при $U_K=5\text{В}$										

1.3.1.2 Побудувати графіки вхідних ВАХ транзистора, подібних до рис. 1.3, при побудові графіків слід звернути увагу, що виміряна напруга  $U_{\text{бе}}$ , показується вздовж вісі абсцис, а струм бази  $I_{\text{б}}$  відкладається на осі ординат. Масштаб слід вибрати таким, щоб графіки займали більшу частину аркушу.

### 1.3.2 Дослідження вихідних статичних характеристик транзистора

1.3.2.1 Дослідження вихідних характеристик транзистора проводять за тією ж схемою (див. рис. 1.5). При встановленій напрузі живлення колектора змінюють величину вхідного струму за допомогою  $R_{\text{б}}$  та вимірюють струм у колі колектора. Вимірювання слід проводити при встановленому  $I_{\text{б}}$  та змінюючи  $U_{\text{ке}}$  у такій послідовності:  $U_{\text{ке}1} = 1\text{В}$ ,  $U_{\text{ке}2} = 2\text{В}$ ,  $U_{\text{ке}3} = 5\text{В}$ ,  $U_{\text{ке}4} = 10\text{В}$ . Результати вимірювань занести до табл. 1.2 .

**Увага!** При проведенні вимірювань для напруг на колекторі 5В та особливо 10 В вимірювання проводити максимально швидко, оскільки



досліджуваний транзистор перегрівається, після чого повернути напругу  $U_{ке}$  до значення 1В.

Таблиця 1.2 — Вихідні колекторні струми при зміні вхідного струму бази для різних напруг живлення транзистора

$I_{\bar{o}}$ , мА	$I_K$ , мА			
	при $U_{KE} = 1 В$	при $U_{KE} = 2 В$	при $U_{KE} = 5 В$	при $U_{KE} = 10В$
0				
0,1				
0,2				
0,3				
0,4				
0,5				
0,6				
0,7				
0,8				
0,9				

1.3.2.2 За даними табл. 1.2 побудувати графіки вихідних характеристик. Вихідні характеристики будують для фіксованих значень струму бази, при цьому вздовж осі абсцис відкладають напругу на колекторі, а вздовж осі ординат відкладають струм у колі колектора, аналогічно до рис. 1.4. Частину характеристик, яка відповідає стану насичення транзистора дорисувати (при  $U_{KE} < 1В$ ), масштаб графіків має бути таким, щоб вони займали більшу частину аркушу .

1.3.2.3 Визначити значення  $E_K$  та  $R_K$  за вказаною викладачем навантажувальною характеристикою. Визначити положення робочої точки А (див. рис. 1.4 ) за умови отримання максимального розмаху підсиленої вихідної напруги. Визначити для робочої точки значення  $I_{\bar{o}0}$ ,  $U_{\bar{o}e0}$ ,  $I_{K0}$ ,  $U_{ке0}$

1.3.2.4 Визначити малосигнальні  $h$ -параметри транзистора в області робочої точки за формулами (1.1 –1.4), використовуючи побудовані графіки вхідних і вихідних характеристик

### 1.3.3 Дослідження підсилювальних характеристик транзистора

1.3.3.1 Скласти схему для дослідження підсилювальних характеристик транзистора (рис. 1.6). У цій схемі використовуються ті ж елементи, що й у попередніх дослідах, додатково використовується дві ємності по 10 мкФ (С2, С4) та опір R4 (встановлюється розраховане вище значення  $R_K$ ), їх позиційне позначення співпадає з позначенням цих елементів на стенді УИЛС. Опір навантаження ( $R_n=1кОм$ ) використовується зовнішній. Для вимірювань використовується осцилограф, причому вхід у осцилографа має бути вибраний відкритим. У якості джерела змінного сигналу використовується звуковий генератор. Напруга  $E_K$ , яка розрахована у п.1.3.2.3, встановлюється за допомогою джерела Е2.

1.3.3.2 Включити генератор і осцилограф на прогрів, але до досліджуваного пристрою не підключати.

1.3.3.3 Змінюючи  $R_6$  встановити визначене значення  $I_{60}$ , що забезпечить необхідне положення робочої точки. Включити живлення і встановити визначене значення  $E_K$ . За допомогою вольтметра виміряти постійні значення напруг на базі і на колекторі транзистора. Порівняти виміряні величини з визначеними у п. 1.3.2.3 значеннями  $U_{6e0}$ ,  $U_{ke0}$ .

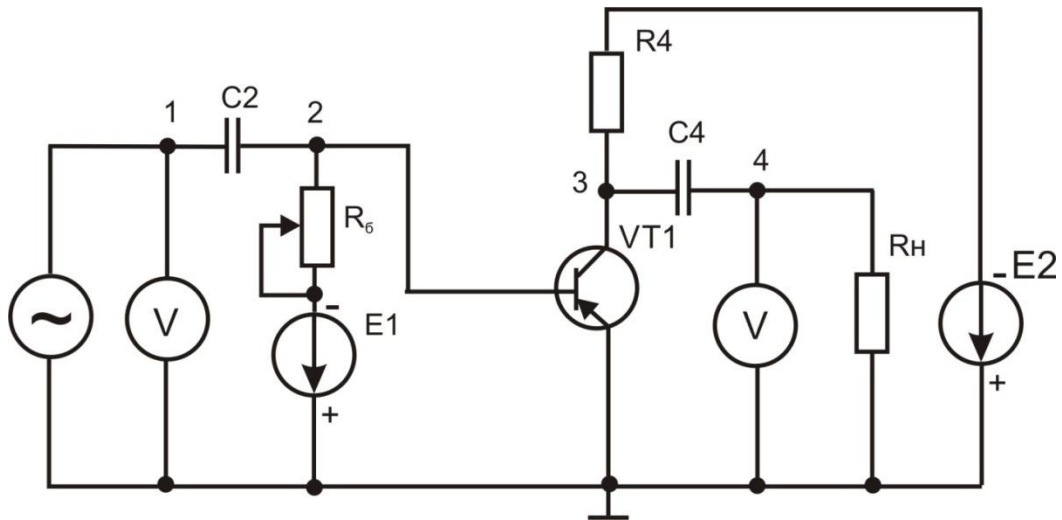


Рисунок 1.6 — Схема найпростішого підсилювача змінного струму на біполярному транзисторі (П214), (режим А)

1.3.3.4 Підключити осцилограф до колектора транзистора (вузол 3 на схемі рис. 1.6). Спільний вхід осцилографа підключається до спільного вузла схеми.

Підключити генератор до досліджуваного пристрою (вузол 1 на схемі рис. 1.6). На генераторі встановити частоту 1000 Гц. Встановити вихідний опір генератора 5 Ом. Встановити вихідну діючу напругу генератора біля 100 мВ, вимірювання проводити цифровим вольтметром.

На екрані осцилографа спостерігати форму напруги на колекторі. Змінюючи рівень вихідної напруги генератора добитися максимального рівня вихідного сигналу без спотворень.

Змінюючи струм бази на 0,1мА в сторону збільшення і зменшення добитися оптимального положення робочої точки, критерій — максимальний розмах неспотвореного сигналу. Зарисувати отриману осцилограму, звертаючи увагу на положення вісі абсцис та масштаб осей.

1.3.3.5 Виміряти діюче значення напруги  $E_2$ , виміряти падіння напруги на  $R_н$ . Визначити коефіцієнт підсилення напруги підсилювачем.  
 $K_U = U_H / E_2$ .

1.3.3.6 Збільшуючи вихідну напругу  $E_2$ , спостерігати за формою напруги на колекторі за допомогою осцилографа до появи характерних

двосторонніх спотворень синусоїдальної напруги. Зарисувати отриману осцилограму, вказавши положення та масштаб вісі часу та вісі напруги. На рисунку вказати, яке з обмежень викликане відсічкою, а яке насиченням транзистора.

1.3.3.7 Провести дослідження роботи транзистора у режимі В. Для цього змінити схему досліджуваного пристрою так: вилучити джерело  $E1$  та  $R_6$ , а також вилучити або замкнути перемишкою ємність  $C2$  (рис. 1.7).

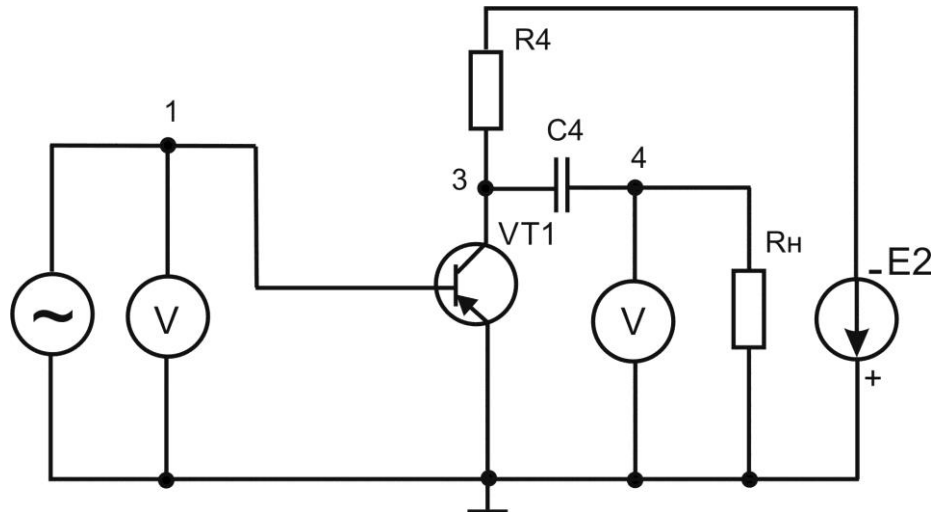


Рисунок 1.7 — Схема дослідження роботи підсилювача у режимі В

Збільшуючи вихідну напругу генератора, добитися максимального сигналу на колекторі транзистора без спотворень. Переконалися, що кут відсічки сигналу становить  $90^0$  (половина синусоїди). Зарисувати осцилограму, вказавши положення та масштаб вісі часу та вісі напруги.

1.3.3.8 Провести дослідження роботи транзистора у режимі С. Поновити ємність  $C2$  (рис.1.8).

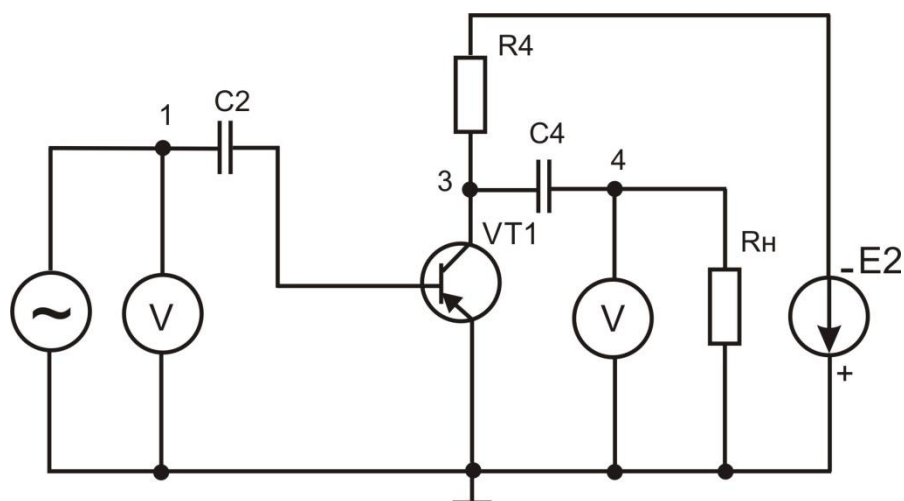


Рисунок 1.8 — Схема дослідження роботи підсилювача у режимі С

Змінюючи вихідну напругу генератора, добитися максимального сигналу на колекторі транзистора без спотворень. Переконалися, що кут

відсічки сигналу становить значно менше  $90^\circ$ . Зарисувати осцилограму, вказавши положення та масштаб осі часу та осі напруги.

1.3.3.9 Дослідити залежність кута відсічки від амплітуди вхідного сигналу у режимі С. Для цього потрібно, змінюючи амплітуду вхідного сигналу, фіксувати значення часу, впродовж якого транзистор перебуває у відкритому стані. Змінювати амплітуду вхідного сигналу потрібно у межах, які залежать від виду осцилограми на колекторі. Дані занести до табл. 1.3 щонайменше для п'яти значень, слід уникати спотворення вихідного сигналу.

Таблиця 1.3 — Значення кута відсічки при зміні вхідної напруги при  $T = const$

Амплітуда напруги на вході, В					
Значення постійної напруги автоматичного зміщення $U_{\text{св}}$ , В					
Значення часу відкритого стану транзистора, мс					
Значення кута відсічки, град					

За даними табл. 1.3 побудувати графік залежності значення зміни кута відсічки від амплітуди вхідної напруги.

#### 1.4 Зміст звіту

У звіті наводяться

- назва роботи;
- мета роботи;
- графіки вхідних та вихідних характеристик транзистора;
- визначені параметри покою транзистора за п. 1.3.2.3, визначені значення  $E_K$ ,  $R_K$ ;
- визначені  $h$ -параметри транзистора за формулами (1.1) – (1.4) та на відповідних графіках позначаються визначені величини;
- коефіцієнт підсилення напруги за п. 1.3.3.5;
- осцилограми за пп. 1.3.3.6 – 1.3.3.8 з відповідними поясненнями;
- графіки за п. 1.3.3.9;
- висновки до роботи.

#### 1.5 Контрольні запитання

1. Яку інформацію можна отримати з вхідних характеристик транзистора?
2. Як визначається режим роботи транзистора?
3. Які параметри характеризують роботу транзистора у статичному режимі?
4. Які є режими роботи транзистора та чим вони характерні?

5. Яку фізичну природу мають  $h$ -параметри транзистора?
6. Як визначається коефіцієнт підсилення транзистора?
7. Що таке навантажувальна характеристика?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

2.1 Мета роботи: Дослідження параметрів та характеристик елементарних каскадів підсилення на біполярних транзисторах, ввімкнених за схемами зі спільними емітером, колектором та базою.

### 2.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи

Існують три схеми включення транзистора – схема зі спільним емітером (СЕ) — рис. 2.1, схема зі спільним колектором (СК) — рис. 2.2, схема зі спільною базою (СБ) — рис. 2.3. У кожній з цих схем один з електродів обирається вхідним, другий – вихідним, а третій – спільним.

У всіх схемах включення транзистора вхідними електродами можуть бути або база, або емітер. Вихідними електродами у схемах зі СЕ та СБ є колектор, а у схемі зі СК – електрод емітера.

Транзистор може працювати у статичному та динамічному режимах.

#### 2.2.1 Робота біполярного транзистора у статичному режимі

Як вивчалось у попередній лабораторній роботі, у статичному режимі стан транзистора визначається сукупністю значень постійних струмів та напруг спокою у робочій точці А. Робота транзистора у статичному режимі досліджується без підключення опору навантаження.

У всіх схемах включення транзистора (СЕ, СК, СБ) режим роботи транзистора за постійним струмом забезпечується поданням напруги живлення на колектор  $E_K$  та напруги зміщення від джерела  $E_K$  через діляник напруги  $R_1, R_2$  на базу.

#### 2.2.2 Робота каскадів підсилення у динамічному режимі

Підсилювальні каскади, що працюють у динамічному режимі, характеризуються рядом параметрів: вхідним  $R_{вх}$  та вихідним  $R_{вих}$  опорами,

коефіцієнтами підсилення струму  $K_I$ , напруги  $K_U$  та потужності  $K_P$  (табл.2.1). При теоретичному розрахунку цих величин використовуються:

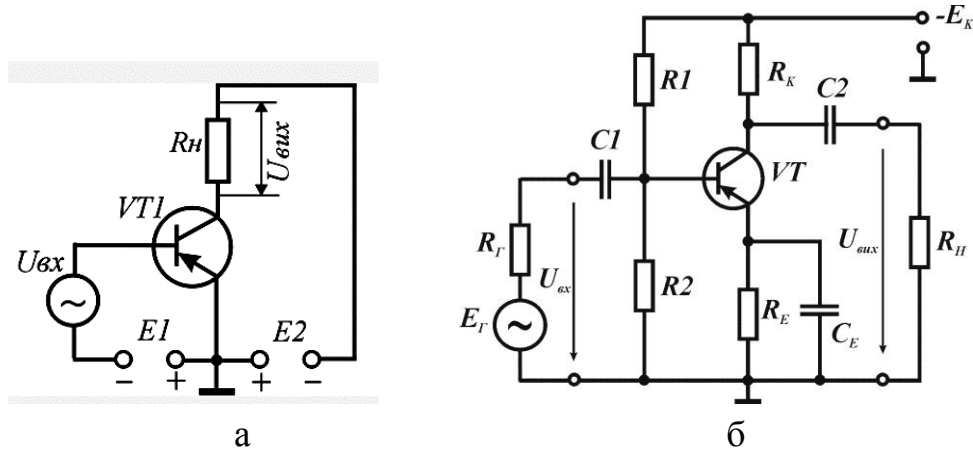


Рисунок 2.1 — Схема включення біполярного транзистора зі СЕ, а – принцип включення, б – реальне схемотехнічне включення транзистора

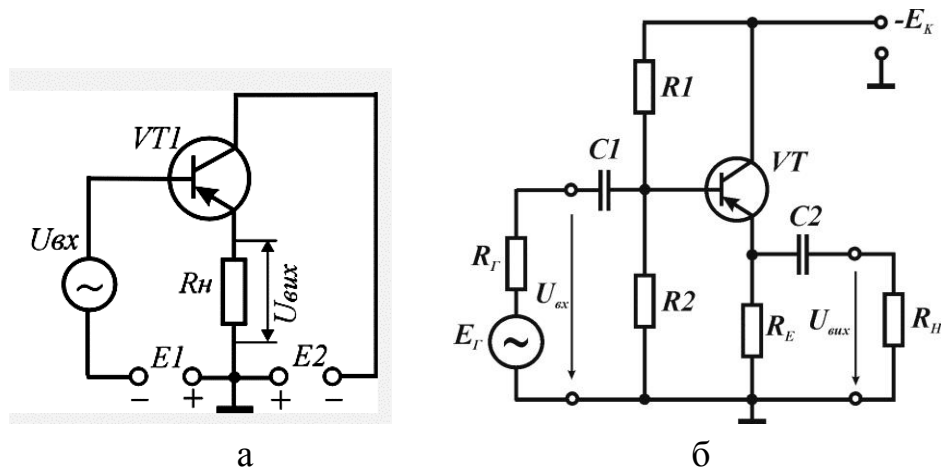


Рисунок 2.2 — Схема включення біполярного транзистора зі СК, а – принцип включення, б – реальне схемотехнічне включення транзистора

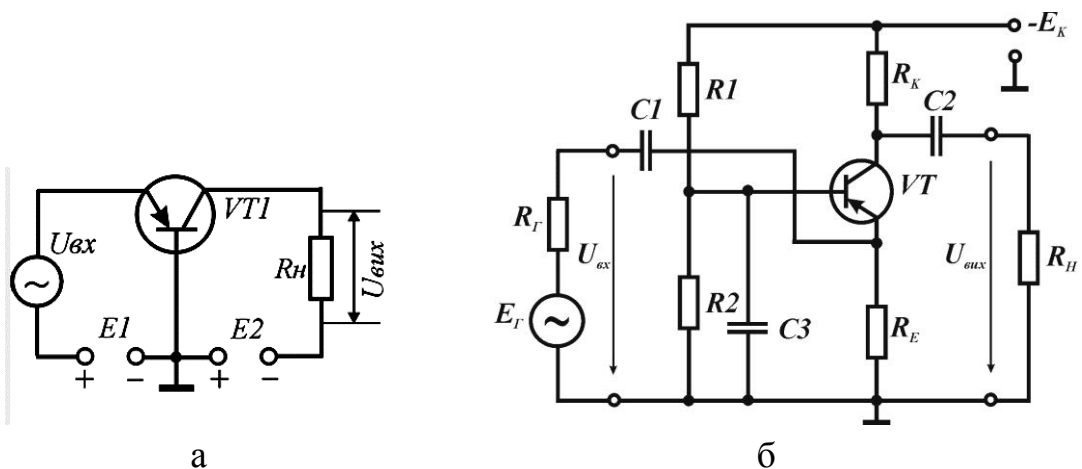


Рисунок 2.3 — Схема включення біполярного транзистора зі СБ, а – принцип включення, б – реальне схемотехнічне включення транзистора

диференціальні  $h$ -параметри  $h_{21E} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} |_{\Delta U_{KE}=0}$  та  $h_{21B} = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E} |_{\Delta U_{KB}=0}$ , диференціальний опір емітера  $r_E$ , об'ємний опір бази  $r_B$ , вхідний опір транзистора у схемах СЕ, СК, СБ –  $R_{\text{вх тр СЕ}}$ ,  $R_{\text{вх тр СК}}$ ,  $R_{\text{вх тр СБ}}$ , параметри джерела сигналу (ЕРС  $E_\Gamma$  та внутрішній опір  $R_\Gamma$ ), параметри навантаження (опори  $R_K$  та  $R_H$ ), параметри кола зміщення (опори діляника напруги  $R1$  та  $R2$ ). Параметри підсилювальних каскадів у динамічному режимі можна розрахувати за формулами табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Теоретичні значення параметрів підсилювальних каскадів у динамічному режимі

	СЕ	СК	СБ
$R_{\text{вх}}$	$R_{\text{вх}} = \frac{R_B \cdot R_{\text{вх тр СЕ}}}{R_B + R_{\text{вх тр СЕ}}}$ де $R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ $R_{\text{вх тр СЕ}} = r_B + r_E \cdot (1 + h_{21E})$	$R_{\text{вх}} = \frac{R_B \cdot R_{\text{вх тр СК}}}{R_B + R_{\text{вх тр СК}}}$ де $R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ $R_{\text{вх тр СК}} = r_B + (1 + h_{21E})(r_E + R_{\text{EH}})$ де $R_{\text{EH}} = \frac{R_E \cdot R_H}{R_E + R_H}$	$R_{\text{вх}} = \frac{R_E \cdot R_{\text{вх тр СБ}}}{R_E + R_{\text{вх тр СБ}}}$ де $R_{\text{вх тр СБ}} = r_E + r_B(1 - h_{21B})$
$R_{\text{вих}}$	$R_{\text{вих}} \approx R_K$	$R_{\text{вих}} = r_E + \frac{r_B + R_\Gamma}{1 + h_{21E}}$	$R_{\text{вих}} \approx R_K$
$K_I$	$K_I = h_{21E} \frac{R_K}{R_K + R_H}$	$K_I = \frac{(1 + h_{21E})R_E}{R_E + R_H}$	$K_I = h_{21E} \frac{R_K}{R_K + R_H}$
$K_U$	$K_U = h_{21E} \frac{R_{\text{KH}}}{R_{\text{вх}} + R_\Gamma}$ де $R_{\text{KH}} = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}$	$K_U = \frac{(1 + h_{21E})R_{\text{EH}}}{r_B + (1 + h_{21E})R_{\text{EH}} + R_\Gamma}$	$K_U = h_{21B} \frac{R_{\text{KH}}}{R_{\text{вх}} + R_\Gamma}$ де $R_{\text{KH}} = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}$
$K_P$	$K_P = K_U \cdot K_I$	$K_P = K_U \cdot K_I$	$K_P = K_U \cdot K_I$
$h_{21}$	$h_{21E} = \beta = I_{0K}/I_{0B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	$h_{21K} = \beta + 1 = I_{0E}/I_{0B} = \frac{1}{1 - \alpha}$	$h_{21B} = \alpha = I_{0K}/I_{0E} = \frac{\beta}{1 + \beta}$

### 2.2.3 Частотні характеристики каскадів підсилення

Залежність модуля коефіцієнта підсилення напруги від частоти є амплітудно-частотною характеристикою (АЧХ) підсилюючого каскаду. В загальному випадку підсилюючий каскад може містити низку реактивних елементів: розділяючих конденсаторів  $C1$ ,  $C2$  (включені послідовно відносно входу або виходу схеми) і конденсаторів  $C3$  (схема зі СБ),  $C_E$  (схема зі СЕ), які включені паралельно елементам схеми. Значним є також вплив ємностей переходів транзистора. Вплив ємнісних елементів на величину вихідної напруги каскаду є різним при різних частотах вхідного сигналу. В області низьких частот найбільшим є вплив розділяючих

конденсаторів (збільшення вхідного опору), що зменшує вихідну напругу. В області високих частот вирішальною є шунтуюча дія ємності колекторного переходу транзистора, що також призводить до завалу АЧХ. Граничними частотами  $f_{н гр}$  та  $f_{в гр}$  підсилювача є такі частоти, при яких коефіцієнт підсилення напруги падає в  $1/\sqrt{2}$  разів відносно його максимального значення на середніх частотах, тобто становить  $0,7 K_{U max}$ .

Схема лабораторного макету подана на рис. 2.4. Параметри транзистора, який використовується у макеті, мають такі значення:  $h_{21E} = 75$ ;  $r_E = 10$  Ом;  $r_B = 150$  Ом. Для проведення вимірювань у лабораторній роботі додатково використовуються генератор гармонічних сигналів, вихідний опір генератора становить  $R_G = 5$  Ом, осцилограф, вольтметр.

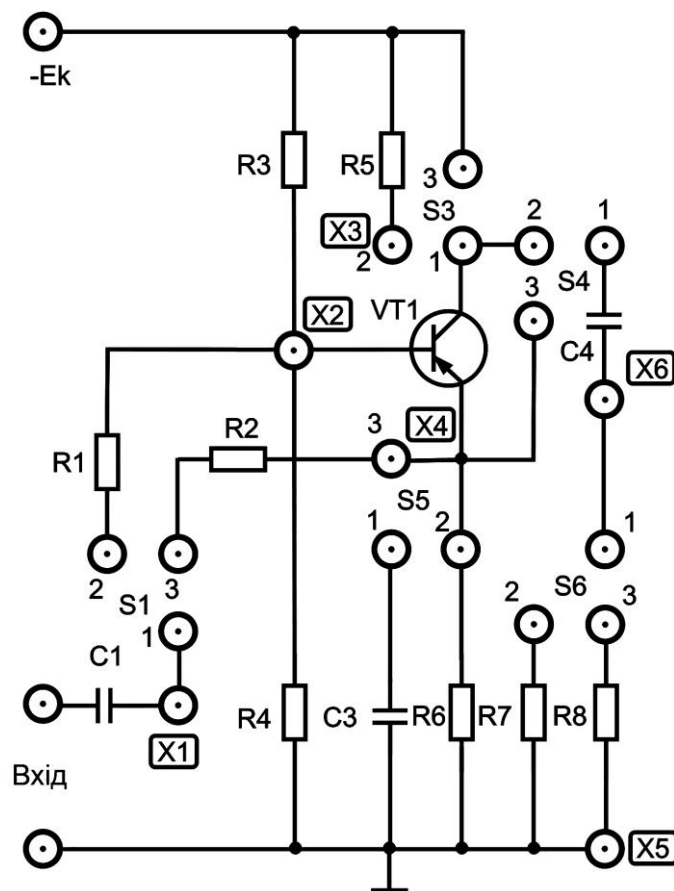


Рисунок 2.4 — Схема лабораторного макету для дослідження роботи підсилювальних каскадів з різним включенням транзистора (СЕ, СК, СБ)

При розрахунках за табл. 2.1 слід мати на увазі, що наведені формули відповідають схемам 2.1б – 2.3б, у реальному макеті (див. рис. 2.4) позначення дещо інші, їх співставлення подано у табл. 2.2.

Лабораторний макет передбачає можливість монтажу підсилюючих каскадів СЕ, СК, СБ. При дослідженні різних схем включення транзистора



слід виконувати відповідні комутації за допомогою монтажних провідників (перемичок). **Всі комутації виконуються при відключеному живленні макету.**

Параметри елементів лабораторного макету:

Напруга живлення:  $E_K = 12 \text{ В}$ ;

— опори:  $R1 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R2 = 100 \text{ Ом}$ ;

— опори  $R3 = 51 \text{ кОм}$ ,  $R4 = 10 \text{ кОм}$ ;

— опір  $R5 = 2 \text{ кОм}$ ;

— опір  $R6 = 470 \text{ Ом}$ ;

— опори  $R7 = 100 \text{ Ом}$  та  $R8 = 2 \text{ кОм}$ ;

— ємність  $C1 = 10 \text{ мкФ}$ , вхідна розділяюча ємність, її призначення відповідає призначенню ємності  $C1$  у схемах, поданих на рис. 2.1–2.3;

— ємність  $C3 = 10 \text{ мкФ}$ , може підключатись до емітера (входить до кола емітерної термостабілізації), її призначення відповідає призначенню ємності  $C_E$  у схемі, поданій на рис. 2.1; ця ємність забезпечує підключення бази транзистора до спільної точки у схемі СБ;

— ємність  $C4 = 10 \text{ мкФ}$ , розділяюча вихідна ємність, її призначення відповідає призначенню ємності  $C2$  у схемах, поданих на рис. 2.1–2.3.

У макеті використовуються комутатори  $S1, S3, S4, S5, S6$ .

Для підключення приладів використовуються гнізда  $X1 - X5$ .

Таблиця 2.2 — Відповідність параметрів макету та принципів схем

Параметри принципів схем	Параметри макету
—	$R1$
—	$R2$
$R1$	$R3$
$R2$	$R4$
$R_K$	$R5$
$R_E$	$R6$
$R_H$	$R7, R8$

При розрахунках коефіцієнта підсилення напруги  $K_U$  слід мати на увазі, що у реальному макеті до опору  $R_{\Gamma}$  у різних випадках додається або опір  $R1$ , або опір  $R2$ , тобто при розрахунках слід визначити  $R'_{\Gamma}$  (табл. 2.3).

### 2.3 Порядок виконання лабораторної роботи

Лабораторна робота включає: експериментальні дослідження каскадів підсилення СЕ, СК, СБ (рис. 2.1–2.3), обробку результатів експерименту,

теоретичні розрахунки параметрів каскадів (табл. 2.1, з урахуванням табл.2.2, 2.3) та порівняльний аналіз отриманих експериментальних та теоретичних результатів.

Таблиця 2.3 — Розрахунок  $K_U$  для даного макету для різних схем підсилення

	СЕ	СК	СБ
$K_U$	$K_U = h_{21E} \frac{R_{KH}}{R_{BX} + R'_\Gamma}$ де $R_{KH} = \frac{R_5 \cdot R_8}{R_5 + R_8}$ $R'_\Gamma = R_\Gamma + R1$	$K_U = \frac{(1 + h_{21E})R_{EH}}{r_B + (1 + h_{21E})R_{EH} + R'_\Gamma}$ де $R_{EH} = \frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7}$ $R'_\Gamma = R_\Gamma + R1$	$K_U = h_{21B} \frac{R_{KH}}{R_{BX} + R'_\Gamma}$ де $R_{KH} = \frac{R_5 \cdot R_8}{R_5 + R_8}$ $R'_\Gamma = R_\Gamma + R2$

### 2.3.1 Експериментальні дослідження

Вивчити лабораторний макет.

#### 2.3.1.1 Дослідження роботи підсилювача за схемою СЕ

Зібрати на макеті схему підсилювача зі СЕ (див. рис. 2.1). Для цього у комутаторах  $S1, S3 - S6$  встановити перемички 1–2. Після перевірки схеми викладачем включити живлення.

*Визначення параметрів каскаду у статичному режимі.* Вольтметром виміряти значення постійних напруг, дані записати до табл. 2.4. При вимірах загальний провід вольтметра підключається до гнізда  $X5$  або  $X4$ .

Таблиця 2.4 — Результати вимірів у статичному режимі (схема СЕ)

$E_K - X5$	$X4 - X5$	$X3 - X4$	$X2 - X4$	$X2 - X5$
$E_K, В$	$U_{0E}, В$	$U_{0KE}, В$	$U_{0BE}, В$	$U_{0R4}, В$

*Визначення параметрів каскаду у динамічному режимі.*

На генераторі гармонічних сигналів встановити частоту  $f = 5$  кГц, звернути увагу на положення тумблера «внутрішнє навантаження», він має знаходитись у положенні «ВКЛ», ручка «Регулювання вихідної напруги» генератора має бути у крайньому лівому положенні.

До гнізд макету «вхід» підключити вихід генератора. Вольтметр переключити в режим вимірювання змінної напруги. До виходу каскаду підключити навантаження  $R8$  (у комутаторі  $S6$  замкнуті контакти 1 – 3). Осцилограф підключити паралельно опору навантаження (гнізда  $X6 - X5$ ).

Регулюючи амплітуду вхідного сигналу  $E_{\Gamma}$ , спостерігати форму вихідного сигналу, досягти появи амплітудних обмежень (спотворень синусоїди). Потім зменшити рівень вхідного сигналу до рівня, при якому зникнуть спотворення на виході підсилювача.

Заміряти вольтметром величину максимальної напруги  $E_{\Gamma \max}$  (точки X1 – X5), коли сигнал на виході підсилювача ще немає спотворень, після чого встановити на генераторі величину напруги на  $\sim 20\%$  меншу за виміряну, саме це значення і прийняти за робоче значення  $E_{\Gamma}$ , записати його до табл.2.5. Після встановлення визначеного значення  $E_{\Gamma}$  провести вимірювання величини вхідної (точки X2 – X5) та вихідної (точки X6 – X5) напруг, а результати експериментів записати до табл.2.5.

Змінити навантаження з R8 на R7 (у комутаторі S6 встановити перемичку у положення 1–2). Повторити вимірювання  $U_{\text{вх}}$  та  $U_{\text{вих}}$ , результати експериментів записати до табл.2.5.

Таблиця 2.5 — Результати вимірів у динамічному режимі (схема СЕ)

$R_{\text{H}}$ , Ом	$E_{\Gamma}$ , В	$U_{\text{вх}}$ , В	$U_{\text{вих}}$ , В
$R_{\text{H1}} = R8 = 2000$ Ом			
$R_{\text{H2}} = R7 = 100$ Ом			

*Проведення вимірів амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).*

Змінити опір навантаження  $R_{\text{H1}} = R8$ . Встановити  $E_{\Gamma}$  відповідно до табл.2.5. Під час цього дослідження значення вхідної напруги  $E_{\Gamma}$  перевіряти при кожному вимірюванні, воно має бути постійним, якщо воно змінилось, то його слід відрегулювати. Змінюючи частоту вхідного сигналу, зняти залежність вихідної напруги  $U_{\text{вих}}$  каскаду від частоти. Досліджуваний частотний діапазон визначити самостійно, спостерігаючи зміну величини вихідної напруги. При поступовому збільшенні або зменшенні частоти відносно  $f = 5$  кГц визначити діапазон частот, де вихідна напруга є незмінною, потім зафіксувати точки початку спадання АЧХ в області нижніх та верхніх частот. Далі обрати ще по 4 – 5 значень частоти сигналу, доки не буде зафіксована величина вихідної напруги, нижча за рівень  $0,7U_{\text{вих max}}$ . Встановлені значення частот та виміряні значення напруги  $U_{\text{вих}}$  записати до табл.2.6 (у табл.2.6 подані **орієнтовні** значення частоти, під час дослідження їх слід **встановити самостійно**).

Виключити живлення макету.

Таблиця 2.6 — Результати вимірів АЧХ при  $E_{\Gamma} = const$  (схема СЕ)

$f = 5, \text{кГц}$	0,02	0,1	0,5	0,8	1	2	5	10	20	50	100	200
$U_{\text{вих}}, \text{В}$												
$K_U$												

## 2.3.1.2 Дослідження роботи підсилювача за схемою СК

*Визначення параметрів каскаду у статичному режимі*

Зібрати на макеті схему підсилювача зі СК (див. рис. 2.2). Для цього у комутаторі  $S1$  встановити перемичку 1–2, у комутаторі  $S4$  встановити перемичку 1–3, у комутаторі  $S5$  перемичку видалити зовсім, у комутаторі  $S6$  встановити перемичку 1–2.

Провести виміри аналогічні п. 2.3.1.1 у статичному режимі, результати вимірювань занести до табл. 2.7.

Таблиця 2.7 — Результати вимірів у статичному режимі (схема СК)

$E_K - X5$	$X4 - X5$	$X3 - X4$	$X2 - X4$	$X2 - X5$
$E_K, \text{В}$	$U_{0E}, \text{В}$	$U_{0KE}, \text{В}$	$U_{0BE}, \text{В}$	$U_{0R4}, \text{В}$

*Визначення параметрів каскаду у динамічному режимі*

Провести виміри аналогічні п. 2.3.2.1 у динамічному режимі для двох значень опору навантаження, дані вимірювань занести до табл. 2.8.

Таблиця 2.8 — Результати вимірів у динамічному режимі (схема СК)

$R_H, \text{Ом}$	$E_{\Gamma}, \text{В}$	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
$R_{H1} = R7 = 100 \text{ Ом}$			
$R_{H2} = R8 = 2000 \text{ Ом}$			

*Проведення вимірів амплітудно-частотної характеристики.*

Встановити опір навантаження  $R_{H1} = R7$ . Встановити  $E_{\Gamma}$  відповідно до табл.2.8. Вимірювання проводити аналогічно до п. 2.3.2.1. Результати занести в табл.2.9. Звернути увагу, що подані в табл.2.9 значення частоти є орієнтовними. Виключити живлення макету.

Таблиця 2.9 — Результати вимірів АЧХ при  $E_{\Gamma} = const$  (схема СК)

$f = 5, \text{кГц}$	0,02	0,1	0,5	0,8	1	2	5	10	20	50	100	200
$U_{\text{вих}}, \text{В}$												
$K_U$												

## 2.3.1.3 Дослідження роботи підсилювача за схемою СБ

*Визначення параметрів каскаду у статичному режимі.*

Зібрати на макеті схему підсилювача зі СК (див. рис. 2.3). Для цього у комутаторах виконати такі комутації:  $S1 \rightarrow 1-3$ ,  $S3 \rightarrow 1-2$ ,  $S4 \rightarrow 1-2$ ,  $S6 \rightarrow 1-2$ ; підключити С3 до Х2. Провести виміри аналогічні п. 2.3.1.1 у статичному режимі, результати вимірювань занести до табл. 2.10.

Таблиця 2.10 — Результати вимірів у статичному режимі (схема СБ)

$E_K - X5$	$X4 - X5$	$X3 - X4$	$X2 - X4$	$X2 - X5$
$E_K, \text{В}$	$U_{0E}, \text{В}$	$U_{0KE}, \text{В}$	$U_{0BE}, \text{В}$	$U_{0R4}, \text{В}$

*Визначення параметрів каскаду у динамічному режимі*

Провести виміри аналогічні п. 2.3.1.1 у динамічному режимі, результати вимірювань занести до табл. 2.11.

Таблиця 2.11 — Результати вимірів у динамічному режимі (схема СБ)

$R_H, \text{Ом}$	$E_{\Gamma}, \text{В}$	$U_{\text{вх}}, \text{В}$	$U_{\text{вих}}, \text{В}$
$R_{H1} = R8 = 2000 \text{ Ом}$			
$R_{H2} = R7 = 100 \text{ Ом}$			

*Проведення вимірів амплітудно-частотної характеристики*

Підключити навантаження  $R_{H1} = R8$ , Встановити  $E_{\Gamma}$  відповідно до табл.2.11. Вимірювання проводити аналогічно до п. 2.3.1.1. Результати занести в табл.2.12. Подані в табл. 2.12 значення частоти є орієнтовними.

Таблиця 2.12 — Результати вимірів АЧХ при  $E_{\Gamma} = const$  (схема СБ)

$f = 5, \text{кГц}$	0,02	0,1	0,5	0,8	1	2	5	10	20	50	100	200
$U_{\text{вих}}, \text{В}$												
$K_U$												

### 2.3.2 Розрахунок параметрів каскадів за даними експериментів

2.3.2.1 За даними вимірювань табл. 2.6, 2.9, 2.12 розрахувати коефіцієнт підсилення напруги  $|K_U| = \frac{U_{\text{вих}}}{E_{\Gamma}}$  для всіх обраних значень частоти. Побудувати графіки АЧХ  $|K_U|(f)$ , за якими визначити граничні частоти  $f_{н\text{ гр}}$  та  $f_{в\text{ гр}}$  та діапазон робочих частот  $\Delta f_{\text{ гр}}$  для всіх досліджуваних схем. Всі графіки слід побудувати в одній площині.

2.3.2.2 За експериментальними даними табл. 2.4, табл. 2.7, табл. 2.10 та за формулами (2.1 – 2.8) розрахувати параметри каскадів підсилення у статичному режимі. Дані розрахунків записати до табл.2.13.

Таблиця 2.13 — Розрахунок параметрів каскадів у статичному режимі

	СЕ	СК	СБ
$I_{0K}$	$I_{0K} = \frac{E_K - (U_{0KE} + U_{0E})}{R5}$ (2.1)	$I_{0K} = I_{0E} - I_{0Б}$	(2.1)
$I_{0E}$	$I_{0E} = \frac{U_{0E}}{R6}$ (2.2)	(2.2)	(2.2)
$I_{0Б}$	$I_{0Б} = I_{0E} - I_{0K}$ (2.3)	$I_{0Б} = \frac{E_K - U_{0R4}}{R3} - \frac{U_{0R4}}{R4}$	(2.3)
$I_{Д}$	$I_{Д} = \frac{E_K}{R3 + R4}$ (2.4)	(2.4)	(2.4)
$h_{21E}$	$h_{21E} = \beta = \frac{I_{0K}}{I_{0Б}}$	$h_{21E} = \beta = \frac{I_{0K}}{I_{0Б}}$	-
$h_{11E}$	-	$h_{11E} = r_{Б} + r_{E}(1 + h_{21E})$	-
$h_{21Б}$	-	-	$h_{21Б} = \alpha = \frac{I_{0K}}{I_{0E}} = \frac{\beta}{1 + \beta}$
$P_0$	$P_0 = E_K(I_{0E} + I_{Д})$ (2.5)	(2.5)	(2.5)

2.3.2.3 За експериментальними даними табл. 2.5, табл. 2.8, табл. 2.11 розрахувати параметри каскадів підсилення у динамічному режимі. Дані розрахунків записати до табл.2.14.

### 2.3.3 Теоретичні розрахунки

Розрахувати теоретичні значення параметрів підсилювальних каскадів (табл.2.1). Отримані дані записати до табл.2.15, аналогічній до табл.2.1. Порівняти результати розрахунків з табл.2.14 та табл.2.15.

Таблиця 2.14 — Розрахунок параметрів каскадів у динамічному режимі за результатами вимірювань

	СЕ		СК		СБ	
$R_H, \text{ Ом}$	$R_{H1} = R8$	$R_{H2} = R7$	$R_{H1} = R7$	$R_{H2} = R8$	$R_{H1} = R8$	$R_{H2} = R7$
$I_{\text{ex}}$	$I_{\text{ex}} = \frac{E_{\Gamma} - U_{\text{ex}}}{R1}$ (2.9)	(2.9)	(2.9)	(2.9)	$I_{\text{ex}} = \frac{E_{\Gamma} - U_{\text{ex}}}{R2}$ (2.10)	(2.10)
$I_{\text{вих}}$	$I_{\text{вих}} = \frac{U_{\text{вих}}}{R_H}$ (2.11)	(2.11)	(2.11)	(2.11)	(2.11)	(2.11)
$R_{\text{ex}}$	$R_{\text{ex}} = \frac{U_{\text{ex}}}{I_{\text{ex}}}$ (2.12)	(2.12)	(2.12)	(2.12)	(2.12)	(2.12)
$R_{\text{вих}}$	$R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вих}}} = \frac{U_{\text{вих}R_{H1}} - U_{\text{вих}R_{H2}}}{U_{\text{вих}R_{H2}}/R_{H2} - U_{\text{вих}R_{H1}}/R_{H1}}$ (2.13)		(2.13)		(2.13)	
$K_U$	$K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{ex}}}$ (2.14)	(2.14)	(2.14)	(2.14)	(2.14)	(2.14)
$K_I$	$K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{ex}}}$ (2.15)	(2.15)	(2.15)	(2.15)	(2.15)	(2.15)
$K_P$	$K_P = K_U \cdot K_I$ (2.16)	(2.16)	(2.16)	(2.16)	(2.16)	(2.16)
$P_{\approx}$	$P_{\approx} = \frac{U_{\text{вих max}}^2}{R_H}$ (2.17)	(2.17)	(2.17)	(2.17)	(2.17)	(2.17)
$\eta$	$\eta = \frac{P_{\approx}}{P_0} \cdot 100\%$ (2.18)	(2.18)	(2.18)	(2.18)	(2.18)	(2.18)

## 2.4 Зміст звіту

У звіті наводяться:

- назва роботи;
- мета роботи;
- результати вимірювань, схеми, таблиці, графіки, розрахунки;
- висновки з порівняльним аналізом даних.

## 2.5 Контрольні запитання та завдання

1. Поясніть призначення елементів у підсилюючих каскадах СЕ, СК, СБ.
2. Як положення робочої точки впливає на параметри каскадів?
3. Як впливає величина навантаження на параметри каскадів підсилення?
4. Як здійснюється температурна стабілізація у підсилювачах?
5. Проаналізуйте частотні властивості каскадів підсилення.
6. Порівняйте вхідний опір для різних каскадів.
7. Порівняйте вихідний опір для всіх каскадів.

8. Порівняйте коефіцієнти підсилення струмів та напруг для різних каскадів.
9. Порівняйте амплітудно-частотні характеристики різних каскадів.
10. У яких випадках застосовується схема включення транзистора зі СК?
11. У яких випадках застосовується схема включення транзистора зі СЕ?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОКАСКАДНОГО ПІДСИЛЮВАЧА НАПРУГИ ІЗ ЗВОТНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

3.1 Мета роботи: Дослідження роботи двокаскадного підсилювача з різними видами зворотного зв'язку

### 3.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи

При підготовці до виконання лабораторної роботи слід ознайомитись з основними параметрами та характеристиками двокаскадних підсилювачів напруги. Необхідно вивчити види зворотних зв'язків, проаналізувати теоретичні дані щодо впливу кіл негативного зворотного зв'язку на параметри та характеристики підсилювачів.

#### 3.2.1 Двокаскадний підсилювач напруги з ємнісним зв'язком

Транзисторний підсилювач напруги з ємнісним зв'язком, побудований на основі двох одноступінних каскадів підсилення, побудованих за схемою зі СЕ (рис.3.1).

Коефіцієнт підсилення напруги у двокаскадному підсилювачі визначається так:

$$K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \quad (3.1)$$

де  $K_{U1}$ ,  $K_{U2}$  — коефіцієнти підсилення напруги першим та другим каскадами.

#### 3.2.2 Застосування зворотних зв'язків у підсилювачах

Поряд із колами прямої передачі сигналів у підсилювачі вводять штучно створені кола, через які частина енергії з виходу подається на вхід (реалізується зворотний зв'язок). Введення зворотного зв'язку суттєво впливає на основні параметри підсилювача (вхідний та вихідний опір, коефіцієнти підсилення, амплітудну та частотні характеристики тощо).



В залежності від способу підведення вихідного сигналу у коло зворотного зв'язку розрізняють зворотній зв'язок за **напругою** та за **струмом**. Застосування зворотного зв'язку за **напругою** зменшує вихідний опір підсилювача. Підсилювач наближується до ідеального джерела ЕРС, а рівень вихідного сигналу мало залежить від величини опору навантаження. Натомість зворотний зв'язок за **струмом** збільшує вихідний опір підсилювача, який за властивостями наближається до ідеального джерела струму, що дозволяє стабілізувати струм у навантаженні.

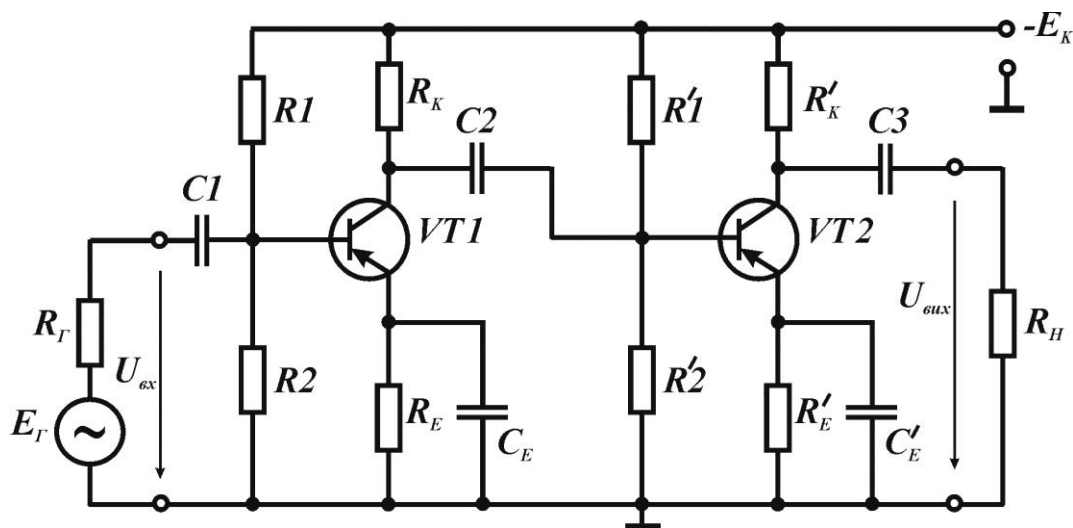


Рисунок 3.1 - Двокаскадний підсилювач напруги з емнісним зв'язком

В залежності від способу подачі сигналу зворотного зв'язку у вхідне коло розрізняють **паралельний** та **послідовний** зворотний зв'язок. Застосування **послідовного** зворотного зв'язку збільшує вхідний опір підсилювача, натомість **паралельний** зворотний зв'язок значно зменшує вхідний опір підсилювача.

Цілеспрямоване коригування вхідного або вихідного опору підсилювача дозволяє реалізовувати підсилювачі з дуже малими або навпаки дуже великими опорами на вході або виході, що дозволяє покращити умови узгодження каскадів між собою, або підсилювача та навантаження.

Коефіцієнт підсилення напруги підсилювачем, охопленого колом зворотного зв'язку, визначається так:

$$K_{U33} = \frac{K_U}{1 \pm \beta_{33} K_U} \quad , \quad (3.2)$$

де  $K_U$  — коефіцієнт підсилення напруги підсилювачем без зворотного зв'язку;

знак «-» — відповідає позитивному зворотному зв'язку (ПЗЗ);

знак «+» — відповідає негативному зворотному зв'язку (НЗЗ);

$\beta_{33} = \frac{U_{33}}{U_{вих}}$  - коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку.

Параметр глибини зворотного зв'язку  $\gamma_{33}$  визначається так:

$$\gamma_{33} = 1 + \beta_{33} K_U = \frac{K_U}{K_{U33}} . \quad (3.3)$$

З (3.2) видно, що ПЗЗ збільшує коефіцієнт підсилення підсилювача, проте за умови  $\beta_{33} K_U > 1$  виникає самозбудження підсилювача (генерація).

Введення частотно-незалежного негативного зворотного зв'язку покращує частотну характеристику підсилювача, розширює полосу пропускання сигналу, зменшує частотні спотворення сигналу. Проте негативний зворотній зв'язок зменшує коефіцієнт підсилення та змінює амплітудну характеристику підсилювача. До переваг негативного зворотного зв'язку слід віднести зниження рівня шумів та завад, зменшення нелінійних спотворень, розширення динамічного діапазону вхідних напруг.

У підсилювачах застосовують як місцеві, так і міжкаскадні ЗЗ.

Застосування **місцевого паралельного** зворотного зв'язку за напругою (подача сигналу зворотного зв'язку від колектора на базу того ж транзистора через резистор  $R_{33}$ ) призводить до суттєвого зменшення як вхідного, так і вихідного опорів каскаду зі СЕ. Значно обмежується і коефіцієнт підсилення напруги. Невеликий вхідний опір погіршує частотні властивості підсилювача у діапазоні нижніх частот або змушує застосовувати більші перехідні ємності.

Застосування **місцевого послідовного** зворотного зв'язку за струмом (послідовне включення додаткового опору  $R_{33}$  у коло емітера) дозволяє значно збільшити вхідний опір підсилювача порівняно із схемою без зворотного зв'язку. Вихідний опір підсилювача також збільшується, а коефіцієнт підсилення напруги зменшується. Збільшені величини  $R_{ВХ}$  та  $R_{ВИХ}$  у каскаді зі зворотнім зв'язком дозволяють зменшити величини розділяючих та перехідних ємностей. В області високих частот каскад з даним видом зворотного зв'язку має кращі частотні властивості порівняно зі звичайним каскадом СЕ без зворотного зв'язку.

Застосування у двокаскадному підсилювачі СЕ **послідовного міжкаскадного** зворотного зв'язку за напругою (відведення сигналу зворотного від колектора другого транзистора на емітер першого за допомогою послідовної ланки  $RC$ ) дозволяє підвищити  $R_{ВХ}$  та понизити  $R_{ВИХ}$  двокаскадного підсилювача. Міжкаскадний (загальний) зворотний зв'язок є більш вигідним порівняно із місцевим зворотним зв'язком при одному й тому ж коефіцієнті підсилення.

### 3.3 Порядок виконання роботи

Лабораторна робота включає експериментальні дослідження:

- двокаскадного підсилювача (рис.3.1) без зворотного зв'язку;
- підсилювача з місцевим паралельним зворотним зв'язком за напругою;
- підсилювача з місцевим послідовним зворотним зв'язком за струмом;
- підсилювача з послідовним міжкаскадним зворотним зв'язком за напругою.

Далі виконується обробка результатів експериментів, розрахунки параметрів підсилювача та порівняльний аналіз отриманих результатів.

### 3.3.1 Експериментальні дослідження

Експерименти виконуються із застосуванням вимірювального комплексу, до складу якого входить лабораторний макет із джерелом живлення, генератор гармонічного сигналу, осцилограф, вольтметр. Схема лабораторного макету №2 для експериментальних досліджень (рис.3.2) містить двокаскадний підсилювач СЕ, в якому передбачена можливість введення кіл внутрішнього та міжкаскадного зворотного зв'язку, а також зміни параметрів перехідних та розділяючих ємностей.

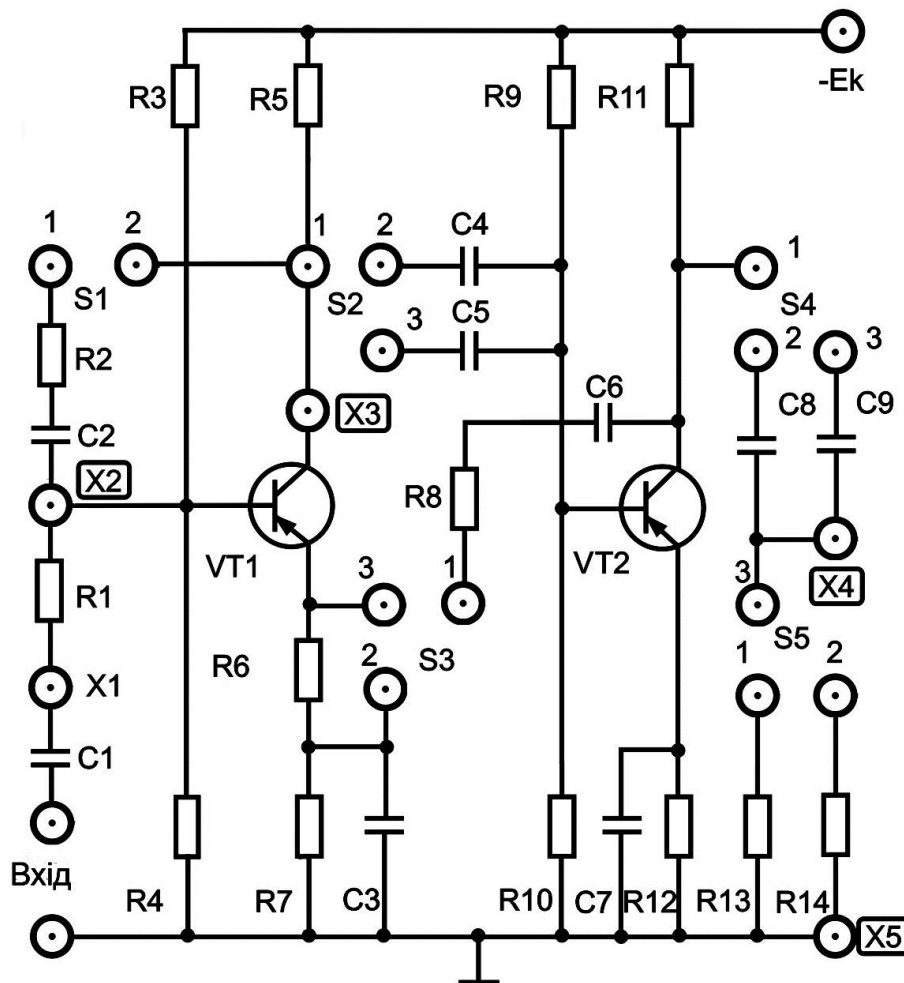


Рисунок 3.2 – Схема лабораторного макету №2

### Параметри схеми:

Напруга живлення:  $E_k = 12 \text{ В}$

$R1 = 1 \text{ кОм}; R2 = 5,6 \text{ кОм}; R3, R9 = 51 \text{ кОм}; R4 = 6,8 \div 10 \text{ кОм}; R5 = 10 \text{ кОм};$

$R6 = 200 \text{ Ом}; R7, R11 = 1,5 \text{ кОм}; R8 = 7,5 \text{ кОм}; R10 = 5,6 \div 8,2 \text{ кОм};$

$R12 = 220 \text{ Ом}; R13 = 100 \text{ Ом}; R14 = 2 \text{ кОм}; C1, C2, C3, C7 = 10 \text{ мкФ};$

$C4, C8 = 10 \text{ мкФ}; C5, C9 = 0,1 \text{ мкФ}; C6 = 47 \text{ мкФ}$

Резистор  $R1$  застосовується для експериментального визначення вхідного струму. Резистори  $R3, R4, R9, R10$  утворюють кола зміщення (дільники напруги) і разом з резисторами  $R5, R11$  у колах колекторів та  $R7, R12$  у колах емітерів  $VT2$  та  $VT1$  забезпечують режим роботи каскадів за постійним струмом (статичний режим). Резистори  $R13, R14$  застосовуються як опори навантаження на виході підсилювача. Конденсатори  $C1, C8, C9$  та  $C4, C5$  є розділяючими, а  $C3, C7$  входять до кіл емітерної термостабілізації  $VT1, VT2$ .

У схемі застосовуються комутатори:

$S1 \rightarrow$  у положенні 1–2 для підключення кола **місцевого негативного зворотного зв'язку за напругою** (підключення ділянки  $R2, C2$  між колектором та базою транзистора  $VT1$ );

$S2 \rightarrow$  1–3,  $S4 \rightarrow$  1–3, для заміни пари ємностей  $C4$  та  $C8$  (1–2) на пару  $C5$  та  $C9$  (1–3);  $S3 \rightarrow$  видалення перемички 2–3 для введення **місцевого негативного зворотного зв'язку за струмом** (включення опору  $R6$  у коло емітера  $VT1$ ) та **міжкаскадного негативного зворотного зв'язку** встановленням  $S3 \rightarrow$  1–3 (підключення ділянки  $R8, C6$  від колектора  $VT2$  на емітер  $VT1$ );

$S5 \rightarrow$  3–2 для підключення навантаження  $R14$ , або  $S5 \rightarrow$  3–1 для підключення навантаження  $R13$ .

Генератор гармонічного сигналу застосовується для подачі напруги на вхід підсилювача при дослідженні його параметрів за змінним струмом. Зміна частоти генерації сигналу дозволяє отримати АЧХ підсилювача. Осцилограф застосовується для візуального контролю форми сигналу вихідної напруги. Вольтметр застосовується для вимірювання змінної напруги.

#### 3.3.1.1 Визначення параметрів підсилювача в динамічному режимі

Визначення параметрів двокаскадного підсилювача без зворотних зв'язків. Зібрати схему двокаскадного підсилювача без зворотних зв'язків (рис. 3.1). Для цього у комутаторах  $S2, S4$  з'єднати перемичками контакти 1–2, створивши шлях для передачі сигналу до навантаження. На комутаторі  $S3$  з'єднати контакти 3–2, при цьому в емітерному колі транзистора  $VT1$  буде включений ланцюжок термостабілізації  $R7 - C3$ . Підключити навантаження  $R14$  (коммутатор  $S5$  у положенні 3–2). Після перевірки схеми включити живлення макету.

На вхід підсилювача подати напругу  $E_{\Gamma}$  від генератора гармонічного сигналу. Частоту сигналу встановити  $f_{CP} = 5$  кГц. Вольтметр включити в режим вимірювання змінної напруги. Осцилограф підключити паралельно опору навантаження (точки X4– X5). Спостерігати форму вихідного сигналу. Регулюючи амплітуду вхідного сигналу  $E_{\Gamma}$ , досягти появи амплітудних обмежень (спотворень синусоїди). Потім зменшуючи рівень вхідного сигналу, зафіксувати при якому його значенні зникнуть спотворення на виході підсилювача. Заміряти цю величину максимально допустимої напруги  $E_{\Gamma max}$  (точки X1– X5), після чого зменшити її у 2–3 рази, встановлене робоче значення  $E_{\Gamma}$  записати до табл. 3.1. Виміряти величини: вхідної напруги підсилювача  $U_{BX}$  (точки X2– X5), напруги  $U_{K1}$  на колекторі VT1 (точки X3– X5) та напруги на навантаженні  $U_{ВИХ}$  (точки X4– X5). Вимірювання повторити при навантаженні R13 (S5 у положенні 3→1). Результати експерименту записати до табл.3.1 (графу «Без негативного зворотного зв'язку»).

**Визначення параметрів двокаскадного підсилювача з місцевим негативним зворотним зв'язком за напругою.** Ввести місцевий негативний зворотний зв'язок за напругою (у комутаторі S1 з'єднати перемичкою контакти 1–2). Підключити навантаження R14 (у комутаторі S5 слід встановити перемичку у положення 3–2). За умови відсутності спотворень сигналу на виході підсилювача повторити вимірювання допустимої напруги  $E_{\Gamma}$  (точки X1 – X5), вхідної напруги підсилювача  $U_{BX}$  (точки X2 – X5), напруги  $U_{K1}$  на колекторі VT1 (точки X3 – X5) та напруги на навантаженні  $U_{ВИХ}$  (точки X4 – X5). Вимірювання повторити при навантаженні R13 (у комутаторі S5 перемичка у положенні 3–1). Результати експерименту записати до табл. 3.1 (графу «Місцевий негативний зворотний зв'язок за напругою»).

Таблиця 3.1 - Результати вимірювань у динамічному режимі,  $f_{CP} = 5$  кГц

Тип підсилювача	$R_H, \text{ Ом}$	$E_{\Gamma}, \text{ В}$	$U_{BX}, \text{ В}$	$U_{K1}, \text{ В}$	$U_{ВИХ}, \text{ В}$
Без негативного зворотного зв'язку	$R_{H1} = R14 = 2000 \text{ Ом}$				
	$R_{H2} = R13 = 100 \text{ Ом}$				
Місцевий негативний зворотний зв'язок за напругою	$R_{H1} = R14 = 2000 \text{ Ом}$				
	$R_{H2} = R13 = 100 \text{ Ом}$				
Місцевий негативний зворотний зв'язок за струмом	$R_{H1} = R14 = 2000 \text{ Ом}$				
	$R_{H2} = R13 = 100 \text{ Ом}$				
Міжкаскадний негативний зворотний зв'язок за напругою	$R_{H1} = R14 = 2000 \text{ Ом}$				
	$R_{H2} = R13 = 100 \text{ Ом}$				

Визначення параметрів двокаскадного підсилювача з місцевим негативним зворотним зв'язком за струмом. Ввести місцевий негативний зворотний зв'язок за струмом (у комутаторі  $S1$  зняти перемичку з контактів 1–2, у комутаторі  $S3$  зняти перемичку з контактів 3–2). Підключити навантаження  $R14$  (у комутаторі  $S5$  встановити перемичку у положення 3–2). За умови відсутності спотворень сигналу на виході підсилювача повторити вимірювання допустимої напруги  $E_T$  (точки  $X1 - X5$ ), вхідної напруги підсилювача  $U_{ВХ}$  (точки  $X2 - X5$ ), напруги  $U_{K1}$  на колекторі  $VT1$  (точки  $X3 - X5$ ) та напруги на навантаженні  $U_{ВИХ}$  (точки  $X4 - X5$ ). Вимірювання повторити при навантаженні  $R13$  (у комутаторі  $S5$  встановити перемичку у положення 3–1). Результати експерименту записати до табл. 3.1 (графіа «Місцевий негативний зворотний зв'язок за струмом»).

**Визначення параметрів двокаскадного підсилювача з міжкаскадним негативним зворотним зв'язком за напругою.** Ввести міжкаскадний негативний зворотний зв'язок за напругою (у комутаторі  $S3$  встановити перемичку у положення 3–1). Підключити навантаження  $R14$  (у комутаторі  $S5$  перемичку встановити у положення 3–2). За умови відсутності спотворень сигналу на виході підсилювача повторити вимірювання допустимої напруги  $E_T$  (точки  $X1 - X5$ ), вхідної напруги підсилювача  $U_{ВХ}$  (точки  $X2 - X5$ ), напруги  $U_{K1}$  на колекторі  $VT1$  (точки  $X3 - X5$ ) та напруги на навантаженні  $U_{ВИХ}$  (точки  $X4 - X5$ ). Вимірювання повторити при навантаженні  $R13$  (у комутаторі  $S5$  встановити перемичку у положенні 3–1). Результати експерименту записати до табл. 3.1 (графіа «Міжкаскадний негативний зворотний зв'язок за напругою»).

### 3.3.1.2 Дослідження амплітудної характеристики підсилювача

Амплітудна характеристика підсилювача дає можливість визначити динамічний діапазон вхідної напруги, при якому підсилювач працюватиме у лінійному режимі. Введення негативного зворотного зв'язку дозволяє збільшити динамічний діапазон підсилювача ціною зменшення підсилення напруги.

Дослідити амплітудну характеристику підсилювача без зворотного зв'язку при  $R_{H1} = R14$ ,  $f_{CP} = 5$  кГц. Подати сигнал на вхід підсилювача та, збільшуючи його, зафіксувати за осцилограмою гранично допустимий рівень вхідного сигналу, при якому вже помітні амплітудні спотворення вихідної напруги. Заміряти відповідну величину вхідної напруги  $U_{ВХ}$  (точки  $X2 - X5$ ) та напругу на навантаженні  $U_{ВИХ}$  (точки  $X4 - X5$ ). Результати записати до табл. 3.2 (графіа «Без зворотного зв'язку»). Далі поступово зменшувати значення  $U_{ВХ}$  та кожного разу заміряти  $U_{ВИХ}$ . Значення вхідної напруги  $U_{ВХ}$ , задавати самостійно, досягши наприкінці досліду  $U_{ВХ}=0$ .

За цією ж методикою повторити дослідження амплітудної характеристики для підсилювача з міжкаскадним негативним зворотним зв'язком за напругою. Результати записати до табл. 3.2 (графіа «Міжкаскадний негативний зворотний зв'язок»). Побудувати графіки амплітудних характеристик  $U_{ВИХ} = f(U_{ВХ})$ .

3.3.1.2 Дослідження амплітудно-частотних характеристик підсилювача  
 Дослідження АЧХ спочатку проводиться для підсилювача без зворотного зв'язку. На прикладі цього підсилювача досліджується вплив розділяючих конденсаторів на АЧХ, для чого характеристика знімається двічі, при попарно ввімкнутих конденсаторах  $C4$  та  $C8$ , потім при  $C5$  та  $C9$  (у комутаторах  $S2$  та  $S4$  спочатку встановити перемички у положення 1–2, а потім у положення 1–3).

Таблиця 3.2 - Результати дослідження амплітудних характеристик підсилювача

Схема	Результати вимірювань								
	Без зворотного зв'язку	$U_{ВХ}, В$	0						
$U_{ВИХ}, В$		0							Нелін.сп.
Міжкаск. негативний зворотний зв'язок	$U_{ВХ}, В$	0							
	$U_{ВИХ}, В$	0							Нелін.сп.

Задати  $E_{Г}$  відповідно до табл. 3.1 при  $R_{Н1} = R14$ ,  $f_{СР} = 5$  кГц. Змінюючи частоту вхідного сигналу, зняти АЧХ каскаду. Отримані значення частот та  $U_{ВИХ}$  записати до табл. 3.3 (графа «Без зворотного зв'язку»). Визначити коефіцієнти підсилення за напругою  $K_U = \frac{U_{ВИХ}}{E_{Г}}$ . Побудувати графіки АЧХ  $K_U(f)$ , за якими визначити граничні частоти  $f_{НГР}$  та  $f_{ВГР}$  для обох дослідів та виявити вплив розділяючих ємностей на АЧХ.

Повторити дослід для підсилювача з міжкаскадним негативним зворотним зв'язком (тільки для пари конденсаторів  $C4$  та  $C8$ ). Задати  $E_{Г}$  відповідно до табл. 3.1 при  $R_{Н1} = R14$ ,  $f_{СР} = 5$  кГц. Отримані значення частот та  $U_{ВИХ}$  записати до табл. 3.3 (графа «Міжкаскадний негативний зворотний зв'язок»). Визначити  $K_U = \frac{U_{ВИХ}}{E_{Г}}$ .

Таблиця 3.3 - Результати вимірювань АЧХ при  $E_{Г} = const$

Схема	Ємн.	$f, кГц$					5			
Без зворотного зв'язку	C4 C8	$U_{ВИХ}, В$								
		$K_U$								
	C5 C9	$U_{ВИХ}, В$								
		$K_U$								
Міжкаск. негативний зворотний зв'язок	C4 C8	$U_{ВИХ}, В$								
		$K_U$								

Побудувати на одній координатній площині графіки АЧХ  $K_U(f)$  для підсилювача без зворотного зв'язку та з міжкаскадним негативним зворотним зв'язком, за якими визначити граничні частоти  $f_{НГР}$  та  $f_{ВГР}$  для обох дослідів. Проаналізувати вплив введеного негативного зворотного зв'язку на частотні характеристики двокаскадного підсилювача.

### 3.3.2 Розрахунок параметрів каскадів за даними експериментів

За даними табл. 3.1 розрахувати параметри підсилювача у динамічному режимі. Дані розрахунків записати до табл. 3.4. Коефіцієнт підсилення напруги першим каскадом визначити як:

$$K_{U1} = \frac{U_{K1}}{U_{ВХ}}. \quad (3.4)$$

Таблиця 3.4 – Параметри підсилювача у динамічному режимі,  $f_{CP} = 5 \text{ кГц}$

Підсилювач	$R_H, \text{ Ом}$	$I_{ВХ}$	$I_{ВИХ}$	$R_{ВХ}$	$R_{ВИХ}$	$K_{U1}$	$K_U$	$\gamma_{33}$
Без НЗЗ	$R_{H1} = R14$	(2.9)	(2.11)	(2.12)	(2.13)	(3.4)	(2.14)	(3.3)
	$R_{H2} = R13$							
Місцевий НЗЗ за напругою	$R_{H1} = R14$							
	$R_{H2} = R13$							
Місцевий НЗЗ за струмом	$R_{H1} = R14$							
	$R_{H2} = R13$							
Міжкаскадний НЗЗ за напр.	$R_{H1} = R14$							
	$R_{H2} = R13$							

### 3.4 Зміст звіту

У звіті наводяться:

- назва роботи;
- мета роботи;
- тексти завдань, схеми, таблиці, графіки, розрахунки;
- висновки з порівняльним аналізом даних.

### 3.5 Контрольні запитання та завдання

1. Назвіть варіанти введення зворотних зв'язків у підсилювачах.
2. Як впливають кола зворотного зв'язку на параметри та характеристики підсилювача?
3. Якими параметрами характеризується коло зворотного зв'язку?



4. Як величина опору навантаження впливає на параметри підсилювача?

5. Як впливає зворотний зв'язок на амплітудну характеристику?

6. Який вплив ЗЗ на АЧХ підсилювача?

7. Як впливає зворотний зв'язок на стабільність параметрів підсилювача?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АНАЛОГОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ОПЕРАЦІЙНОМУ ПІДСИЛЮВАЧІ

### 4.1 Мета роботи

Вивчення роботи аналогових пристроїв з використанням операційного підсилювача

### 4.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи

4.2.1 Операційні підсилювачі (ОП) створюються на основі диференціальних каскадів підсилювачів постійного струму, вони мають два входи — прямий та інверсний та один несиметричний вихід. Зазвичай ОП використовуються із зворотним зв'язком. Саме різні види зворотних зв'язків надають можливість створити аналогові пристрої для виконання деяких математичних операцій: додавання, віднімання, інтегрування, диференціювання, логарифмування. Точність виконання цих операцій становить 0,1%. Слід зазначити, що ідеальний ОП має коефіцієнт підсилення напруги  $K_U \rightarrow \infty$ ,  $R_{ВХ} \rightarrow \infty$ ,  $R_{ВИХ} \rightarrow 0$ .

#### 4.2.1.1 Інвертуючий підсилювач

Інвертуючий підсилювач (рис. 4.1) дозволяє підсилювати сигнали.

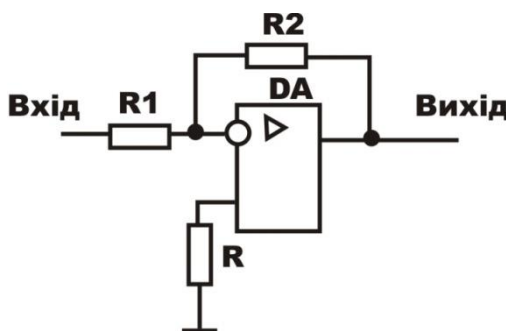


Рисунок 4.1 — Інвертуючий підсилювач

Коефіцієнт підсилення напруги визначається так:

$$K_{\text{інв}} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (4.1)$$

де  $R1$  — опір вхідного кола;

$R2$  — опір у колі зворотного зв'язку.

Знак « $\rightarrow$ » у виразі (4.1) вказує, що фаза вихідного сигналу змінюється на  $180^\circ$  порівняно з вхідним сигналом.

Підсилювачі такого типу (див. рис. 4.1) називають масштабними підсилювачами.

#### 4.2.1.2 Неінвертуючий підсилювач

Підсилювач, поданий на рис. 4.2, дозволяє підсилювати сигнали без зміни фази, він називається неінвертуючий підсилювач. Його коефіцієнт підсилення напруги визначається так:

$$K_{\text{неінв}} = 1 + \frac{R2}{R1} . \quad (4.2)$$

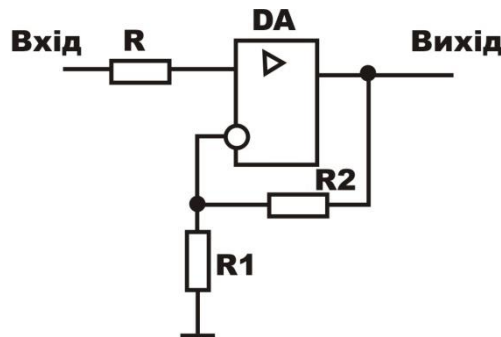


Рисунок 4.2 — Неінвертуючий підсилювач

У цих обох схемах включення операційного підсилювача (рис. 4.1, 4.2) опір  $R$  виконує роль початкового зміщення напруги. Чисельно вхідна напруга зсуву визначається як напруга, яку необхідно прикласти до входу підсилювача, щоб його вихідна напруга була рівною нулю.

При побудові різного типу схем перевагу віддають інвертуючому підсилювачу.

Неінвертуючий підсилювач іноді використовують як повторювач (або буфер), це коли у виразі (4.2)  $R1 \gg R2$ , то  $K_{\text{неінв}} = \sim 1$ . Такий підсилювач має великий вхідний опір і малий вихідний.

#### 4.2.1.3 Інвертуючий суматор

Схема включення операційного підсилювача для отримання алгебраїчної суми кількох вхідних сигналів подана на рис. 4.3. При рівності опорів  $R1 = R1' = R2$  на виході отримуємо сумарний проінвертований сигнал без підсилення. Для правильного додавання сигналів завжди має виконуватись умова  $R1 = R1'$ , тоді

$$U_{\text{вих}} = -(U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}}). \quad (4.3)$$

Якщо  $R1 = R1' \neq R2$ , то отримаємо сигнал з підсиленням відповідно до виразу (4.1).

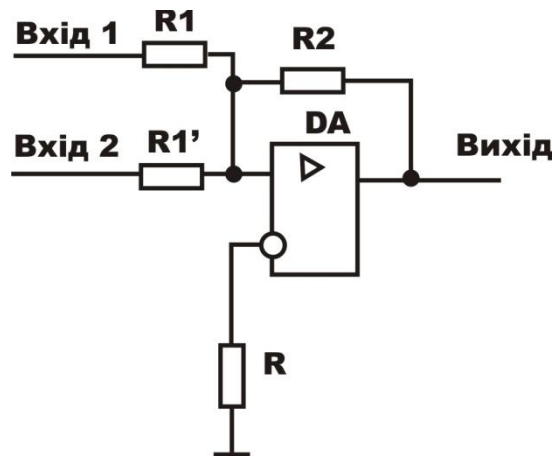


Рисунок 4.3 — Схема включення операційного підсилювача для додавання напруг

#### 4.2.1.4 Неінвертуючий «віднімач» напруги

Для отримання різниці двох вхідних напруг використовується схема подана на рис. 4.4.

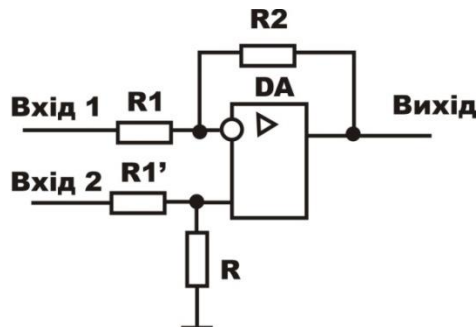


Рисунок 4.4 — Схема включення операційного підсилювача для віднімання напруг

При рівності опорів  $R1 = R1' = R2$  на виході отримаємо різницю вхідних сигналів без підсилення:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}. \quad (4.4)$$

#### 4.2.1.5 Інтегратор на операційному підсилювачі

Якщо у коло зворотного зв'язку замість опору  $R2$  підключити ємність, то матимемо пристрій для інтегрування вхідної напруги. Схема інтегратора на операційному підсилювачі подана на рис. 4.5.

Напруга на виході такого пристрою визначається так:

$$u_{\text{вих}} = -\frac{1}{R_1 \cdot C} \int_0^t u_{\text{вх}} dt . \quad (4.5)$$

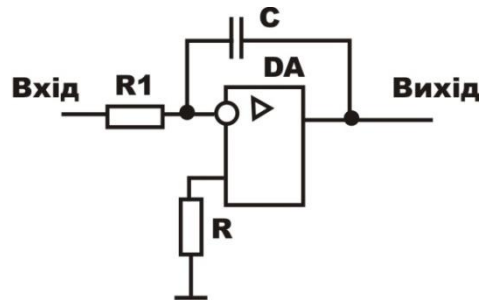


Рисунок 4.5 — Схема інтегратора з операційним підсилювачем

#### 4.2.1.6 Диференціатор на операційному підсилювачі

При використанні ємності у вхідному колі і опору у вихідному колі отримаємо диференціатор з операційним підсилювачем (рис. 4.6).

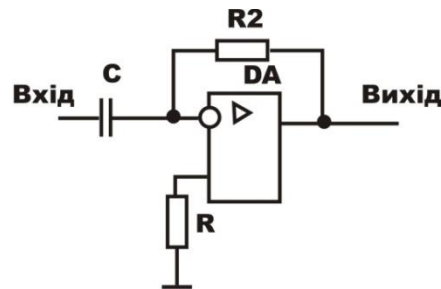


Рисунок 4.6 — Схема диференціатора з операційним підсилювачем

Напруга на виході такого пристрою визначається так:

$$u_{\text{вих}} = -R_2 \cdot C \frac{du_{\text{вх}}}{dt} . \quad (4.6)$$

#### 4.2.1.7 Логарифмічний підсилювач

На основі операційного підсилювача можна побудувати логарифмічний підсилювач. Якщо як опір зворотного зв'язку використати діод, то отримаємо логарифмічний підсилювач (рис. 4.7).

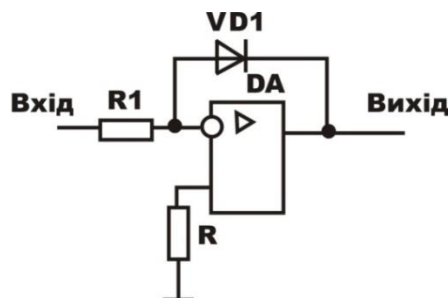


Рисунок 4.7 — Схема логарифмічного підсилювача

Логарифмічні підсилювачі формують на виході напругу тільки однієї полярності, яка визначається так:

$$U_{\text{вих}} = -k \cdot \ln \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}, \quad (4.7)$$

де  $k$  — коефіцієнт, що характеризує температурний потенціал р-п переходу.

### 4.3 Порядок виконання роботи

Лабораторний макет (рис. 4.8) дозволяє скласти та досліджувати різні типи пристроїв з використанням операційного підсилювача.

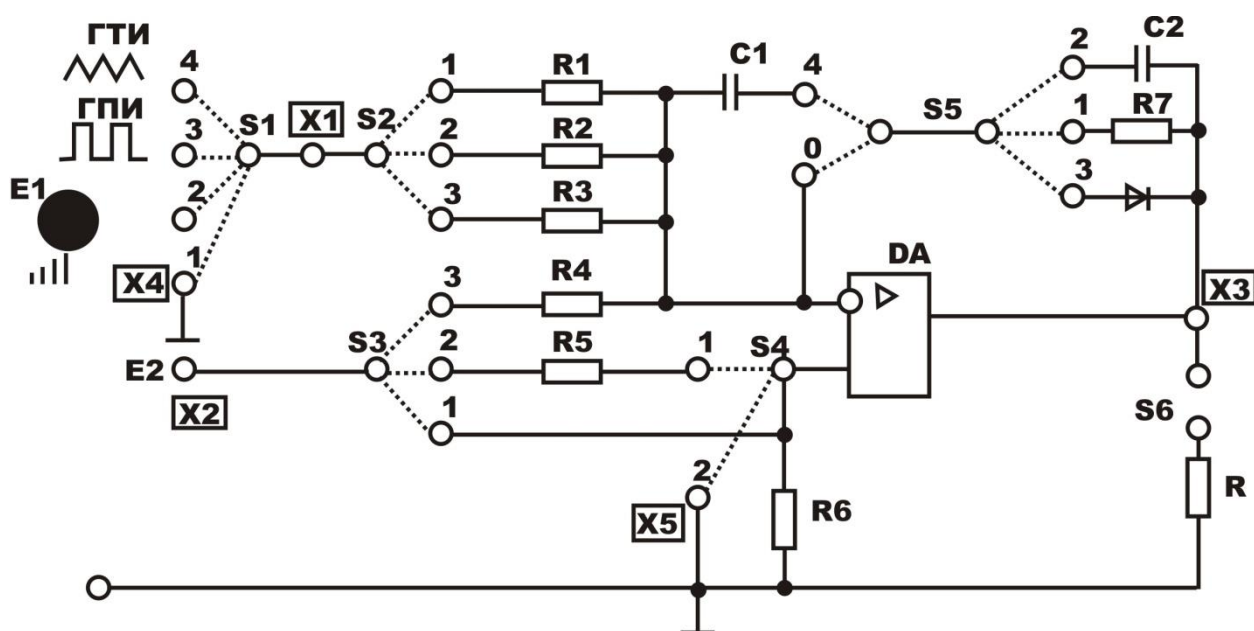


Рисунок 4.8 — Вид лабораторного макету для дослідження роботи пристроїв на операційному підсилювачі

Параметри елементів, які використані у макеті (див. рис. 4.8) такі:

$R_1 = 200 \text{ кОм};$

$R_2 = 100 \text{ кОм};$

$R_3 = 10 \text{ кОм};$

$R_4 = 100 \text{ кОм};$

$R_5 = 100 \text{ кОм};$

$R_6 = 100 \text{ кОм};$

$R_7 = 100 \text{ кОм}$ , опір у колі зворотного зв'язку;

$R = 2 \text{ кОм};$

$C_1 = C_2 = 0,1 \text{ мкФ};$

$E_1$  — джерело постійної напруги, яку можна змінювати, як за амплітудою, так і за полярністю;

Е2 – джерело сталої постійної напруги;  
 ГТИ – генератор трикутно-подібної напруги;  
 ГПИ – генератор прямокутних імпульсів;  
 S1, S2, S3, S4, S5, S6 – перемикачі, які дозволяють створювати різні схеми;

X1, X2, X3, X4, X5 – гнізда для підключення вимірювальних приладів.

При проведенні вимірювань загальний провід вимірювальних приладів підключати до гнізда X5.

#### 4.3.1 Дослідження роботи масштабного підсилювача, що інвертує сигнал, з різними коефіцієнтами передачі

4.3.1.1 Зібрати схему масштабного підсилювача, що інвертує сигнал. Для цього слід встановити в перемикачах такі перемички: S1→2 (буде підключено джерело Е1 до входу досліджуваного пристрою); S2→1 (буде підключено опір R1 у вхідне коло); S5→0 (формування кола негативного зворотного зв'язку), а з другого кінця S5→1 (завершення формування кола негативного зворотного зв'язку).

4.3.1.2 Включити живлення схеми.

4.3.1.3 Провести вимірювання амплітудної характеристики пристрою  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$  для вхідного опору R1.  $U_{\text{вх}}$  – отримують зміною напруги Е1 і вимірюють у точках X1–X4,  $U_{\text{вих}}$  вимірюють у точках X3 – X4, виміри проводять вольтметром. Вхідну напругу змінювати від +Е1 до –Е1. Звернути увагу на знаки вхідної та вихідної напруг.

Результати вимірювань занести до таблиці 4.1 (другий рядок).

Таблиця 4.1 — Результати вимірювань амплітудної характеристики для різних значень вхідного опору

$U_{\text{вх}}, \text{В}$		-1,35	-1,2	-1,0	-0,8	-0,5	-0,25	0	+0,25	+0,5	+0,8	+1,0	+1,2	+1,35
$U_{\text{вих}}$ В	R1= 200 к													
	R2= 100 к													
	R3= 10 к													

4.3.1.4 Провести вимірювання амплітудної характеристики пристрою  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$  для вхідного опору R2. Вимірювання проводити аналогічно п. 4.3.1.3, результати вимірювань занести до таблиці 4.1 (третій рядок).

4.3.1.5 Провести вимірювання амплітудної характеристики пристрою  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$  для вхідного опору R3. Вимірювання проводити аналогічно п. 4.3.1.3, результати вимірювань занести до таблиці 4.1 (четвертий рядок).

4.3.1.6 Вивчити вплив опору навантаження R на коефіцієнт підсилення, для цього встановити перемичку S2→2, а також встановити перемичку у

перемикачі S6. Аналогічно п. 4.3.1.3 провести вимірювання вхідної та вихідної напруги, порівняти дані отримані у п. 4.3.1.4.

4.3.1.7 Виключити живлення макету.

4.3.1.8 За (4.1) розрахувати теоретичний та реальний (за даними табл. 4.1) коефіцієнт підсилення масштабного підсилювача. Врахувати, що у макеті опір зворотного зв'язку це опір R7, вхідний опір – це опори R1, R2, R3.

4.3.1.9 За даними табл. 4.1 побудувати графіки.

4.3.2 Дослідження роботи підсилювача, який не інвертує сигнал

4.3.2.1 Підсилювач, який не інвертує сигнал, реалізують на макеті (рис. 4.8) відповідно до рис. 4.2. Для цього на макеті встановлюють перемички у такі положення: S1→1, S2→1, S3→1, з однієї сторони S5→0, а з другої сторони S5→1, перемички S4, S6 – видалити. Вхідний сигнал на вхід операційного підсилювача, який не інвертує подається від джерела E2.

4.3.2.2 Включити живлення макету.

4.3.2.3 Виміряти вхідну напругу  $U_{вх2}$  від джерела E2 (контакти X2–X5). Для різних значень опору (R1, R2, R3), змінюючи положення перемичок у перемикачі S2, провести вимірювання  $U_{вих}$  (контакти X3–X5), виміряні значення занести до табл. 4.2 (перші три стовпчика). Звернути увагу на знаки вхідної та вихідної напруг.

Таблиця 4.2 — Результати вимірювань  $U_{вих}$  для підсилювача, який не інвертує сигнал, при  $U_{вх} = E2 = const$  та розрахунку коефіцієнтів підсилення

	R1	R2	R3	$R = \infty$
$U_{вих}$				
$K_U$ за дослідом				
$K_U$ за (4.2)				

4.3.2.4 Виміряти значення вихідної напруги при відключеному опорі у вхідному колі. Для цього у перемикачі S2 видалити всі перемички. Результати вимірювань занести у четвертий стовпчик табл. 4.2.

4.3.2.5 Виключити живлення макету.

4.3.2.6 Провести розрахунки коефіцієнтів підсилення за даними табл. 4.2, результати занести до третього та четвертого рядків цієї таблиці.

4.3.3 Дослідження роботи операційного підсилювача при додаванні напруг

4.3.3.1 Пристрій на операційному підсилювачі для додавання напруг реалізується на макеті (див. рис. 4.8) відповідно до рис. 4.3. Роль опору зворотного зв'язку виконує опір R7. Вхідна напруга  $U_{вх1}$  подається від

джерела E1 через опір R2, друга вхідна напруга  $U_{\text{вх}2}$  подається від джерела E2 через опір R4, тобто на макеті у перемикачах слід встановити такі перемички: S1→2, S2→2, S3→3, з однієї сторони S5→0, з другої сторони S5→1, перемички у перемикачах S4 та S6 видалені.

4.3.3.2 Включити живлення макету.

4.3.3.3 Провести вимірювання вхідних  $U_{\text{вх}1}$  (контакти X1–X5) та вихідних  $U_{\text{вих}}$  (контакти X3–X5) напруг для декількох значень  $U_{\text{вх}1}$ , при цьому  $U_{\text{вх}2}$  є сталою величиною, яка була виміряна у п. 4.3.2.3, результати вимірювань занести до табл. 4.3. Значення напруги  $U_{\text{вх}1}$  має набувати як додатних так і від’ємних значень. Визначити значення  $U_{\text{вх}1}$ , коли  $U_{\text{вих}} = 0$ . Виміряні значення занести до табл. 4.3.

4.3.3.4 Виключити живлення макету.

4.3.3.5 Після проведення вимірювань провести теоретичний розрахунок  $U_{\text{вих}}$  за (4.3), результати також занести до табл. 4.3. Порівняти отримані результати.

Таблиця 4.3 — Результати вимірювань при додаванні напруг за дослідом та за теоретичним розрахунком,  $U_{\text{вх}2} = \text{const}$

$U_{\text{вх}1}$									
$U_{\text{вих}}$ за дослідом									
$U_{\text{вих}}$ за (4.3)									

4.3.4 Дослідження роботи операційного підсилювача при відніманні напруг

4.3.4.1 Пристрій на операційному підсилювачі для віднімання напруг реалізується на макеті (див. рис. 4.8) відповідно до рис. 4.4. Роль опору зворотного зв’язку виконує опір R7. Вхідна напруга  $U_{\text{вх}1}$  подається від джерела E1 через опір R2, друга вхідна напруга  $U_{\text{вх}2}$  подається від джерела E2 через опір R5, тобто на макеті у перемикачах слід встановити такі перемички: S1→2, S2→2, S3→2, S4→1, з однієї сторони S5→0, з другої сторони S5→1, перемичка у перемикачі S6 видалена.

4.3.4.2 Включити живлення макету.

4.3.4.3 Провести вимірювання вхідних  $U_{\text{вх}1}$  (контакти X1–X5) та вихідних  $U_{\text{вих}}$  (контакти X3–X5) напруг для декількох значень  $U_{\text{вх}1}$ , при цьому  $U_{\text{вх}2}$  є сталою величиною, яка була виміряна у п. 4.3.2.3, результати вимірювань занести до табл. 4.4. Значення напруги  $U_{\text{вх}1}$  має набувати як додатних так і від’ємних значень. Визначити значення  $U_{\text{вх}1}$ , коли  $U_{\text{вих}} = 0$ . Виміряні значення занести до табл. 4.4.

4.3.4.4 Виключити живлення макету.

4.3.4.5 Після проведення вимірювань провести теоретичний розрахунок  $U_{\text{вих}}$  за (4.4), результати також занести до табл. 4.4. Порівняти отримані результати.



Таблиця 4.4 — Результати вимірювань при відніманні напруг за дослідом та за теоретичним розрахунком,  $U_{\text{вх}2} = \text{const}$

$U_{\text{вх}1}$									
$U_{\text{вих}}$ за дослідом									
$U_{\text{вих}}$ за (4.4)									

#### 4.3.5 Дослідження роботи операційного підсилювача як інтегратора

4.3.5.1 Пристрій на операційному підсилювачі як інтегратор напруг реалізується на макеті (див. рис. 4.8) відповідно до рис. 4.5. У інтеграторі у коло зворотного зв'язку підключається ємність. Вхідний сигнал подається через опір  $R2$ . Як вхідний сигнал використовуються сигнали від генератора трикутно-подібної напруги та генератора прямокутних імпульсів, які є на макеті.

4.3.5.2 Скласти схему для дослідження інтегрування сигналу прямокутної форми. У перемикачах встановити такі перемички:  $S1 \rightarrow 3$ ,  $S2 \rightarrow 2$ ,  $S3 \rightarrow 1$ , з однієї сторони  $S5 \rightarrow 0$ , з другої сторони  $S5 \rightarrow 2$ , перемички у перемикачах  $S4$  та  $S6$  видалені. До виходу підсилювача ( $X3-X5$ ) підключити осцилограф.

4.3.5.3 Включити живлення макету.

4.3.5.4 Зарисувати осцилограми вхідного та вихідного сигналів, виміряти амплітуди сигналів та їх період. Виключити живлення макету.

На рис. 4.9 подано вид вхідного та вихідного сигналу. Слід звернути увагу на те, що сигнал прямокутної форми можна розглядати як почергову подачу постійної напруги; як відомо інтегрування сталої величини дає лінійно-змінну функцію; слід мати на увазі, що сигнал подається на інвертуючий вхід операційного підсилювача, тобто при подачі додатної напруги, при інтегрування сигналу за допомогою пристрою з операційним підсилювачем, отримуватимемо лінійно-змінний сигнал, що спадає, а при подачі від'ємної напруги при такому інтегруванні отримуватимемо лінійно-змінний сигнал, що наростає.

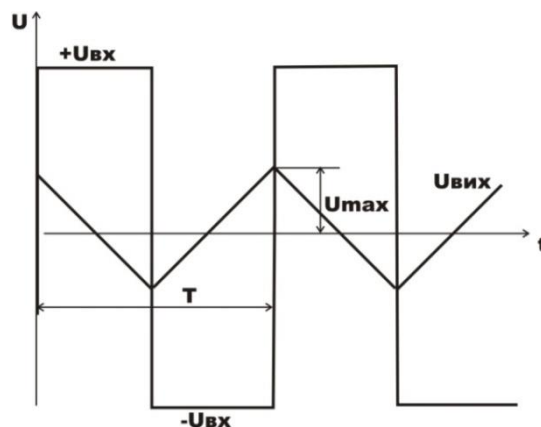


Рисунок 4.9 — Вхідний сигнал прямокутної форми та проінтегрований сигнал

4.3.5.5 Розрахувати максимальну амплітуду проінтегрованого сигналу за формулою:

$$U_{max} = \frac{T}{4RC} U_{вх}.$$

4.3.5.6 Скласти схему для дослідження інтегрування сигналу трикутно-подібної форми. У перемикачах встановити такі перемички: S1→4, S2→2, S3→1, з однієї сторони S5→0, з другої сторони S5→2, перемички у перемикачах S4 та S6 видалені. До виходу підсилювача (X3–X5) підключити осцилограф.

4.3.5.7 Включити живлення макету.

4.3.5.8 Зарисувати осцилограми вхідного та вихідного сигналів, виміряти амплітуди сигналів та їх період. Виключити живлення макету.

На рис. 4.10 подано вид вхідного та вихідного сигналів.

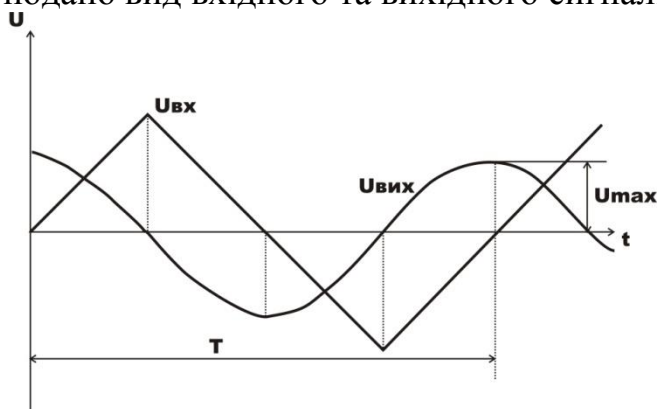


Рисунок 4.10 — Форми вхідного і вихідного сигналів при інтегруванні лінійно-змінного сигналу

Слід звернути увагу на те, що сигнал трикутно-подібної форми можна розглядати як почергову подачу лінійно-змінної напруги; як відомо інтегрування лінійно-змінної величини дає параболічну функцію.

4.3.5.9 Розрахувати максимальну амплітуду проінтегрованого сигналу за формулою:

$$U_{max} = \frac{T}{8RC} U_{вх}.$$

4.3.6 Дослідження роботи диференціатора на операційному підсилювачі

4.3.6.1 Пристрій на операційному підсилювачі для диференціювання напруг реалізується на макеті (див. рис. 4.8) відповідно до рис. 4.6. Роль опору зворотного зв'язку виконує опір R7. У коло вхідного опору підключається ємність. Як вхідний сигнал використовується сигнал від генератора прямокутних імпульсів.

4.3.6.2 Скласти схему для дослідження операції диференціювання за допомогою операційного підсилювача, для цього слід встановити додаткову ємність замість перемички у перемикач S1, при чому один вивід ємності слід встановити у гніздо 3 перемикача S1 (другий вивід у гніздо самого перемикача), крім того слід виконати такі комутації: S2→R3 (найменший серед вхідних опорів), S3→1, з однієї сторони S5→0, а з другої S5→1, у перемикачах S4, S6 перемички видалені. На вихід пристрою (X3-X5) підключити осцилограф.

4.3.6.3 Включити живлення макету.

4.3.6.4 Зарисувати осцилограми вхідного (рис. 4.11) та вихідних (рис. 4.12) сигналів. Виміряти тривалості та амплітуди імпульсів. Повторити вимірювання вихідного сигналу при зміні вхідного опору – R1, R2.

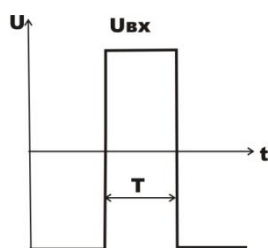


Рисунок 4.11 — Вид вхідного сигналу

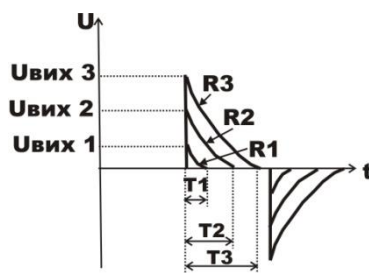


Рисунок 4.12 — Вид вихідного сигналу (продиференційований сигнал)

4.3.6.5 Виключити живлення макету.

4.3.7 Дослідження роботи логарифмічного підсилювача на операційному підсилювачі

4.3.7.1 Пристрій логарифмічного підсилювача реалізується на макеті (див. рис. 4.8) відповідно до рис. 4.7. Як опір зворотного зв'язку використовується напівпровідниковий діод. Як джерело сигналу, який слід прологарифмувати, використовується джерело E1.

4.3.7.2 Скласти схему логарифмічного підсилювача. Для цього встановити у перемикачах такі перемички: S1→2, S2→3, S3→1, з однієї сторони S5→0, а з другої S5→3, перемички у перемикачах S4, S6 – видалити.

4.3.7.3 Включити живлення макету.

4.3.7.4 Виміряти амплітудну характеристику підсилювача при зміні вхідної напруги (контакти X1–X5) від максимального від’ємного значення до максимального додатного значення, вихідна напруга — контакти X3–X5. На ділянці, де різко змінюється значення вихідної напруги, додатково провести вимірювання у 5 точках, при цьому вхідну напругу слід змінювати з малим кроком. Результати вимірювань занести до табл. 4.5.

Таблиця 4.5 — Результати вимірювань амплітудної характеристики логарифмічного підсилювача

$U_{\text{вх}}$									
$U_{\text{вих}}$ вхідний опір R3									
$U_{\text{вих}}$ вхідний опір R2									

4.3.7.5 Змінити вхідний опір на R2 ( у перемикачі S2 →2). Провести вимірювання аналогічні п. 4.3.7.4. Результати занести до табл. 4.5.

4.3.7.6 Виключити живлення макету.

4.3.7.7 За даними табл. 4.5 побудувати графіки  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ . Проаналізувати їх вид.

#### 4.4 Зміст звіту

У звіті наводяться:

- назва роботи;
- мета роботи;
- принципові схеми досліджуваних пристроїв, таблиці за результатами вимірювань та розрахунків, графіки, розрахунки;
- висновки.

#### 4.5 Контрольні запитання та завдання

1. Що являє собою операційний підсилювач?
2. Що таке масштабний операційний підсилювач?
3. Куди подається сигнал у підсилювача, що інвертує сигнал?
4. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, який інвертує сигнал.
5. Визначити коефіцієнт підсилення підсилювача, який не інвертує сигнал.
6. Як будується пристрій на операційному підсилювачі для додавання сигналів?

7. Яке має бути співвідношення вхідних опорів та опору зворотного зв'язку для правильного додавання сигналів?
8. Як будується «віднімач» напруг?
9. Який електронний елемент має бути включений у коло зворотного зв'язку при побудові інтегратора?
10. Що таке диференціатор на операційному підсилювачі?
11. Дайте визначення логарифмічного підсилювача.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВИБІРКОВИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ З RC-КОЛАМИ

5.1 Мета роботи: ознайомлення з принципами побудови та роботи вибіркового підсилювачів на основі інтегрального операційного підсилювача і RC-кіл

5.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи

В лабораторній роботі досліджуються принципи побудови та роботи підсилювачів на основі операційного підсилювача і RC-кіл. Як RC-кола використовуються 2Т-міст та міст Віна (рис. 5.1, 5.2). В роботі досліджується робота вибіркового підсилювача у режимі підсилення та генерації. Для створення різних режимів роботи додатково використовуються кола, за допомогою яких можна створити різні види зворотного зв'язку (позитивний зворотний зв'язок – ПЗЗ та негативний - НЗЗ). Вид лабораторного макету подано на рис.5.3

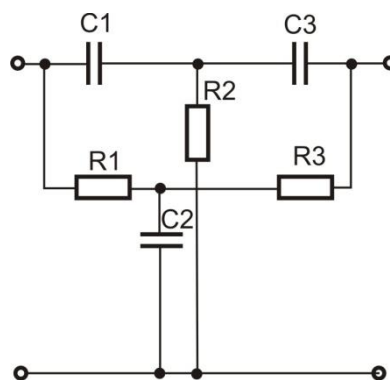


Рисунок 5.1 — Схема 2Т- мосту

Якщо у схемі 2Т-мосту  $R1 = R3$ ,  $C1 = C3$ ,  $R2 = 0,5R3$ ,  $C2 = 2C3$ , то такий міст є симетричним.

Якщо у схемі моста Віна  $R1 = R2$ ,  $C1 = C2$ , то такий міст також є симетричним.

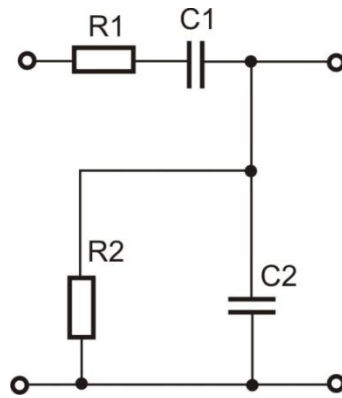


Рисунок 5.2 - Схема моста Віна

2Т-міст та міст Віна мають деяку квазірезонансну частоту, на якій у цих колах фазовий зсув дорівнює нулю  $\varphi = 0^\circ$ , а коефіцієнт передачі напруги  $\beta$  буде максимальним (міст Віна), або мінімальним (2Т-міст). При підготовці до цієї роботи слід повторити розділ зворотні зв'язки у підсилювачах. Для розуміння принципів побудови автогенераторів слід знати умови самозбудження генераторів, доцільність використання в них частотно-вибіркових кіл.

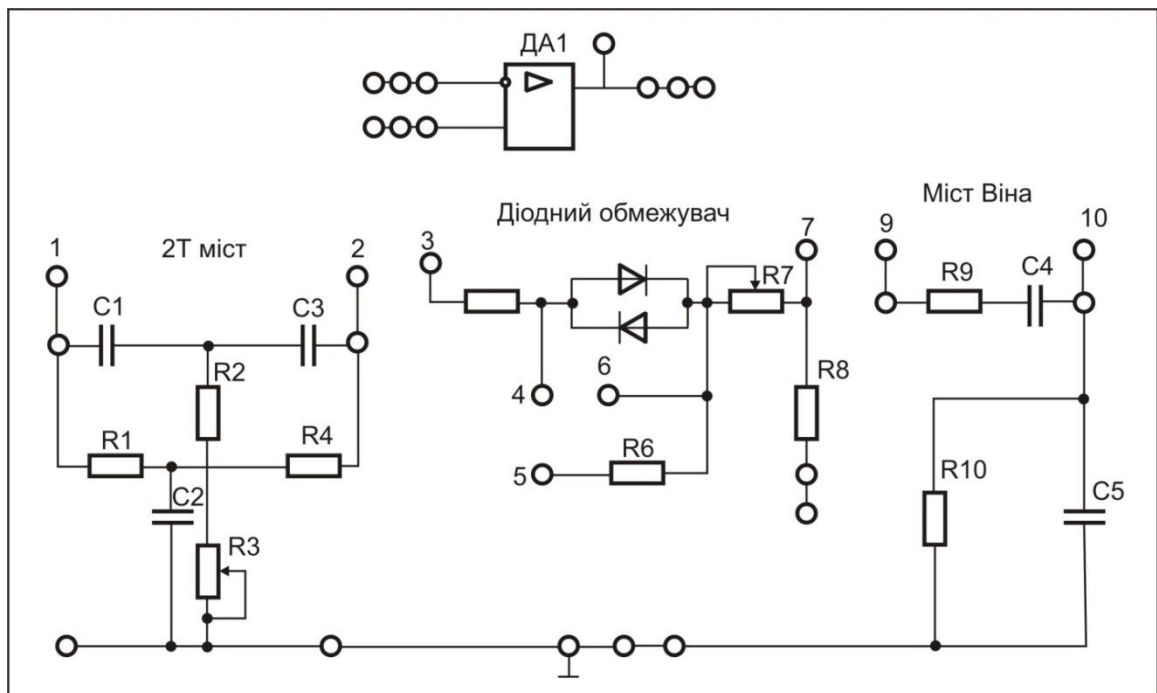


Рисунок 5.3 — Вид лабораторного макету для дослідження схем вибіркових підсилювачів

Квазірезонансні частоти для вказаних симетричних мостів визначаються так:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \cdot \quad (5.1)$$

Коефіцієнт передачі напруги визначається так  $\beta = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$ . Для мосту Віна

$\beta_0$  можна визначити через параметри кола на квазірезонансній частоті  $\beta_0 = \frac{1}{1 + \frac{R1}{R2} + \frac{C2}{C1}}$ , тому для симетричного моста  $\beta_0$  становить 1/3.

Для 2Т мосту на квазірезонансній частоті  $\beta_0 = 0$ .

При використанні моста Віна разом з операційним підсилювачем коефіцієнт передачі такого пристрою є добутком коефіцієнту передачі  $\beta$  моста та коефіцієнту підсилення  $K_U$  операційного підсилювача:

$$\beta_{пристрою} = \beta_{мосту} \cdot K_U.$$

Використання мосту Віна з операційним підсилювачем, де міст Віна включений у коло позитивного зворотного зв'язку, дозволяє створити або генератор, коли загальний коефіцієнт передачі напруги  $\beta_{пристрою} > 1$ , або вибіркового підсилювач, коли загальний коефіцієнт передачі напруги  $\beta_{пристрою} < 1$ .

2Т міст може використовуватись лише у вибіркового підсилювачах, а не в генераторах.

Для автогенераторів найважливішими параметрами є стабільність частоти сигналу, який генерується (залежить від добротності частотно-залежного кола), та стабільність амплітуди сигналу (залежить від навантаження та інших параметрів). У досліджуваній схемі стабільність амплітуди забезпечується використанням в колі негативного зворотного зв'язку нелінійних елементів – діодів.

На основі операційного підсилювача та 2Т мосту, який включений у коло негативного зворотного зв'язку, будуються вибіркового підсилювачі.

Максимальний коефіцієнт передачі буде коли  $R_{вх} \rightarrow 0$ , і  $R_{вих} \rightarrow \infty$ , ця умова потребує узгодження з аналогічними параметрами операційного підсилювача. Максимальний коефіцієнт передачі мосту Віна становить  $Q = 0,33$ ; максимальний коефіцієнт передачі 2Т мосту становить  $Q = 0,25$ .

Смуга пропускання вибіркового підсилювачів визначається з експерименту за АЧХ на рівні  $0,707 U_{вих max}$ .

Еквівалентна добротність визначається так:

$$Q_{екв} = \frac{f_0}{2\Delta f}, \quad (5.2)$$

де  $f_0$  – квазірезонансна частота;

$2\Delta f$  – смуга пропускання вибіркового підсилювача.

Для дослідження вибіркового підсилювачів використовується генератор сигналів звукових частот, осцилограф та вольтметр.

### 5.3 Порядок виконання роботи

#### 5.3.1 Дослідження амплітудно-частотної характеристика (АЧХ) моста Віна

5.3.1.1 Для дослідження АЧХ зібрати на макеті схему подану на рис.5.4. При дослідження генератор сигналів має мати вихідний опір 5 Ом.

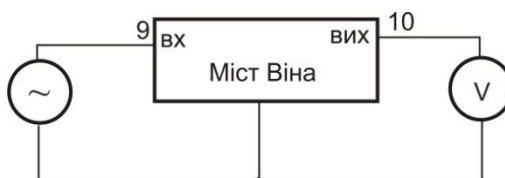


Рисунок 5.4 – Схема дослідження АЧХ моста Віна

5.3.1.2 Встановити на генераторі напругу  $E_{Г} = 1\text{В}$  і при проведенні досліду підтримувати це значення.

5.3.1.3 Змінювати частоту вхідного сигналу і проводити вимірювання значень вихідної напруги. Отримані дані занести до табл. 5.1. Між частотами 750 Гц та 850 Гц визначити значення  $f_0$ , на якій значення  $U_{вих}$  буде максимальним та записати його в таблицю на місце  $f_0$ . При кожному вимірюванні перевіряти значення  $E_{Г}$  і, якщо потрібно, відрегулювати його.

Таблиця 5.1—Результати вимірювань АЧХ моста Віна

$f_0$ , Гц	100	200	400	600	700	750	$f_0$	850	1000	2000	3500	5000
$U_{вих}$ , В												
$\beta$												

5.3.1.4 За результати вимірювань розрахувати коефіцієнт передачі напруги  $\beta = \frac{U_{вих}}{E_{Г}}$ .

5.3.1.5 Побудувати графік АЧХ, з графіку визначити  $f_{н.гр.}$  та  $f_{в.гр.}$ , а також робочий діапазон  $\Delta f$ , побудувати графік  $\beta(f)$ .

#### 5.3.2. Дослідження амплітудно-частотної характеристика 2Т-мосту

5.3.2.1 Для дослідження АЧХ 2Т моста зібрати схему, подану на рис.5.5.

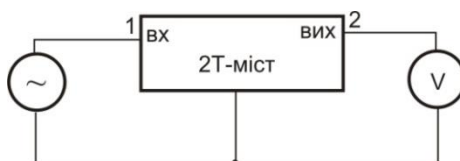


Рисунок 5.5 - Схема для дослідження АЧХ 2Т-моста



5.3.2.2 Аналогічно п.5.3.1.2 встановити на генераторі напругу  $E_{\Gamma} = 1\text{В}$  і при проведенні досліду підтримувати це значення.

5.3.2.3 Виконати балансування 2Т-мосту. Для цього на генераторі встановити частоту 500 Гц. За допомогою опору  $R3$  добитися мінімальних показів вольтметра, крім того мінімальними змінами частоти навколо точки 500 Гц також добитися мінімальних значень вихідної напруги.

5.3.2.4 Змінювати частоту вхідного сигналу і проводити вимірювання значень вихідної напруги. Отримані дані занести до табл. 5.2. Між частотами 490 Гц та 510 Гц визначити значення  $f_0$ , на якій значення  $U_{вих}$  буде мінімальним. При кожному вимірюванні слід перевіряти значення  $E_{\Gamma}$  і, якщо потрібно, відрегулювати його.

Таблиця 5. 2 — Результати вимірювань АЧХ 2Т-мосту

$f$ , Гц	20	100	200	300	400	430	460	490	$f_0$	510	540	570	600	700	800	1000	2000	5000
$U_{вих}$ , В																		
$\beta$																		

5.3.2.5 За результати вимірювань розрахувати коефіцієнт передачі напруги  $\beta = \frac{U_{вих}}{E_{\Gamma}}$ .

5.3.2.6 Побудувати графік АЧХ, з графіку визначити  $f_{н.гр.}$  та  $f_{в.гр.}$ , а також робочий діапазон  $\Delta f$ , побудувати графік  $\beta(f)$ .

5.3.3 Дослідження роботи вибіркового підсилювача з мостом Віна у режимі генерації та підсилення, вивчення впливу різних видів зворотних зв'язків.

### 5.3.3.1 Вивчення принципу виникнення генерації

Зібрати схему подану на рис.5.6. У колі негативного зворотного зв'язку (діодний обмежувач) встановити перемицку 4–6.

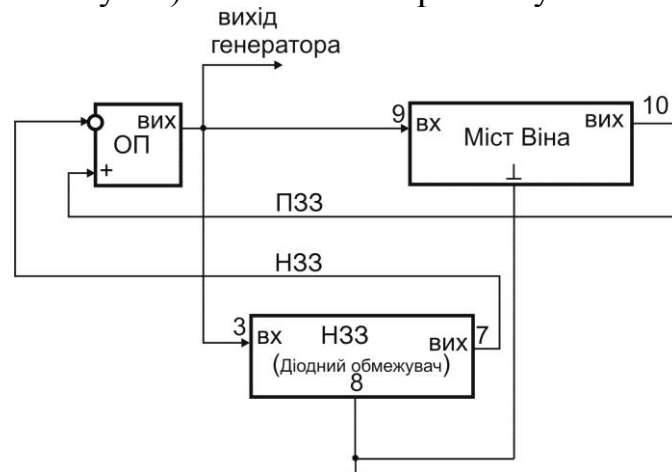


Рисунок 5.6 – Схема для дослідження роботи операційного підсилювача у режимі генерації

Осцилограф підключити до виходу ОП. У колі НЗЗ, змінюючи опір R7, спостерігати виникнення коливань (зменшується вплив НЗЗ). У момент виникнення коливань зміну R7 припинити. Визначити тривалість періоду виниклих коливань, розрахувати частоту, на якій ці коливання виникли та порівняти її значення зі значенням  $f_0$ , яке було визначене в п. 5.3.1.3. Осцилограму зарисувати.

5.3.3.2 Визначення можливості регулювання величини вихідного сигналу генератора.

У колі НЗЗ розірвати зв'язок 4–6 і встановити перемичку 4–5. Змінюючи опір R7 спостерігати характер коливань, що виникають.

Потім перемичку 4–5 видалити зовсім. Знову змінюючи опір R7 спостерігати характер виникнення коливань.

Порівняти характер виникнення коливань з характером виникнення коливань у п. 5.3.3.1. Таке порівняння дає можливість визначити можливість регулювання вихідного сигналу створеного генератора за допомогою опору R7. Зробити висновки.

У колі НЗЗ відновити перемичку 4–6. Змінюючи опір R7 добитися виникнення коливань, при цьому зразу ж перестати змінювати цей опір (тобто коливання виникають на межі зриву). Після цього змінити схему: відключити міст Віна від виходу ОП. Виниклі коливання зірвуться, тобто ПЗЗ буде усунутий і пристрій уже не буде генерувати сигнали.

5.3.3.3 Дослідження АЧХ вибіркового підсилювача з мостом Віна.

Підготувати генератор звукових сигналів до наступної роботи так: встановити частоту 800 Гц, ручку регулювання вихідного сигналу перевести у крайнє ліве положення, встановити діапазон зміни напруг 1 В.

Зібрати схему, подану на рис. 5.7. Перевірити наявність перемичку 4–6 у колі НЗЗ.

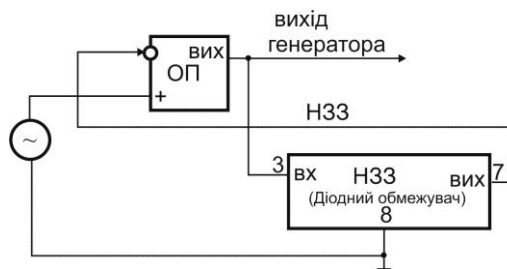


Рисунок 5.7 – Схема підготовки вибіркового підсилювача з мостом Віна до досліджень

На виході генератора звукових сигналів встановити 400 мВ (це теж саме, що це значення буде встановлено на вході ОП). До виходу ОП підключити вольтметр і виміряти  $U_{\text{вих}}$ . Розрахувати на цій частоті  $K_U$  та  $\beta = 1/K_U$ .

Відключити генератор від неінвертуючого входу ОП.

Далі повернутися до схеми, поданої на рис.5.6. За допомогою опору  $R7$  знову знайти межу самозбудження, але в цьому випадку зупинитися у регулюванні, коли коливань ще немає.

У колі НЗЗ розірвати перемичку 8—«земля», після цього у точку 8 підключити генератор звукових сигналів, при цьому перед підключенням генератора встановити  $E_r = 0$ ,  $f = f_0$  (див. п. 5.3.1.3). Дана схема подана на рис. 5.8. До виходу ОП підключити осцилограф.

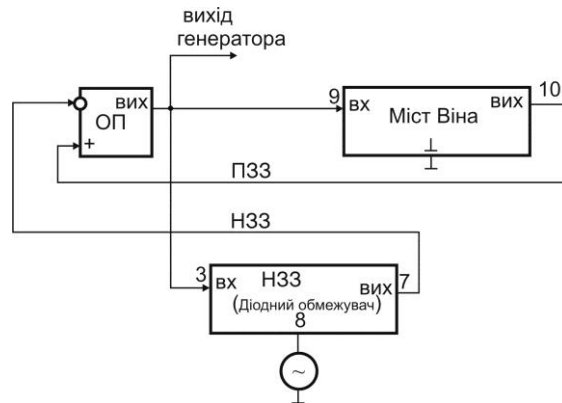


Рисунок 5.8 – Схема дослідження АЧХ підсилювача з мостом Віна

Встановити значення  $E_r = 80$  мВ. На виході ОП виникнуть коливання. Змінювати значення вхідної напруги поки не зникнуть спотворення вихідного сигналу. Отримане значення вхідної напруги зафіксувати і при подальших вимірюваннях контролювати і підтримувати.

Змінюючи частоту вимірювати значення  $U_{вих}$ , дані вимірювань занести до табл. 5.3. Біля частоти  $f_0$  частоту змінювати з кроком 10–20 Гц.

Таблиця 5.3 — Результати вимірювань АЧХ підсилювача з мостом Віна

$f$ , Гц	100	200	400	600				$f_0$				3500	5000
$U_{вих}$ , В													
$K_U$													
$\beta$													

Побудувати графік АЧХ підсилювача з мостом Віна та з графіком АЧХ за п.5.3.1.3 в одній площині. Порівняти АЧХ мосту Віна та АЧХ підсилювача з мостом Віна. Розрахувати  $K_U$  та  $\beta = 1/K_U$ , побудувати цей графік в одній площині з графіком  $\beta$  за п. 5.3.1.3. Зробити висновки.

Схему розібрати.

### 5.3.4 Дослідження роботи вибіркового підсилювача з 2Т-мостом у режимі підсилення

5.3.4.1 Перед початком досліджень провести балансування 2Т- мосту як у п.5.3.2.3, але для напруги  $E_r = 50$  мВ.

### 5.3.4.2 Зібрати схему подану на рис.5.9.

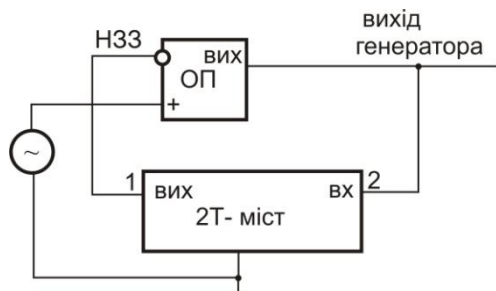


Рисунок 5.9 – Схема для дослідження АЧХ вибіркового підсилювача з 2Т-мостом

Підключити до виходу ОП осцилограф та вольтметр. Діапазон вихідних напруг генератора встановити рівним 100 мВ, при цьому ручку регулювання виходу напруги генератора перевести в крайнє ліве положення, тобто  $E_r = 0$ . На екрані осцилографу спостерігатимуться коливання. За допомогою опору  $R_3$  2Т-мосту зірвати ці коливання. Почати збільшувати вихідну напругу генератора приблизно до 20 мВ і спостерігати появу коливань. Коливання мають бути без спотворень. Після цього відключити генератор від входу ОП, в цей час коливання мають зникнути, якщо вони не зникли, то за допомогою  $R_3$  добитися їх зникнення. Після цього регулювання генератор знову підключити до неінвертуючого входу ОП.

Змінюючи частоту вимірювати значення  $U_{\text{вих}}$ , дані вимірювань занести до табл. 5.4, слід пам'ятати про необхідність контролю рівня вхідного сигналу. Біля частоти  $f_0$  частоту змінювати з кроком 10-20 Гц.

Таблиця 5.4 - Результати вимірювань АЧХ підсилювача з 2Т-мостом

$f$ , Гц	20	100	200	300	400	430			$f_0$				600	700	800	1000	2000	5000
$U_{\text{вих}}$ , В																		
$K_U$																		
$\beta$																		

Після вимірювань побудувати АЧХ підсилювача з 2Т-мостом в одній площині з графіком АЧХ 2Т-мосту за п.5.3.2, зробити висновки. Визначити смугу пропускання підсилювача і еквівалентну добротність. Розрахувати  $K_U$ , розрахувати  $\beta = 1/K_U$ , побудувати графіки  $\beta$  за п. 5.3.2 та за даними табл.5.4 в одній площині.

Порівняти АЧХ 2Т-мосту та АЧХ підсилювача з 2Т-мостом, зробити висновки.

## 5.4 Зміст звіту

У звіті наводяться:

— назва роботи;

- мета роботи;
- принципові схеми досліджуваних пристроїв, таблиці за результатами вимірювань та розрахунків, графіки, розрахунки;
- висновки.

### 5.5 Контрольні запитання та завдання

1. Які властивості мосту Віна та 2Т-мосту?
2. Які умови виникнення автоколивань у генераторі на основі ОП з мостом Віна?
3. Дайте визначення критичного коефіцієнту підсилення.
4. Як забезпечується стабілізація амплітуд и коливань в автогенераторах?
5. Коли слід використовувати вибірккові RC-кола в підсилювачах та генераторах?
6. В якому діапазоні частот доцільно використовувати вибірккові схема та чому?
7. Як на основі АЧХ можна визначити добротність вибірккових підсилювачів?
8. Для чого в схемах автогенератора використовують НЗЗ? За яких умов виникає самозбудження?
9. Який фізичний смисл має умова балансу амплітуд автогенератора?
10. Який фізичний смисл має умова балансу фаз автогенератора?

## ЛАБОТАРОТНА РОБОТА №6 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВТОРИННИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

6.1 Мета роботи: вивчення загальної структури вторинних джерел живлення електронної апаратури

### 6.2 Підготовка до виконання лабораторної роботи

Первинні джерела живлення зазвичай мають змінну напругу частотою 50 Гц. Електронна апаратура для живлення використовує постійну напругу. Для спрямлення змінної напруги використовують діодні випрямлячі, які зазвичай побудовані за мостовою схемою (рис. 6.1).

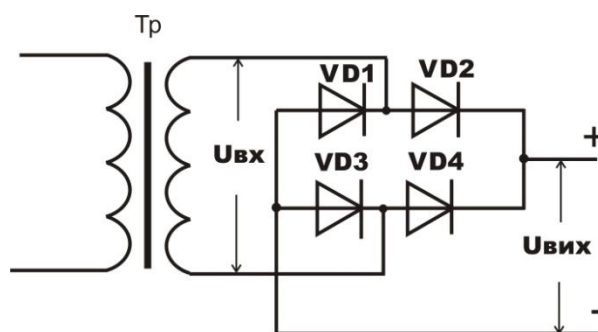


Рисунок 6.1 — Мостова схема випрямлення змінної напруги

Осцилограми напруг до і після випрямлення подані на рис. 6.2.

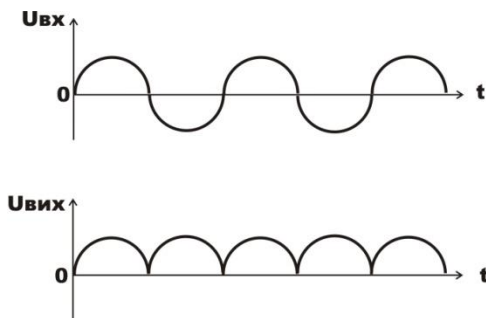


Рисунок 6.2 — Осцилограми напруг при застосуванні мостової схеми випрямлення

Коефіцієнт випрямлення напруги визначається так:

$$K_B = \frac{U_0}{U_{max}}, \quad (6.1)$$

де  $U_0$  — середнє значення випрямленої напруги (рис. 6.3);  
 $U_{max}$  — максимальне значення випрямленої напруги.

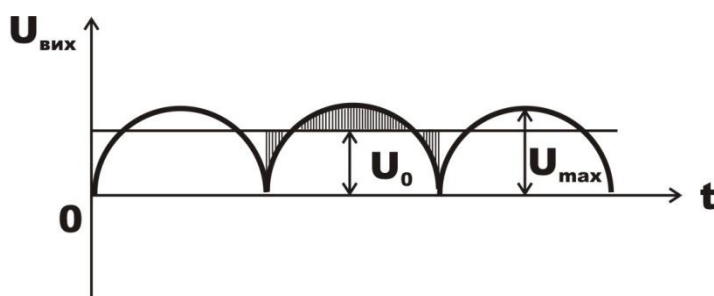


Рисунок 6.3 — Визначення середньої випрямленої напруги та її максимального значення

Після випрямлення напруги діодним випрямлячем пульсації такої напруги досить значні. Пульсація — це змінна складова напруги на виході випрямляча, коефіцієнт пульсації  $k$ -ї гармоніки визначається так:

$$K_{Pk} = \frac{U_{maxk}}{U_0}, \quad (6.2)$$

де  $U_{maxk}$  — амплітудне значення напруги  $k$ -ї гармоніки;  
 $U_0$  — середнє випрямлене значення напруги.

Для зменшення пульсацій використовують індуктивність або ємність як окремі елементи, а також фільтри, які побудовані на їх основі: за Г-, П-, та Т-подібними схемами.

Стабілізатори напруги характеризують параметрами абсолютного коефіцієнта стабілізації та відносного коефіцієнта стабілізації.

Абсолютний коефіцієнт стабілізації напруги визначається так:

$$H = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вих}}}, \quad (6.3)$$

де  $\Delta U_{\text{вх}}$  — приріст вхідної напруги (рис. 6.4) до стабілізації;

$\Delta U_{\text{вих}}$  — приріст вихідної напруги після стабілізації.

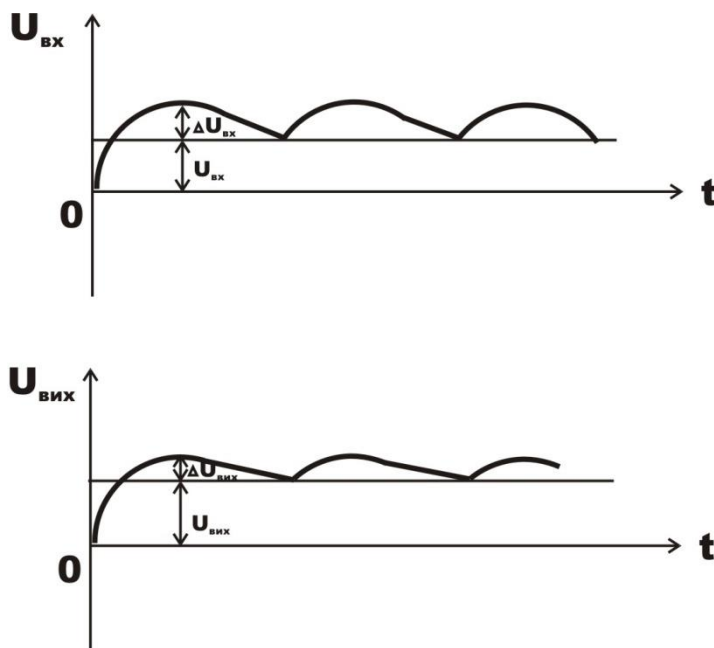


Рисунок 6.4 — Вид напруг до ( $U_{\text{вх}}$ ) та після стабілізації ( $U_{\text{вих}}$ )

Відносний коефіцієнт стабілізації напруги визначається так:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{вих}}}, \quad (6.4)$$

де  $\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}$  — відносний приріст напруги на вході (див. рис. 6.4);

$\Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{вих}}$  — відносний приріст напруги на виході.

Вихідний опір, характеризує зміну вихідної напруги при зміні струму навантаження:

$$R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{н}}} \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const}. \quad (6.5)$$

Розрізняють дві основні групи стабілізаторів напруги: параметричні та компенсаційні. На практиці часто зустрічається їх комбінації.

Параметричні стабілізатори — це нелінійні обмежувачі значень напруги. Параметричні стабілізатори не дозволяють регулювати вихідну напругу, не забезпечують великих струмів у навантаженні, мають значну залежність параметрів від температури.

Компенсаційні стабілізатори мають у своєму складі регулюючий елемент (РЕ), підсилювач сигналу розбалансування (ППС) зі схемою порівняння (зазвичай подільника напруги), джерело опорної (еталонної) напруги ( $U_{оп}$ ). В компенсаційних стабілізаторах напруги відбувається порівняння фактичної величини вихідної напруги із заданою величиною і автоматично виконується зменшення їх різниці. Як  $U_{оп}$  зазвичай використовують параметричні стабілітрони. ППС порівнює і підсилює різницю між опорною та вихідною напругою до величини, необхідної для управління РЕ, який зазвичай є потужним транзистором. За способом включення регулюючого елемента стабілізатори поділяють на стабілізатори послідовного (рис. 6.5) та паралельного типів (рис. 6.6).

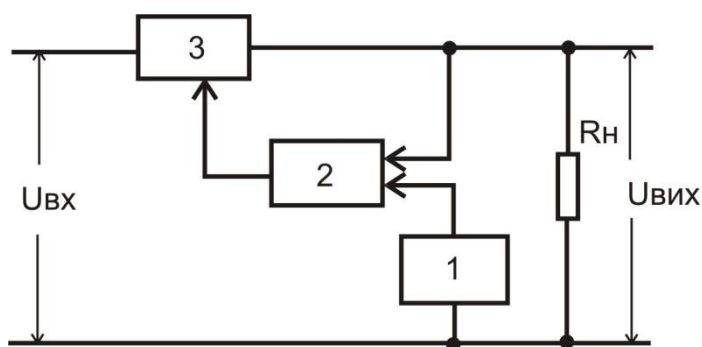


Рисунок 6.5 — Структурна схема компенсаційного стабілізатора послідовного типу (1 –  $U_{оп}$ , 2 – ППС, 3 – РЕ)

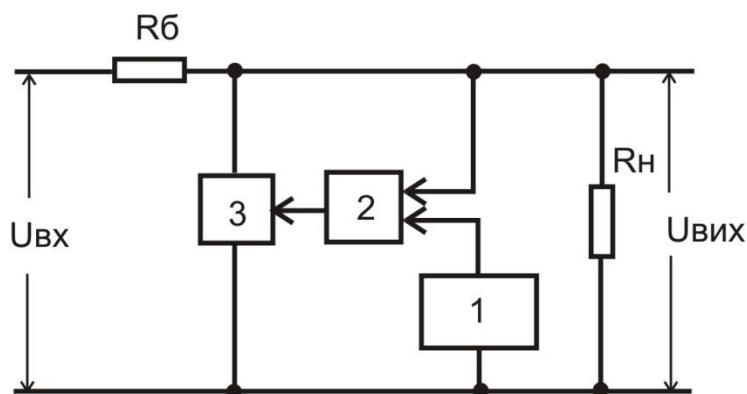


Рисунок 6.6 — Структурна схема компенсаційного стабілізатора паралельного типу (1 –  $U_{оп}$ , 2 – ППС, 3 – РЕ)

У стабілізаторах послідовного типу РЕ виконує роль баластного опору. Схема ППС будується так, що при зростанні напруги на виході стабілізатора вихідний сигнал ППС створював такий сигнал, щоб опір регулюючого



елементу зростає і падіння напруги на ньому збільшувалось, а вихідна напруга стабілізатора практично залишалась постійною. При зменшенні вихідної напруги реакція стабілізатора буде зворотною.

У стабілізаторах паралельного типу РЕ включається паралельно навантаженню, а послідовно з навантаженням включається RБ (див. рис. 6.6). У цьому випадку при зростанні напруги на виході стабілізатора вихідний сигнал ППС збільшує струм через РЕ, при цьому збільшується падіння напруги на RБ, а напруга на навантаженні не змінюється.

Стабілізатори компенсаційного типу зазвичай будуються у інтегральному виконанні.

У лабораторній роботі досліджується вплив різних типів фільтрів на наявність та величину пульсацій вихідної напруги.

Крім того, у лабораторній роботі досліджується робота інтегрального стабілізатора напруги компенсаційного типу.

У лабораторній роботі використовуються: первинне джерело живлення змінної напруги, частотою 50 Гц (фаза С на стенді УИЛС); діодний випрямляч, який зібрано за мостовою схемою; індуктивність  $L4 = 30$  мГн; ємності – 1000 мкФ та дві по 200 мкФ; стабілізатор напруги КР142ЕН8; навантаження R4, опір якого можна змінювати. Монтаж схеми, яка досліджується, виконується на лабораторному стенді УИЛС, діодний випрямляч, ємності та стабілізатор напруги змонтовані у окремих корпусах. Слід звернути увагу, що діодний випрямляч та стабілізатор напруги мають **маркування полярності напруги**, якого слід обов'язково дотримуватись. При виконанні роботи слід звернути увагу, що опір R4 **не може дорівнювати нулю**.

### 6.3 Порядок виконання роботи

6.3.1. Дослідження випрямлення напруги діодним випрямлячем (див. рис. 6.1).

6.3.1.1 Зібрати схему дослідження відповідно до рис. 6.7.

6.3.1.2 Включити живлення та встановити напругу первинного джерела 15 В, встановити опір  $R_H = R4 = 50$  Ом.



Рисунок 6.7 — Схема дослідження випрямлення напруги діодним випрямлячем

6.3.1.3 Включити живлення. Виміряти величину постійної вихідної напруги вольтметром, після цього переключити вольтметр на вимірювання змінної напруги та виміряти величину вихідної напруги, з осцилографа зарисувати вид вихідної напруги, провести вимірювання параметрів вихідного сигналу за осцилографом. Порівняти ці значення зі значеннями, отриманими за показами вольтметра. Зробити висновки.

6.3.1.4 Виключити живлення

6.3.1.5 За (6.1) розрахувати  $K_B$ , де  $U_0$  — це значення напруги, виміряне вольтметром при вимірі постійної напруги, а  $U_{max}$  — це максимальний розмах випрямленої напруги, який виміряно за осцилографом.

6.3.2. Дослідження впливу ємності на випрямлення напруги

6.3.2.1 Зібрати схему подану на рис.6.8,  $C1 = 200$  мкФ. Встановити значення  $R4 = 8$  Ом (резистор, що обмежує струм).

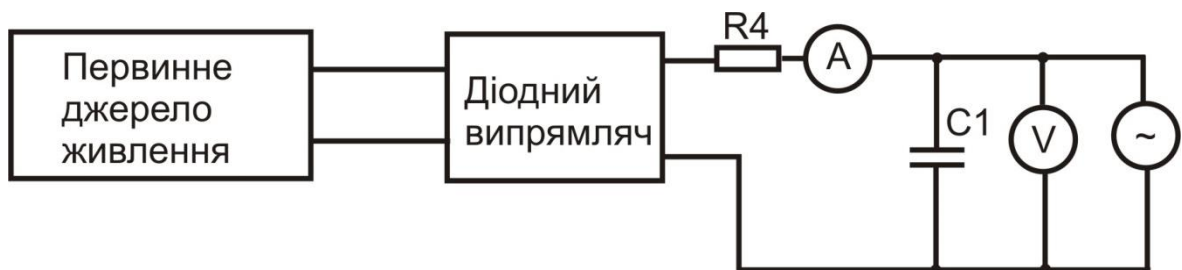


Рисунок 6.8 — Схема дослідження впливу ємності на випрямлення напруги

6.3.2.2 Включити живлення (15 В). Виміряти вольтметром постійну  $U_0$  та змінну напруги на конденсаторі; спостерігати форму сигналу на осцилографі, записати амплітуду сигналу  $U_{max}$ ,  $\Delta U_{вх}$  та  $U_{вх}$  (див. рис. 6.3 та рис. 6.4). Виключити живлення. За (6.1) розрахувати коефіцієнт випрямлення напруги.

6.3.2.3 Модифікувати схему, підключивши  $R4$  як навантаження (рис. 6.9), встановити значення  $R4 = 999$  Ом.



Рисунок 6.9 — Модифікована схема дослідження впливу ємності на випрямлення напруги

6.3.2.4 Включити живлення (15 В). Зменшуючи значення  $R_4$  встановлювати значення струму, вказане в табл. 6.1. Вимірювати рівень постійної напруги  $U_0$  на конденсаторі вольтметром; вимірювати на конденсаторі за осцилографом  $U_{max}$ ,  $\Delta U_{вих}$  та  $U_{вих}$  (див. рис. 6.3 та рис. 6.4). Зарисувати форму осцилограми. Виключити живлення.

Таблиця 6.1— Результати вимірювань пульсацій випрямленої напруги

$I, mA$	$I_{min} =$	100	200	300	400	500
$U_{max}$						
$\Delta U_{вих}$						
$U_{вих}$						
$U_0$						
$R_4$	999 Ом					

6.3.2.5 За (6.1) розрахувати коефіцієнт випрямлення. Використавши дані п. 6.3.2.2 (значення  $\Delta U_{вих}$  та  $U_{вих}$ ) та дані табл. 6.1 розрахувати згладжуючу дію фільтра за (6.3) та (6.4), зробити висновки щодо згладжуючої дії фільтра в залежності від опору навантаження. За (6.5) розрахувати  $R_{вих}$ , де  $\Delta U_{вих}$  розрахувати так:  $\Delta U_{вих} = U_{вих1} - U_{вих2}$ , де  $U_{вих1}$  та  $U_{вих2}$  сусідні значення четвертого рядка табл. 6.1; аналогічно розрахувати  $\Delta I_H$ , використавши дані першого рядка табл. 6.1 та порівняти отримані значення з реальними. Зробити висновки.

### 6.3.3 Дослідження впливу індуктивності на випрямлення напруги

6.3.3.1 Зібрати схему, подану на рис. 6.10. Встановити  $L_4 = 30$  мГн, встановити значення  $R_4 = 999$  Ом.

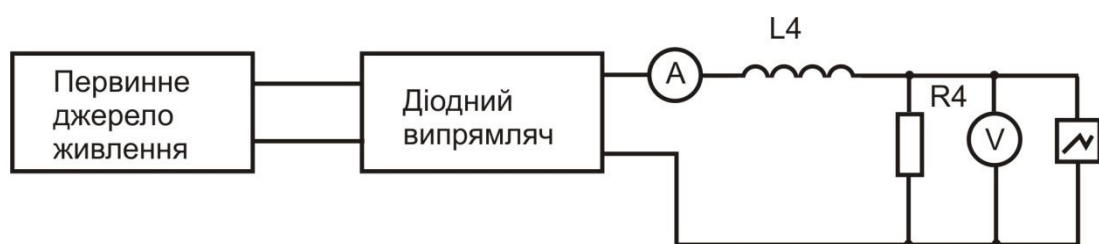


Рисунок 6.10 — Схема дослідження впливу індуктивності на випрямлення напруги

6.3.3.2 Включити живлення. Аналогічно до п. 6.3.2.4 провести вимірювання, а дані занести до табл. 6.2 (аналогічній табл. 6.1). Виключити живлення.

6.3.3.3 Провести обчислення аналогічні п. 6.3.2.5.

### 6.3.4 Дослідження впливу Г-подібного фільтру на випрямлення напруги

6.3.4.1 Зібрати схему, подану на рис. 6.11. Значення  $L4 = 30$  мГн,  $C1 = 200$  мкФ, встановити значення  $R4 = 999$  Ом.

6.3.4.2. Включити живлення. Аналогічно до п. 6.3.2.4 провести вимірювання, а дані занести до табл. 6.3 (аналогічній табл. 6.1). Виключити живлення.

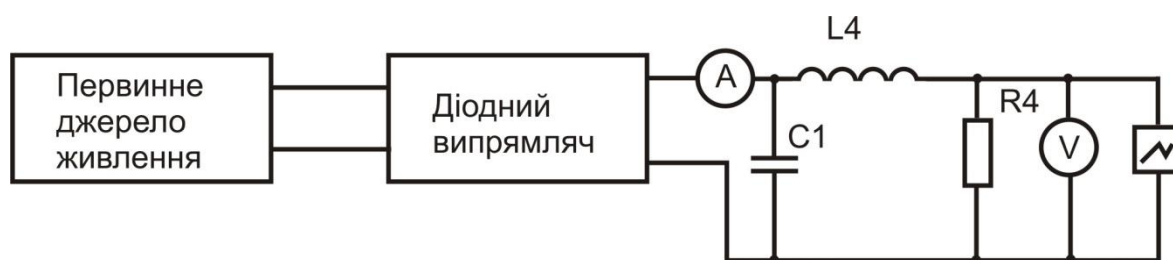


Рисунок 6.11 — Схема дослідження впливу Г-подібного LC-фільтру на випрямлення напруги

6.3.4.3 Провести обчислення аналогічні п. 6.3.2.5.

### 6.3.5 Дослідження впливу П-подібного фільтру на випрямлення напруги

6.3.5.1 Зібрати схему, подану на рис. 6.12. Значення  $L4 = 30$  мГн,  $C1 = C2 = 200$  мкФ, встановити значення  $R4 = 999$  Ом.

6.3.5.2. Включити живлення. Аналогічно до п. 6.3.2.4 провести вимірювання, а дані занести до табл. 6.4 (аналогічній табл. 6.1). Виключити живлення.

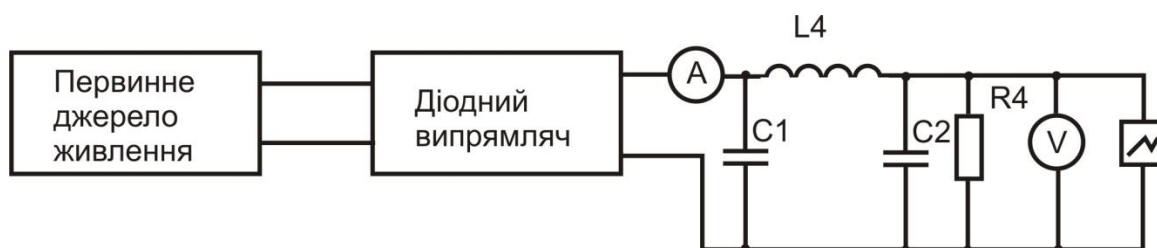


Рисунок 6.12 — Схема дослідження впливу П-подібного LC-фільтру на випрямлення напруги

6.3.5.3 Провести обчислення аналогічні п. 6.3.2.5.

### 6.3.6. Дослідження роботи інтегрального стабілізатора компенсаційного типу з випрямлення напруги

6.3.6.1 Зібрати схему, подану на рис. 6.13. Значення  $C1 = 1000 \text{ мкФ}$ , встановити значення  $R4 = 999 \text{ Ом}$ , як інтегральний стабілізатор (ІС) використовується мікросхема КР142ЕН8Б.



Рисунок 6.13 — Схема дослідження випрямлення напруги інтегральним стабілізатором

6.3.6.2 Дослідити залежність напруги стабілізації від величини вхідної напруги ІС для максимального навантаження ( $R4 = 999 \text{ Ом}$ ). Встановити перемикач змінної напруги первинного джерела живлення стенду УІЛС на мінімальне значення. Включити живлення. Змінювати напругу джерела живлення до 20 В (всі можливі значення), вольтметром фіксувати вхідну та вихідну напруги для ІС, отримані дані занести до табл.6.5. На осцилографі спостерігати наявність пульсацій ( $\Delta U_{\text{вх}}$  та  $\Delta U_{\text{вих}}$ ). За (6.4) розрахувати коефіцієнт стабілізації.

Таблиця 6.5 — Результати залежності вихідної напруги інтегрального стабілізатора від зміни вхідної напруги

$U_{\text{вх}}$													
$\Delta U_{\text{вх}}$													
$U_{\text{вих}}$													
$\Delta U_{\text{вих}}$													
$K_{\text{ст}}$													

6.3.6.3 Дослідити залежність  $U_{\text{вих}}$  від зміни струму навантаження. Встановити  $U_{\text{вх}} = 18 \text{ В}$ . Змінюючи опір  $R4$ , встановлювати струм у навантаженні відповідно до значень, вказаних у табл. 6.6, вимірювати за вольтметром  $U_{\text{вих}}$ , а за осцилографом пульсації на вході  $\Delta U_{\text{вх}}$  та на виході  $\Delta U_{\text{вих}}$ . Отримані дані занести до табл. 6.6. Розрахувати за (6.3) абсолютний та за (6.4) відносний коефіцієнти стабілізації.

Таблиця 6.6 — Результати вимірювань стабілізації вихідної напруги від струму навантаження

$I, \text{mA}$	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
$U_{\text{вих}}$										
$\Delta U_{\text{вх}}$										
$\Delta U_{\text{вих}}$										
$R_4$										
$H$										
$K_{\text{ст}}$										

### 6.3.7 Обробка результатів вимірювань

6.3.7.1 За даними розрахунку  $K_B$  для табл.6.1– 6.4 у одній площині побудувати графіки залежності  $K_B$  від струму навантаження та зробити висновки, щодо застосування того чи іншого типу стабілізації напруги.

6.3.7.2 За даними вимірювань вихідної напруги (для табл. 6.1–6.4) у одній площині побудувати графіки зміни вихідної напруги при зміні опору навантаження і зробити висновки.

6.3.7.3 За даними п. 6.3.6.2 побудувати графік залежності  $K_{\text{ст}}$  від вхідної напруги і зробити висновок.

6.3.7.5 За даними п. 6.3.6.3 побудувати графік залежності струму навантаження від опору навантаження. Проаналізувати і зробити висновки.

6.3.7.6 За даними табл. 6.6 побудувати графік залежності  $K_{\text{ст}}$  від споживаного струму у навантаженні.

### 6.4 Зміст звіту

У звіті наводяться:

- назва роботи;
- мета роботи;
- принципові схеми досліджуваних пристроїв, таблиці за результатами вимірювань та розрахунків, графіки, розрахунки;
- висновки.

### 6.5 Контрольні завдання та запитання

1. Пояснити принцип роботи мостової схеми випрямляча.
2. З якою метою до виходу діодного випрямляча підключається ємність?
3. Що таке коефіцієнт стабілізації напруги?
4. Як визначається коефіцієнт стабілізації напруги?
5. Який з досліджуваних фільтрів є найкращим та чому?
6. Яка особливість застосування ІС?
7. Які існують способи підвищення коефіцієнта стабілізації?

8. Пояснити принцип дії стабілізатора компенсаційного типу.
9. Які існують стабілізатори напруги?

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Оксанич, А.П. Комп'ютерна електроніка. Частина І: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. [Текст], А.П. Оксанич, С.Е. Притчин, О.В.Вашерук.—Харків: «Компанія СМІТ», 2006.—200 с.
2. Титце, У.Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. [Текст], Титце У., Шенк К. Пер. с нем.-М.: Мир, 1983.-512 с.
3. Костиков, В.Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: Учебник для ВУЗов. [Текст], В.Г. Костиков, Е.М. Парфенов, В.А. Шахнов — М.: Горячая линия — Телеком, 2001. — 344 с.
4. Гусев, В.Г. Электроника. [Текст], В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев – М.: Высшая школа, 1991.-622 с.
5. Бакалов, В.П. Основы теории электрических цепей и электроники. [Текст], В.П. Бакалов, А.Н. Игнатов Б.И. Крук, - М.: Радио и связь,1989. – 528 с.
6. Бирюков С. Микросхемные стабилизаторы напряжения широкого применения. [Текст], — Радио, 1999, № 2, с. 69—71.
7. Щербина, А. Применение микросхемных стабилизаторов серий 142, К142 и КР142. [Текст], А. Щербина, С. Благий, В. Иванов — Радио, 1991, № 3, с. 47—51; № 5, с. 68—70.