

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

3441 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
із курсу "Аналогова схемотехніка"
для студентів напрямів підготовки
"Електронні пристрої та системи"
"Мікро- та наноелектроніка"
усіх форм навчання

Частина 1

Суми
Сумський державний університет
2013

Методичні вказівки до лабораторних робіт із курсу "Аналогова схемотехніка" / укладачі: В. В. Гриненко, В. В. Петров. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – Ч. 1. – 35 с.

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

Лабораторна робота 1

АПАРАТУРА І МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи – вивчення будови електронного осцилографа С1-83, генератора імпульсів Г5-54, генератора звукової частоти та набуття навичок практичної роботи з ними.

1 Підготовка до виконання роботи

1.1 Вивчити будову та порядок роботи з С1-83.

1.2 Вивчити будову та порядок роботи з генератором імпульсів Г5-54.

1.3 Вивчити будову та порядок роботи з генератором звукової частоти.

2 Лабораторна установка

До лабораторної установки входять електронний осцилограф С1-83, генератор імпульсів Г5-54, генератор звукової частоти.

2.1 Будова і порядок роботи з осцилографом С1-83

2.1.1 Структурна схема осцилографа

До складу осцилографа (рис. 1) належать такі функціональні вузли: ЕПТ – електронно-променева трубка; А – атенюатори (послаблювачі); ПП – попередні підсилювачі; комутатор каналів; підсилювач вертикального відхилення променя – Y; підсилювач горизонтального відхилення променя – X; селектор синхронізації; генератор розгортки.

Осцилограф може працювати в одноканальному і двоканальному режимах. Одноканальний режим застосовується для спостереження одного часового процесу. У двоканальному режимі здійснюється періодичне підключення каналів до підсилювача вертикального відхилення променя, що дає можливість на екрані однопроменевої трубки спостерігати два взаємозв'язані процеси.

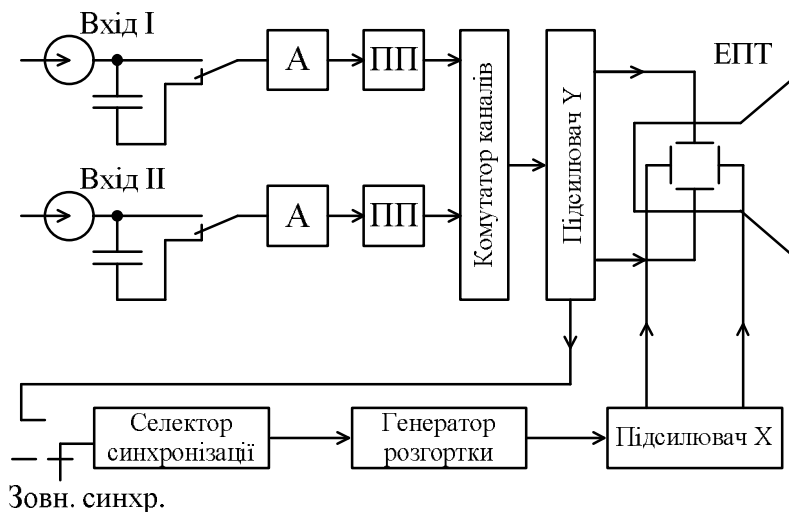






Рисунок 1 – Структурна схема осцилографа

За допомогою вхідних атенуаторів (послаблювачів) встановлюють необхідну чутливість каналу вертикального відхилення променя.

Селектор синхронізації підсилює сигнал до необхідного рівня і перетворює його в імпульси, що запускають генератор лінійнозмінюваної напруги. Лінійнозмінювана напруга через підсилювач X надходить на пластини горизонтального відхилення променя ЕПТ.

На рисунку 2 наведений зовнішній вигляд лицьової панелі осцилографа. Призначення органів керування наведено у таблицях 1–2.

Таблиця 1 – Органи керування ЕПТ

<i>Ручка</i>	<i>Призначення</i>
	Регулює яскравість зображення
	Регулює чіткість (фокус) зображення
	Регулює астигматизм променя
	Регулює освітлення ліній шкали на екрані ЕПТ

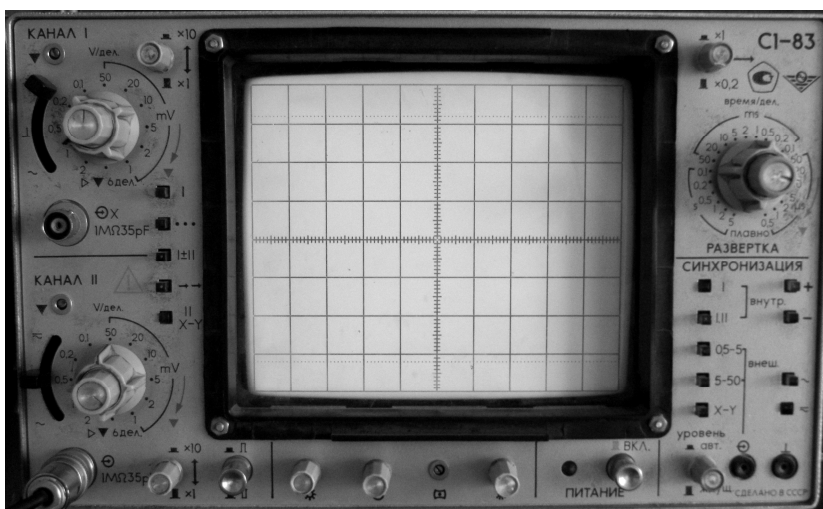





Рисунок 2

Таблиця 2 – Органи керування тракту вертикального відхилення



Ручка	Призначення
V/дел.	Перемикачі встановлення каліброваних коефіцієнтів відхилення каналів I та II
▼	Потенціометри регулювання коефіцієнтів відхилення каналів
▷	Потенціометри забезпечення плавного регулювання коефіцієнтів відхилення обох каналів із перекриттям не менш ніж у 2,5 раза в кожному положенні перемикачів "V/дел."
↕	Потенціометри регулювання положення променів обох каналів по вертикалі
→ 1MΩ3pF	Високочастотні гнізда для подачі досліджуваних сигналів

Перемикачі режиму роботи входів підсилювача в положеннях:

-  - на вхід підсилювача досліджуваний сигнал надходить через роздільний конденсатор (закритий вхід);

-  – на вхід підсилювача досліджуваний сигнал надходить зі сталою складовою (відкритий вхід);
-  – вхід підсилювача підключений до корпусу.

Перемикачі режиму роботи підсилювачів у положеннях:

- "I" – на екрані ЕПТ спостерігається сигнал каналу I;
- "II", "X - Y" – на екрані ЕПТ спостерігається сигнал каналу II;
- "I ± II" – на екрані ЕПТ спостерігається алгебраїчна сума сигналів каналів I та II;
- ". . ." – на екрані спостерігаються зображення сигналів обох каналів, їх перемикання здійснюється з частотою 100 кГц;
- "→→" – на екрані ЕПТ спостерігається зображення сигналів обох каналів, їх перемикання здійснюється в кінці кожного прямого ходу розгортки;
- перемикач інвертування сигналу в II каналі в положеннях:
 -  – фаза сигналу не змінюється;
 -  – фаза сигналу змінюється на 180°.

Перемикачі зміни підсилення каналів у 10 разів суміщені з ручкою \updownarrow в положеннях:

- "x1" – коефіцієнт відхилення каналу відповідає положенню атенюатора;
- "x10" – коефіцієнт відхилення каналу відповідає положенню атенюатора, помноженому на 10.

Органи керування синхронізації:



- потенціометр "РІВЕНЬ" – формує рівень досліджуваного сигналу, при якому відбувається запуск розгортки.

Перемикач джерела синхронізації в положеннях:

- "Внутр. I" – розгортка синхронізується сигналом із першого каналу;
- "Внутр. I, II" – розгортка синхронізується сигналами обох каналів (або одного);
- "0,5-5 Зовніш." – розгортка синхронізується зовнішнім сигналом амплітудою 0,5 – 5 В;

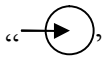
- "5-50 Зовніш." – розгортка синхронізується зовнішнім сигналом амплітудою 5 – 50 В;
- "Х-У" – вхід підсилювача Х відключається від генератора розгортки і підключається до І каналу підсилювача У, робота генератора розгортки припиняється.

Перемикач режиму роботи входу синхронізації в положеннях:

-  – закритий вхід синхронізації;
-  – відкритий вхід синхронізації.

Перемикач полярності синхронізуючого сигналу в положеннях:






- "+" – розгортка синхронізується позитивним перепадом запускаючого сигналу;
- "-" – розгортка синхронізується негативним перепадом запускаючого сигналу;

-  – гніздо для подачі зовнішнього синхронізуючого сигналу.






Органи управління розгорткою:

- перемикач "Время/дел." – встановлює калібрований коефіцієнт розгортки, коли ручка плавного регулювання встановлена в крайнє праве положення;
- ручка "ПЛАВНО" – забезпечує плавне регулювання коефіцієнта розгортки з перекриттям в 2,5 рази в кожному положенні перемикача "Время/дел.";
- потенціометр \leftrightarrow – забезпечує переміщення променя по горизонталі;
- перемикач "x1, x0,2" – збільшує швидкість розгортки в положенні "x0,2" у 5 разів;
- "АВТ" – у цьому режимі виробляється пікоподібна напруга, незалежно від запускаючого сигналу. Синхронізація здійснюється з частотою не нижче 100 Гц;
- "ЖДУЩ" – запуск розгортки здійснюється лише за наявності синхронізуючого сигналу;
- "НАПРУГА" – здійснює включення і виключення приладу.






Органи управління та приєднання, які розміщені на лівій бічній стінці приладу:

- гніздо “” – корпус приладу;
- гніздо “ Y” – вихід першого каналу;
- “  1 kHz” – гніздо виходу калібратора;
- перемикач “” – перемикає вихід калібратора з постійної напруги на змінну типу "Меандр".

Органи управління, які розміщені на правій бічній стінці приладу:

- гніздо “” – корпус приладу;
- гніздо “ ” – гніздо виходу пилоподібної напруги;
- “ x1” – калібрування швидкості розгортки;
- “ x0,2” – калібрування швидкості розгортки при розтягненні.

На задній панелі приладу розміщені:

- роз'єднувач "МЕРЕЖА" – для приєднання шнура живлення до мережі або джерела постійної напруги;
- тримачі запобіжників "2 А" і "1 А";
- тумблер "220 В, 50 Hz, 400 Hz, 115 В 400 Hz" – для перемикання живлення на відповідну напругу мережі;
- тумблер “, ” – для перемикання живлення при роботі від джерела постійної напруги або від мережі змінного струму;
- гніздо “ Z” – для подачі сигналу, що модулює промінь за яскравістю;
- гніздо “” – корпус приладу;
- клема корпусна  – для заземлення корпусу приладу.


2.1.2 Підготовка до проведення вимірювань

1 Пам'ятайте, що прилад може живитися від мережі напругою 220 В або 115 В , частотою 400 Гц ; від мережі напругою 220 В , частотою 50 Гц і від джерела постійної напруги 27 В .


Напруга мережі в лабораторії 220 В , 50 Гц , тому перед включенням приладу переконайтеся у відповідності положень тумблера напруги мережі, розміщеного на задній стінці приладу.


Тумблер “”, ” перемкнуті в положення “”.




2 Включіть тумблер “ЖИВЛЕННЯ” на передній панелі приладу. При цьому повинна світитися сигнальна лампочка. Дайте приладу прогрітися упродовж 2 – 3 хвилин.

3 Установіть яскравість зображення, зручною для спостереження, ручкою “”.


4 Установіть перемикач роду роботи підсилювача в положення “I”.

5 Ручкою “” каналу I сумістіть лінію розгортки з центром екрана.


6 Ручкою “” встановіть однакову чіткість зображення по всій лінії променя.

7 Установіть перемикач “V/дел.” каналу I в положення “ 6 дел.”, а ручку “” – у положення “”.

При правильно відкаліброваному підсилювачі величина зображення імпульсів повинна дорівнювати 6 розподілам.

Якщо величина зображення сигналу не дорівнює 6 розподілам, то потенціометром “”, виведеним під шліць на передню панель, встановіть величину зображення по вертикалі такою, що дорівнює 6 розподілам.

8 Установіть перемикач режиму роботи підсилювача в положення “II” і повторіть операції з пп. 1 – 7.

9 Для калібрування тривалості розгортки встановіть перемикач “V/дел.” каналу I в положення “ 6 дел.”.

Перемикач розгортки “Время/дел.” установіть у положення “ 1 ms ”, а ручку плавного регулювання поверніть вправо до упору.

Перемикач режиму роботи підсилювача установіть у положення "І" і на екрані ЕПТ рукояткою потенціометра "РІВЕНЬ" досягніть сталого зображення.

За допомогою ручки " \leftrightarrow " сполучіть один із фронтів імпульсу на початковій ділянці розгортки з першою вертикальною лінією на екрані ЕПТ.

Відрахуйте десять періодів сигналу калібратора і потенціометром " ∇ x1" (права стінка приладу) скорегуйте зображення таким чином, щоб десятий період збігався з десятою вертикальною лінією шкали на екрані ЕПТ.

Установіть ручку перемикача "x1; x0,2", поєднану з ручкою потенціометра " \leftrightarrow ", в положення "x0,2".

Переключіть перемикач розгортки в положення "5" і за допомогою потенціометра " ∇ x0,2" (права стінка приладу) скорегуйте зображення таким чином, щоб десять періодів сигналу калібратора збігалося з десятьма поділками шкали екрана ЕПТ.

3 Порядок виконання роботи

3.1 Підготовка осцилографа до роботи згідно з п. 2.1.2.

3.2 Підготовка до роботи генератора сигналів спеціальної форми Г6-27 і генератора імпульсів Г5-54.

3.3 Вимірювання параметрів гармонічного сигналу.

3.3.1 Підключіть вихід генератора до входу будь-якого з каналів осцилографа.

3.3.2 Установіть перемикач режиму на необхідний канал.

3.3.3 За допомогою осцилографа виміряйте амплітуду і діюче значення сигналу для трьох значень сигналу за вказівкою викладача, для чого виконайте такі операції:

1) поставте перемикачі "V/дел." і "x1, x10" у таке положення, щоб повний розмах сигналу становив більше половини шкали;

2) перемикач  \perp  переведіть у положення  ;

3) ручкою "рівень" установіть стійке зображення. Переведіть перемикач "Время/дел." у положення, при якому спостерігається кілька періодів досліджуваного сигналу;

4) установіть ручку "↓" вертикального зсуву так, щоб зображення сигналу знаходилося симетрично щодо центра екрана;

5) ручкою горизонтального переміщення "↔" змістіть зображення так, щоб один із верхніх піків знаходився на вертикальній середній лінії шкали (рис. 3);

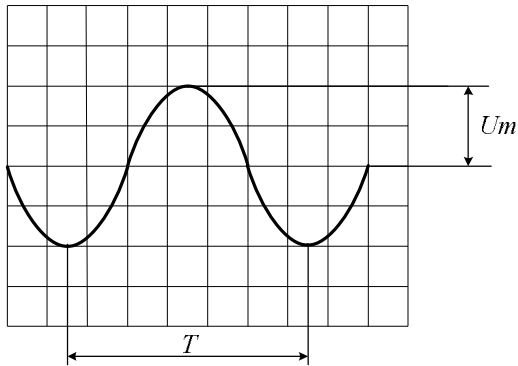


Рисунок 3 – Вимірювання амплітуди і періоду імпульсів

6) виміряйте відстань у поділках між віссю симетрії і верхньою точкою амплітуди. Ручка повинна бути встановлена в крайньому правому положенні;

7) помножте відстань, виміряну вище, на покази перемикачів "V/дел." і "x1, x10".

Результати вимірювань занесіть до протоколу і визначте похибку вимірювань.

Примітка. Цей метод може бути використаний для визначення напруги між двома будь-якими точками сигналу.

Приклад. Розмах вертикального відхилення становить 3,2 поділу, перемикач "V/дел." встановлено в положення "5 mV", перемикач "x1, x10" встановлено в положення "x10".

Напруга амплітуди становить

$$U_m = 3,2 \text{ под.} \cdot 10 \cdot 5 \text{ mV} / \text{дел.} = 100 \text{ mV}.$$

3.3.4 Для трьох значень (за вказівкою викладача) виміряйте період гармонійного сигналу, для чого виконайте такі операції:

- 1) установіть перемикач "V/дел." у таке положення, щоб зображення на екрані становило близько 5 – 7 поділок;
- 2) установіть перемикач "Время/дел." у такий стан, при якому період сигналу буде займати менше 10 поділок;
- 3) установіть ручкою "РІВЕНЬ" стійке зображення на екрані ЕПТ;
- 4) перемістіть ручкою "↕" зображення так, щоб воно розмістилося симетрично центру екрана;
- 5) установіть ручкою "↔" зображення так, щоб період досліджуваного сигналу знаходився в межах десяти центральних поділок сітки (рис. 3);
- 6) виміряйте горизонтальну відстань, що відповідає періоду досліджуваного сигналу;
- 7) помножьте відстань, виміряну вище, на коефіцієнт розгортки і положення перемикача "x1, x0,2".

Результати вимірювань занесіть до протоколу.

Примітка. Цей метод може бути використаний для вимірювання тривалості сигналу між двома будь-якими точками, а не лише для вимірювання періоду.

Приклад. Відстань між виміряними точками становить 8 поділок (рис. 2), перемикач "Время/дел." установлений у положення "0,2 mS", а перемикач "x1, x0,2" установлений у положення "x1". Період проходження сигналу буде

$$T = 0,2 mS \cdot 8 \cdot 1 = 1,6 mS .$$

3.3.5 Визначте частоту трьох сигналів за вказівкою викладача, для чого виконайте таке:

- 1) виміряйте тривалість часу одного періоду сигналу, як описано в п. 3.3 (рис. 3);
- 2) розрахуйте частоту сигналу f_c за формулою

$$f_c = 1/T ,$$

де f_c – частота сигналу, Гц;

T – тривалість періоду, с.

Результати занесіть у протокол.

Приклад. Частота сигналу з тривалістю періоду $10^{-3} c$ дорівнюватиме

$$f_c = 1/(1 \cdot 10^{-3} c) = 1000 \text{ Гц} .$$

3.4 Вимірювання параметрів імпульсного сигналу.

3.4.1 Підключіть вихід генератора до входу будь-якого з каналів осцилографа.

3.4.2 Установіть перемикач режиму на необхідний канал.

3.4.3 Виміряйте амплітуду сигналу для трьох значень за вказівкою викладача (рис. 4).

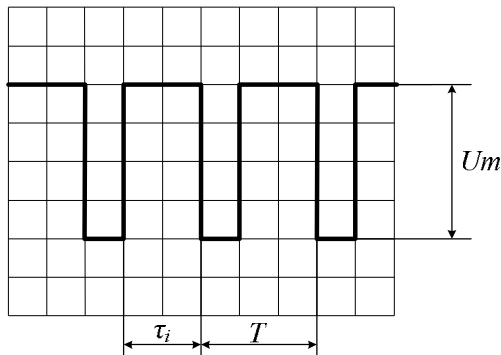


Рисунок 4 – Вимірювання амплітуди, періоду та шпаруватості імпульсів

Проведення вимірювання описано в п. 3.3.3.

Результати вимірювань занесіть до протоколу.

3.4.4 Для трьох значень за вказівкою викладача виміряйте період проходження імпульсів, як описано в п. 3.3.4.

Результати вимірювань занесіть до протоколу.

3.4.5 Користуючись даними п. 3.4.4, обчисліть частоту проходження імпульсів.

Результати вимірювань занесіть до протоколу.

3.4.6 Для трьох послідовностей імпульсів (п. 3.4.4) виміряйте тривалість імпульсу τ_i .

3.4.7 На підставі вимірів 3.4.4 – 3.4.6 визначте шпаруватість імпульсів за формулою

$$Q = T / \tau_i,$$

де Q – шпаруватість імпульсів;

T – період проходження;

τ_i – тривалість імпульсу.

Результати вимірювань занесіть до протоколу.

4 Зміст звіту

4.1 Структурна схема осцилографа.

4.2 Осцилограми вимірюваних сигналів.

4.3 Таблиці з обчисленими значеннями параметрів сигналів.

5 Питання для контролю і самоперевірки

5.1 Поясніть пристрій і принцип дії осцилографа С1-33 за структурною схемою (рис. 1).

5.2 Поясніть утворення фігур на екрані ЕПТ при подачі на пластини "Y" синусоїдальної напруги, а на пластини "X" – пилоподібної напруги.

5.3 Поясніть метод вимірювання амплітуди сигналів.

5.4 Поясніть метод вимірювання тривалості та частоти сигналів.

5.5 Принцип синхронізації та її необхідність.

5.6 Умова стійкості зображення.

Лабораторна робота 2

ПІДСИЛЮВАЛЬНІ КАСКАДИ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи – дослідження основних параметрів і характеристик підсилювальних каскадів на біполярному транзисторі зі спільним емітером (СЕ), спільним колектором (СК), спільною базою (СБ).

1 Підготовка до виконання роботи

1.1 Вивчити схему заміщення транзистора у фізичних параметрах.

1.2 Вивчити схеми включення транзисторів у підсилювальних каскадах: СЕ, СК, СБ.

Звернути особливу увагу на способи задання режиму роботи транзистора за постійним струмом.

1.3 Розрахувати вхідні і вихідні опори каскадів СЕ, СК, СБ, а також їх коефіцієнти підсилення за напругою K_U , струмом K_I і потужністю K_P . Результати розрахунків занести до таблиці 3.

При розрахунку використовувати такі параметри:

$$r_{\sigma} = 200 \text{ Ом}; \quad \beta = 50; \quad R_K = 6,2 \text{ кОм};$$

$$R_{\sigma} = 50 \text{ кОм}; \quad R_{E1} = 1 \text{ кОм}; \quad R_{E2} = 0;$$

$$R_c = 5 \text{ Ом}; \quad \alpha = 0,98; \quad I_{0E} = 1 \text{ мА}.$$

У розрахунках вважати величину опору навантаження $R_H = \infty$.

1.4 Ознайомитися з описанням лабораторної установки, вивчити порядок виконання і запису результатів.

1.5 Підготувати протокол з необхідними таблицями, заготовками для графіків, принциповими схемами і розрахунковими формулами.

Таблиця 3 – Результати розрахунків параметрів підсилювальних каскадів

Параметр каскаду	СЕ				СК		СБ	
	Теор.		Експ.		Теор.	Експ.	Теор.	Експ.
	$R_E = 0$	$R_E = 1\kappa$	$R_E = 1\kappa$	$R_E = 0$				
Вхідний опір R_{ex}								
Вихідний опір R_{ex}								
Коефіцієнт підсилення за напругою K_U								
Коефіцієнт підсилення за струмом K_I								
Коефіцієнт підсилення за потужністю K_P								

2 Теоретичні відомості

Основними параметрами будь-якого підсилювального каскаду є:

- вхідний опір каскаду $R_{\text{вх}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta I_{\text{вх}}}$;

- вихідний опір каскаду $R_{\text{вих}} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta I_{\text{вих}}}$;

- коефіцієнт підсилення за напругою $K_U = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$;

- коефіцієнт підсилення за струмом $K_I = \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}}$;

- коефіцієнт підсилення за потужністю $K_P = K_U \cdot K_I$.

У загальному випадку перелічені вище параметри залежать від частоти.

Під час аналізу підсилювальних каскадів на транзисторах використовується модель транзистора у фізичних параметрах (рис. 5).

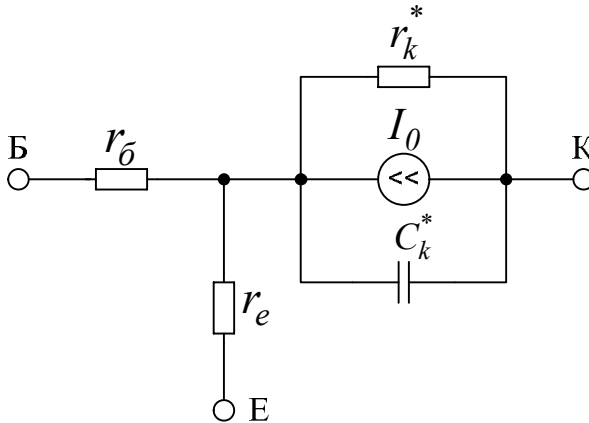


Рисунок 5 – Модель транзистора у фізичних параметрах

Кожен елемент моделі має фізичний сенс:

- r_{σ} – об’ємний опір бази ($r_{\sigma} = 20 - 200 \text{ Ом}$);

- $r_E = \frac{0,026}{I_{CE}}$ – динамічний опір базно-емітерного переходу,

де I_{CE} – струм спокою емітера;

- $r_k^* = \frac{r_k}{\beta + 1}$, де r_k – динамічний опір колекторного

переходу;

- $\beta(h_{21E})$ – статичний коефіцієнт передачі струму бази за схемою з СЕ;

- $C_k^* = \frac{C_k}{\beta + 1}$, де C_k – динамічна ємність колектора;

- I_0 – еквівалентний генератор струму;

- $I_0 = \beta I_{\sigma}$ – у схемі включення зі СЕ, СК;

- $I_0 = \alpha I_E$ – у схемі включення зі СБ;

- $\alpha, (h_{21\sigma})$ – статичний коефіцієнт передачі струму емітера.

Оскільки параметри транзистора нелінійні й залежать від режиму роботи транзистора, то названа модель є справедливою лише при малих сигналах.

Через фізичні параметри можна визначити динамічні параметри підсилювального каскаду в будь-якій схемі включення.

2.1 Підсилювальний каскад зі спільною базою (СБ)

Робоча схема каскаду СБ наведена на рисунку 6. За змінним струмом спільною точкою вхідного (емітерно-базового) і вихідного (колекторно-базового) ланцюгів є база, яка заземлена через конденсатор C_{σ} . Робочий режим за постійним струмом задається за допомогою опорів R_1, R_2, R_E .

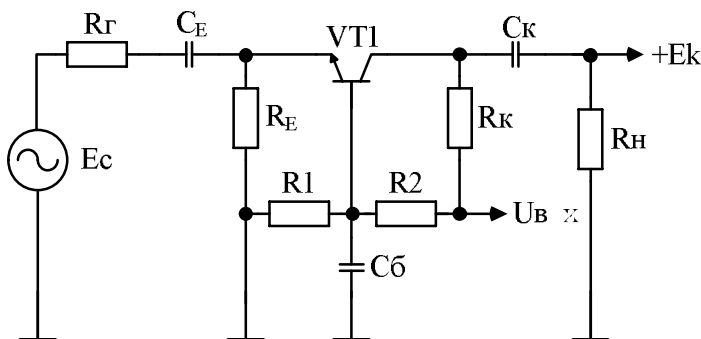


Рисунок 6 – Підсилювальний каскад зі спільною базою

При включенні підсилювального каскаду за схемою СБ він має низький вхідний опір (десятки Ом)

$$R_{\text{вх}}^{\text{СБ}} = \frac{0,026}{I_{\text{СЕ}}} + (1 - \alpha)r_{\text{б}},$$

і високий вихідний опір $R_{\text{вих}}^{\text{СБ}} \approx R_{\text{К}}$.

Коефіцієнт підсилення за струмом каскаду менше одиниці такий:

$$K_I^{\text{СБ}} = \alpha \frac{R_2}{R_2 + R_{\text{вх}}^{\text{СБ}}} \cdot \frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{К}} + R_{\text{Н}}}.$$

Коефіцієнт підсилення за напругою, головним чином, залежить від опору навантаження:

$$K_U^{\text{СБ}} = \alpha \frac{R_{\text{К}} \parallel R_{\text{Н}}}{R_2 + R_{\text{вх}}^{\text{СБ}}},$$

і в практичних випадках може бути більше 100.

2.2 Підсилювальний каскад зі спільним емітером (СЕ)

Схема каскаду СЕ відрізняється лише тим, що сигнал генератора подається не в емітер, який через конденсатор C_E заземляється за змінним струмом, а в базу транзистора (рис. 7), тобто в цьому випадку емітер стає спільною точкою для вхідного і вихідного сигналів.

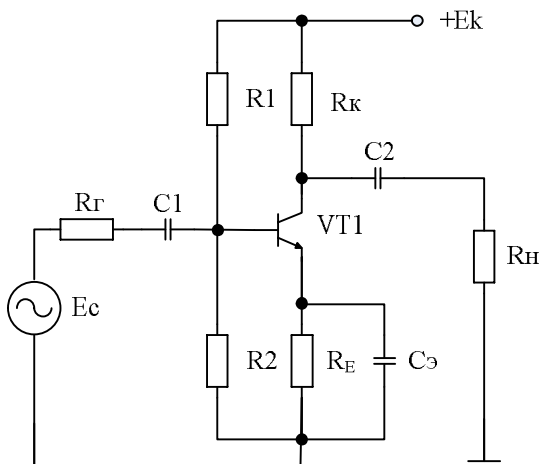


Рисунок 7 – Підсилювальний каскад зі спільним емітером

Вхідний опір підсилювального каскаду за схемою СЕ приблизно в β разів більше, ніж за схемою СБ:

$$R_{вх}^{CE} = \left[r_{\delta} + (1 + \beta) \left(\frac{0,026}{I_{CE}} + R_E \right) \right] \parallel R_{\delta}.$$

Вихідний опір дорівнює

$$R_{вих}^{CE} \approx R_K \parallel R_H.$$

Коефіцієнт підсилення за струмом значно більший, ніж у схемі з СБ:

$$K_I^{CE} = \beta \frac{R_2}{R_2 + R_{вх}^{CE}} \cdot \frac{R_K}{R_K + R_H}.$$

Коефіцієнт підсилення за напругою також, як і у схемі з СБ, значно більший одиниці:

$$K_U^{CE} = - \frac{\beta (R_K \parallel R_H)}{R_2 + R_{вх}^{CE}}.$$

2.3 Підсилювальний каскад СК (емітерний повторювач)

Схема каскаду СК наведена на рисунку 8.

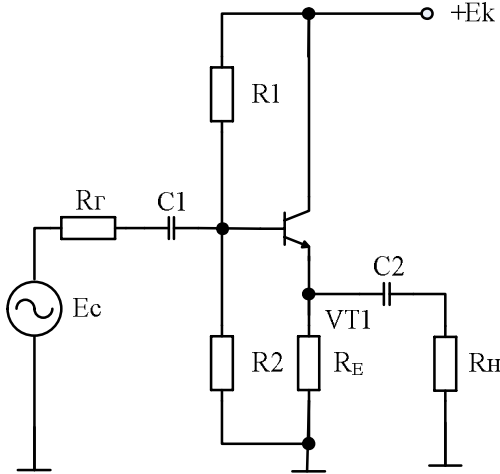


Рисунок 8 – Підсилювальний каскад СК (емітерний повторювач)

Значною різницею є високий вхідний опір (десятки – сотні $\kappa\text{Ом}$)

$$R_{\text{вх}}^{\text{СК}} = \left[r_{\text{б}} + (1 + \beta) \left(\frac{0,026}{I_{\text{ОЕ}}} + R_{\text{Е}} \parallel R_{\text{Н}} \right) \right] \parallel R_{\text{б}}$$

і низький вихідний опір (одиниці-десятки Ом)

$$R_{\text{вих}}^{\text{СК}} = \left(\frac{0,026}{I_{\text{ОЕ}}} + \frac{R_{\text{з}} + R_{\text{б}}}{1 + \beta} \right) \parallel R_{\text{Е}}$$

Коефіцієнт підсилення за струмом підсилювального каскаду зі СК значно більше одиниці і дорівнює

$$K_I^{\text{СК}} = (1 + \beta) \frac{R_{\text{з}}}{R_{\text{з}} + R_{\text{вх}}^{\text{СК}}} \cdot \frac{R_{\text{Е}}}{R_{\text{Е}} + R_{\text{Н}}}$$

Коефіцієнт підсилення за напругою не набагато менше одиниці (0,9 – 0,95) і дорівнює

$$K_U^{CK} = \frac{(1 + \beta)(R_E \parallel R_H)}{R_2 + r_6 + (1 + \beta) \left(\frac{0,026}{I_{CE}} + R_E \parallel R_H \right)}$$

При цьому зі збільшенням вихідного опору каскаду він зменшується.

3 Лабораторна установка

До складу лабораторної установки входять: універсальний лабораторний стенд із модулем ДЗ, генератор типу Г6-27, магазин опорів типу Р-33, двоканальний осцилограф типу С1-83.

Спрощена схема лабораторної установки наведена на рисунку 9.

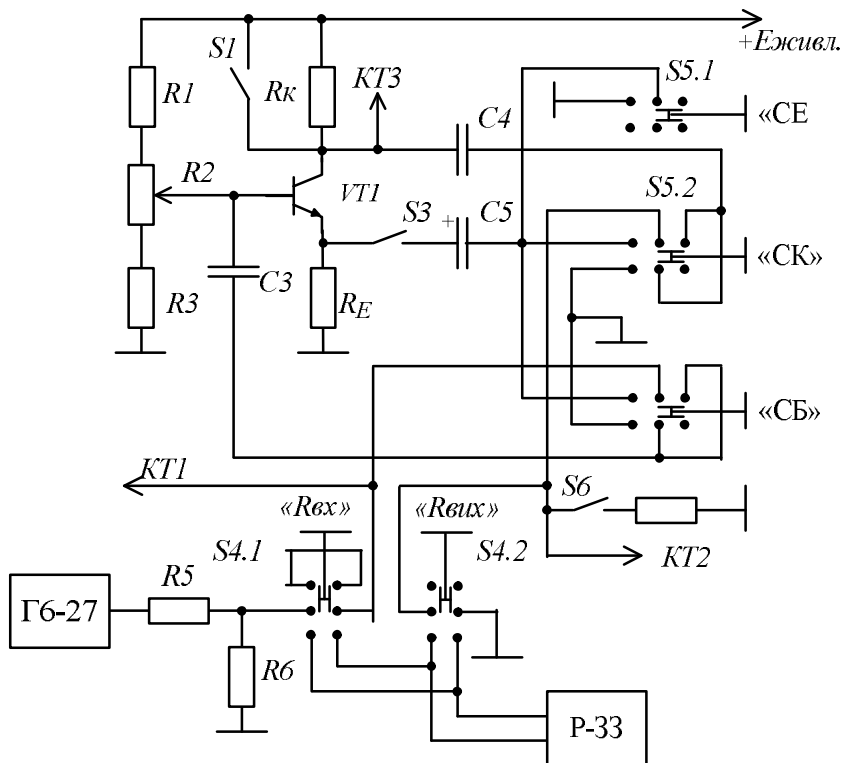


Рисунок 9 – Спрощена схема лабораторної установки

Її особливістю є те, що режим роботи транзистора за постійним струмом однаковий для всіх типів досліджуваних підсилювальних каскадів, що особливо важливо для проведення порівняльного аналізу.

Режим роботи транзистора за постійним струмом регулюється потенціометром $R2$ в ланцюзі базового подільника напруги. Резистори $R1$, $R3$ призначені для обмеження меж регулювання.

Вибір досліджуваного каскаду досягається натисканням відповідної кнопки перемикача $S5$.

При натиснутій кнопці «СЕ» вхідний сигнал через роздільний конденсатор $C3$ надходить на базу транзистора, а вихідний – знімається через конденсатор $C4$. Емітер транзистора в цьому випадку є спільною шиною вхідного і вихідного ланцюгів за змінним струмом (каскад СЕ). Каскад може працювати з від'ємним зворотним зв'язком як за постійним так і за змінним струмами (ключ $S3$ розімкнутий), так і з від'ємним зворотним зв'язком лише за постійним струмом (ключ $S3$ замкнутий).

При натиснутій кнопці «СК» колектор транзистора опиняється з'єднаним через роздільний конденсатор $C4$ зі спільною шиною. Вихідний сигнал знімається уже з емітера через роздільний конденсатор $C5$ (ключ $S3$ повинен бути замкнутим).

Вхідний сигнал подається через конденсатор $C3$ на базу транзистора, і таким чином реалізується підсилювальний каскад за схемою СК. Ключ $S1$ призначений для шунтування гасильного резистора R_K в ланцюгу колектора, що дозволяє досліджувати вплив колекторної напруги на властивості і характеристики каскаду.

При натиснутій кнопці «СБ» база транзистора з'єднана через розділювальний конденсатор $C3$ зі спільною шиною. Вихідний сигнал знімається з колектора через $C4$. Вхідний сигнал подається через $C5$ на емітер транзистора (ключ $S3$ повинен бути замкнутий).

Для вимірювання вхідного і вихідного опорів підсилювальних каскадів на платі модуля передбачений кнопковий перемикач $S4$. При натисканні кнопки « R_{ex} » послідовно з джерелом сигналу включається магазин опорів типу P-33. При натиснутій кнопці « $R_{вих}$ » магазин опорів через конденсатор $C4$ (каскад зі СЕ) або через $C5$ (каскад із СК) підключається до виходу досліджуваного каскаду. На платі модуля є контрольні точки КТ1 - КТ3 для спостереження форми сигналу в характерних точках схеми.

4 Порядок виконання роботи

4.1 Підготувати генератор Г6-27 до роботи, для чого необхідно:

- установити частоту сигналу 1 кГц ;
- перемикач «Режим роботи» встановити в положення «~»;
- установити ручку регулювання вихідного сигналу в крайнє ліве положення;
- включити тумблер «Мережа»;
- включити живлення лабораторного стенда.

4.2 Змінюючи величину вхідної напруги, зняти і побудувати графічно амплітудні характеристики $U_{вих} = f(U_{вх})$ таких підсилювальних каскадів:

- спільний емітер (СЕ) із зворотним зв'язком за змінним струмом (ключі $S1$ і $S3$ розімкнути);
- спільний емітер (СЕ) без зворотного зв'язку за змінним струмом (ключ $S3$ замкнути, $S1$ розімкнути);
- спільний колектор (СК) без опору в ланцюзі колектора (ключі $S1$ і $S3$ замкнути);
- спільна база (СБ) ключ $S1$ розімкнути, $S3$ замкнути.

Примітка. Для зняття амплітудної характеристики каскаду необхідно попередньо визначити інтервал зміни вхідного сигналу. Нижня межа $U_{вх.min}$ визначається рівнем відповідних шумів і наведень, верхня $U_{вх.max}$ – появою спотворень форми вихідного сигналу на екрані осцилографа.

Визначити динамічний діапазон підсилення каскадів за формулою

$$D_U(\text{дб}) = 20 \lg \frac{U_{\text{вих.max}}}{U_{\text{вих.min}}}.$$

4.3 На частоті 1 кГц при $U_{\text{вх}} = 20 \text{ мВ}$ виміряти вхідний опір каскаду СБ, для чого необхідно:

- натиснути кнопку вибору каскаду СБ;
- розімкнути $S1$, замкнути $S3$;
- установити ручки магазину опорів Р-33 у положення «0» Ом;
- включити магазин опорів послідовно з джерелом вхідного сигналу, для чого натиснути кнопку « $R_{\text{вх}}$ » перемикача $S4$;
- обертанням ручок магазину досягти зменшення амплітуди вхідного сигналу в 2 рази;
- зняти показники магазину опорів, що відповідають вхідному опору досліджуваного каскаду, і результат занести до таблиці 3.

Перенести перемикач $S5$ у положення «СК» (ключ $S1$ розімкнути, $S3$ замкнути), провести вимірювання вхідного опору.

Перевести перемикач $S5$ у положення «СЕ». Провести вимірювання вхідного опору для двох схем включення:

- зі зворотним зв'язком за змінним струмом ($S1$ розімкнутий, $S3$ розімкнутий);
- без зворотного зв'язку за змінним струмом ($S1$ розімкнутий, $S3$ замкнутий).

4.4 На частоті 1 кГц $U_{\text{вх}} = 20 \text{ мВ}$ виміряти вхідний опір каскаду СБ. Для чого необхідно:

- перемикач $S5$ перевести в положення «СБ»;
- розімкнути $S1$, замкнути $S3$;
- установити ручки магазину опорів у положення «99999» Ом;
- перемикач $S4$ перевести в положення « $R_{\text{вих}}$ »;
- обертанням ручок магазину опорів досягти зменшення величини вихідної напруги в 2 рази;

- зняти показники магазину опорів, що відповідають вихідному опору досліджуваного каскаду, і результат занести до таблиці 3.

Перевести перемикач $S5$ у положення «СК» (ключ $S1$ розімкнути, $S3$ замкнути), провести вимірювання вихідного опору.

Перевести перемикач $S5$ у положення «СЕ». Провести вимірювання вхідного опору для двох схем включення:

- зі зворотним зв'язком за змінним струмом ($S1$ розімкнути, $S3$ розімкнути);

- без зворотного зв'язку за змінним струмом ($S1$ розімкнути, $S3$ замкнути).

4.5 На основі вимірювань визначити експериментально значення коефіцієнтів підсилення досліджуваних каскадів:

- за напругою $K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}$;

- за струмом $K_I = K_U \frac{R_{вх}}{R_{вих}}$;

- за потужністю $K_0 = K_U \cdot K_I$.

Результати розрахунків занести до таблиці 3.

4.6 Для каскаду з СЕ без негативного зворотного зв'язку (натиснута кнопка «СЕ», $S3$ замкнути) зняти амплітудно-частотну характеристику. Для цього необхідно:

- змінюючи частоту від 100 Гц до 100 кГц та підтримуючи напругу на вході підсилювача $U_{вх} = 20 \text{ мВ}$, зняти залежність вихідної напруги від частоти (5-6 точок в областях зростання та зменшення АЧХ);

- побудувати амплітудно-частотну характеристику, за якою визначити нижню і верхню граничні частоти коефіцієнта підсилення.

Результати вимірювань занести до протоколу.

4.7 Виконати послідовність дій п. 4.6 для каскаду зі СЕ із негативним зворотним зв'язком (нажата кнопка «СЕ», $S3$ розімкнути).

5 Зміст звіту

- 5.1 Титульний аркуш.
- 5.2 Електрична схема досліджуваних каскадів.
- 5.3 Таблиці з результатами вимірювань і розрахунків.
- 5.4 Висновки про виконану роботу.

6 Запитання для самоперевірки

6.1 Накресліть електричну принципіальну схему підсилювальних каскадів СЕ, СК. Поясніть призначення елементів.

6.2 Поясніть залежність $R_{вх}$ і K_U від струму емітера I_{OE} .

6.3 Порівняйте каскади СЕ і СК за їх основними параметрами і характеристиками.

6.4 Назвіть і накресліть реалізації основних способів задання режиму біполярних транзисторів за постійним струмом.

6.5 Поясніть побудову навантажувальної прямої транзистора. Чим відрізняється навантажувальна пряма за постійним і за змінним струмами.

6.6 Поясніть вплив температури на роботу підсилювального каскаду.

6.7 Поясніть принципи роботи схем емітерної та колекторної температурної стабілізації.

Лабораторна робота 3

ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ І ЙОГО ОСНОВНІ ЗАСТОСУВАННЯ В АПАРАТУРІ

Мета роботи – ознайомитися з основними параметрами операційного підсилювача (ОП) та набутти практичних навичок складання та дослідження діючих макетів аналогових пристроїв на основі ОП: підсилювачів з інвертуванням та без інвертування, суматора сигналу, підсилювача з диференціальним входом, підсилювача змінного струму.

1 Теоретичні відомості

Операційним підсилювачем називають диференціальний підсилювач постійного струму, що володіє великим коефіцієнтом посилення ($K_d > 10^3$) і призначений для роботи з лінійними і нелінійними зворотними зв'язками.

Ідеальний ОП повинен володіти як мінімум:

- диференціальним коефіцієнтом посилення $K_d \rightarrow \infty$;
- вхідним опором для диференціального сигналу $R_{вх} \rightarrow \infty$;

і, як наслідок, вхідними струмами:

- $I_{вх1}, I_{вх2} \rightarrow 0$;
- відсутністю дрейфу вихідної напруги;
- відсутністю похибки підсилення постійної складової.

Параметри реальних інтегральних ОП відрізняються від параметрів ідеального ОП. Для аналізу і розрахунку схем на ОП використовується еквівалентна схема, яка відображає як властивості, так і джерела помилок ОП.

Еквівалентний генератор вихідної напруги містить дві складові:

- корисний сигнал $E_{вих}^{кор} = K_d (U_{вх2} - U_{вх1})$;
- сигнал синфазної похибки $E_{вих}^{син} = K_{синф} \frac{U_{вх1} + U_{вх2}}{2}$,

де $K_{синф}$ – коефіцієнт підсилення синфазної складової.

Використовуючи поняття коефіцієнта ослаблення синфазного сигналу (КОСС)

$$КОСС = \frac{K_D}{K_{\text{синф}}}$$

можна визначити сигнал синфазної похибки

$$E_{\text{вих}}^{\text{син}} = \frac{K_D}{K_{\text{КОСС}}} \cdot \frac{U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}}{2}.$$

Еквівалентні генератори струмів $I_{\text{вх}1}$, $I_{\text{вх}2}$ і напруги $U_{\text{зс}}$ ураховують джерела похибок посилення сталої складової в ОП.

Величина $U_{\text{зс}}$, що називається напругою зміщення нуля, чисельно дорівнює напрузі, яку необхідно докласти до входів ОП при відсутності синфазного сигналу, щоб отримати вихідну напругу, що дорівнює нулю.

Опір $R_{\text{зс}}$ є вхідним опором для диференціального сигналу, а $R_{\text{вх}1}$, $R_{\text{вх}2}$ – вхідні опори для синфазного сигналу. Як правило, $R_{\text{вх}1} = R_{\text{вх}2}$ і для більшості схем їх впливом нехтуємо.

2 Підготовка до виконання роботи

2.1 Вивчити пристрій, основні параметри та характеристики ОП.

2.2 Вивчити способи подачі сигналу в ОП та основні похибки посилення сталої складової.

2.3 Накреслити схему підсилювача на ОП без інвертування і вибрати номінали резисторів таким чином, щоб забезпечити коефіцієнти підсилення сигналу 11 і 6,5. Резистори необхідно брати з наявних на платі модуля Д8.

2.4 Накреслити схему підсилювача постійного струму на ОП з інвертуванням, розрахувати і вибрати резистори, що забезпечують коефіцієнти посилення сигналу – 10 і 5,1.

2.5 Накреслити схему повторювача напруги на ОП.

2.6 Накреслити схему підсилювача з диференціальним входом на ОП і підібрати резистори, при яких досягається десятиразове посилення різниці вхідних сигналів.

2.7 Ознайомитися з описом лабораторної установки, вивчити порядок виконання роботи і запису результатів.

2.8 Підготувати протокол із необхідними схемами, розрахунковими формулами і заготовками для графіків.

3 Лабораторна установка

До складу лабораторної установки входять: універсальний лабораторний стенд із модулем Д8, генератор синусоїдальних коливань типу Г3-33, генератор імпульсів Г5-54, двоканальний осцилограф типу С1-83.

Модуль Д8 виконаний у вигляді макетної плати, на якій є: інтегральний операційний підсилювач типу 140УД1А, набір резисторів і конденсаторів різних номіналів. Крім того, на платі є ряд контактних гнізд, з'єднаних із виходами:

- генератора синусоїдальних сигналів (гніздо Г1);
- генератора імпульсів (гніздо Г2);
- джерела постійної напруги (гніздо Г3);
- джерела компенсаційного напруги (гніздо Г4).

Регулювання напруги здійснюється відповідними потенціометрами.

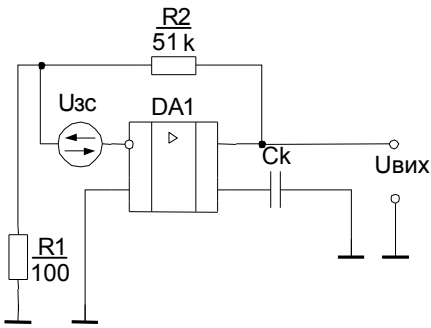
Монтаж схем для дослідження проводиться за допомогою гнучких провідників. **Живлення стенда при монтажі повинне бути відключене!**

4 Порядок виконання роботи

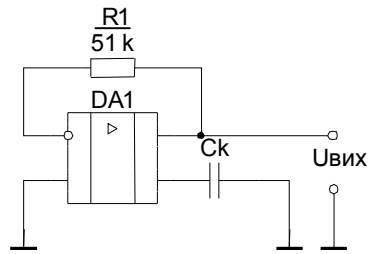
На рис. 10 а, б, в подані схеми для вимірювання вхідних параметрів ОП, таких, як напруга зсуву нуля U_{zc} , вхідних струмів I_{ex1} , I_{ex2} і їх різниці ΔI_{ex} .

На рисунку 10 г, і, д, е, є наведені найбільш часто використовувані в аналоговій техніці пристрої на ОП:

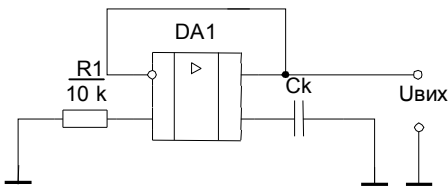
- г – повторювач напруги;
- і – підсилювач на ОП без інвертування;
- д – підсилювач на ОП з інвертування;
- е – схема з компенсацією вхідних струмів;
- є – підсилювач змінного струму.



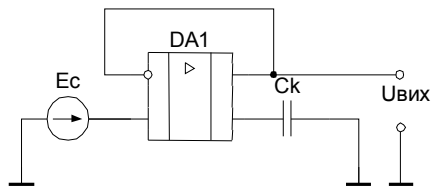
а



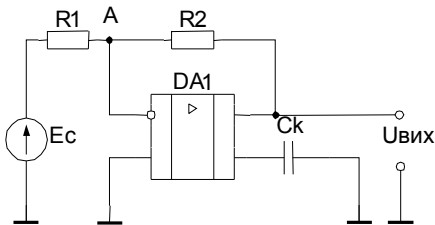
б



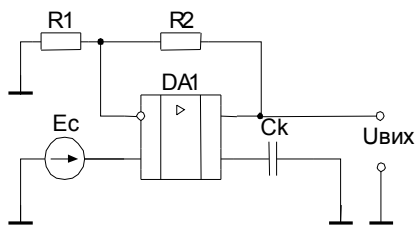
в



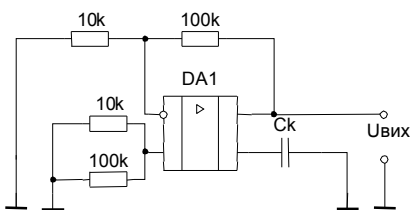
г



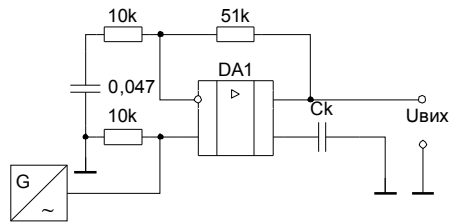
д



е



ж



з

Рисунок 10 – Основні схеми включення ОП

4.1 Визначити напругу зсуву U_{zc} .

Для цього зібрати схему, показану на рис. 10 а, включити живлення стенда і виміряти величину вихідної напруги. Напруга зміщення нуля розраховується за формулою

$$U_{zc} = U_{вих} \frac{R1}{R1 + R2}.$$

4.2 Визначити вхідні струми ОП.

Зібрати схему рис. 10 б, включити живлення стенда і виміряти величину вихідної напруги. Вхідний струм $I_{вх_1}$ (на вході інвертування) розраховується за формулою

$$I_{вх_1} = (U_{вих_1} - U_{zc}) \frac{1}{R1}.$$

Провівши вимірювання в пристрої за схемою рис. 10 в, розрахувати вхідний струм $I_{вх_2}$ (на вході без інвертування)

$$I_{вх_2} = (U_{вих_2} - U_{zc}) \frac{1}{R1}.$$

Різницевий струм визначається за формулою

$$\Delta I_{вх} = (I_{вх_1} - I_{вх_2}).$$

4.3 Дослідити підсилювач на ОП без інвертування.

Зібрати схему на рис. 10 д. Елементи схеми повинні бути визначені згідно з п. 2.4. Подавши на вхід напругу 0,2 – 0,4 В, розрахувати практичний коефіцієнт підсилення каскаду за напругою.

4.4 Приєднати неінвертувальний вхід ОП до загальної шини і виміряти напругу помилки схеми.

4.5 Дослідити підсилювач постійного струму з інвертуванням, елементи якого були розраховані згідно з п. 2.3. Загальна схема включення підсилювача наведена на рис. 10 г.

Установивши величину напруги вхідного сигналу 0,5 В, виміряти вихідну напругу ОП і розрахувати практичний коефіцієнт підсилення за напругою. Приєднавши вхід підсилювача до загальної шини, виміряти зміщення вихідної

напруги при $K_U = -10$, а потім, змінивши схему, як показано на рис. 10 *е*, повторити вимірювання. Зіставити отримані результати і зробити необхідні висновки.

4.6 Зібрати повторювач напруги на ОП (рис. 10 *з*), подати з гнізда Г5 напругу $0,8\text{ В}$. Виміряти вихідну напругу ОП і розрахувати практичний коефіцієнт підсилення схеми. Результати занести до протоколу.

4.7 Дослідити спосіб компенсації напруги усунення нуля, для чого в точку А підсилювача за схемою 10 *г* подати компенсуючи напругу. Змінюючи положення потенціометра, визначити діапазон зміни вихідного сигналу, а потім компенсувати напругу зміщення нуля. Результати занести до протоколу.

4.8 Дослідити підсилювач змінного струму з інвертуванням на ОП, схема якого на рис. 10 *є*. На частоті 1 МГц визначити практичний коефіцієнт підсилення, зіставити експериментальне і теоретичне значення коефіцієнта підсилення K_U і побудувати в напівлогарифмічному масштабі частотну характеристику підсилювача при напрузі на вході, що дорівнює $\leq 0,2\text{ В}$.

5 Питання для самоперевірки

5.1 Назвіть основні параметри ОП.

5.2 Накресліть схему підсилювача без інвертуванням з ланцюгом корекції напруги зсуву нуля. Поясніть призначення елементів.

5.3 Порівняйте підсилювачі на ОП з інвертуванням і без інвертування з точки зору величини вхідного опору і коефіцієнта підсилення.

5.4 Як зміниться частотна характеристика підсилювача з інвертуванням, якщо паралельно резистору зворотного зв'язку приєднати конденсатор?

5.5 Накресліть основні способи подачі сигналу в ОП.

5.6 Назвіть основні похибки підсилення сталої складової в операційних підсилювачах.

Список літератури

1. Осциллограф универсальный С1-83; ТО и ИЭ. – Альбом №1, 1988.
2. Банда Л. И. Электрические измерения : учебник для вузов / Л. И. Банда, Е. М. Душин; Под ред. А. В. Фремке и Е. М. Душина. – 5-е изд. – Л. : Энергия, 1980.
3. Генератор импульсов Г5-54. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
4. Забродин Ю. С. Промышленная электроника / Ю. С. Забродин. – М. : Высш. школа, 1982.
5. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / И. П. Степаненко. – М. : Энергия, 1977.
6. Гусев В. Г. Электроника / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М.: Высш. школа, 1991.
7. Лихачев В. Д. Практические схемы на операционных усилителях / В. Д. Лихачев – М. : Изд-во ДОСААФ СССР, 1981.
8. Руденко В. С. Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Киев : Вища шк., Головное изд-во, 1985.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
із курсу "Аналогова схемотехніка"
для студентів напрямів підготовки
"Електронні пристрої та системи"
"Мікро- та наноелектроніка"
усіх форм навчання

Частина 1

Відповідальний за випуск А. С. Опанасюк
Редактор Н. З. Клочко
Комп'ютерне верстання І. Є. Бражник

Підп. до друку 10.12.2012 , поз.
Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид.арк. 1,62. Тираж 40 пр. Зам. №
Собівартість вид. грн. к.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського - Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.