681.33(075)
Р83

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

В.Д. Рудик

АНАЛОГОВІ ТА ПІДСИЛЮВАЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

Лабораторний практикум

ВІННИЦЯ ВДТУ 2000

3089-23

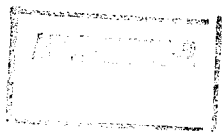
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

В.Д. Рудик

АНАЛОГОВІ ТА ПІДСИЛЮВАЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

Лабораторний практикум

НТБ ВНТУ
3089-23
681.33(075) Р 83 2000
Рудик В.Д. Аналогові та підсилювальні елек



Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів радіотехнічних спеціальностей. Протокол № 6 від 21 січня 2000 р

ВІННИЦЯ ВДТУ 2000

УДК 621.396

В.Д.Рудик. Аналогові та підсилювальні електронні пристрої. Лабораторний практикум / Вінниця: ВДТУ, 2000 - 53 с. Укр. мовою /.

Навчальний посібник з дисципліни " Аналогові та підсилювальні електронні пристрої " призначений для студентів бакалаврського напрямку 6.090700 - "Радіотехніка".

Бібліограф.12 найменувань, ілюстрацій 33

Рецензенти: В.С. Осадчук д.т.н., професор ВДТУ
С.М. Злепко д.т.н., професор ВДТУ
Ю.М. Крушевський к.т.н., доцент, Вінницький технічний коледж

ЗМІСТ

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт в навчальній лабораторії аналогових електронних пристроїв..... 4
Лабораторна робота №1. Дослідження підсилювальних каскадів на уніполярних та біполярних транзисторах..... 8
Лабораторна робота №2. Дослідження впливу від'ємного зворотного зв'язку..... 19
Лабораторна робота №3. Дослідження каскаду кінцевого підсилення..... 33
Лабораторна робота №4. Дослідження підсилювачів на операційних підсилювачах..... 43
Література..... 52

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ В НАВЧАЛЬНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ АНАЛОГОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Загальні положення

В процесі виконання лабораторних робіт студенти повинні засвоїти основні положення теорії і отримати необхідний обсяг практичних навичок в роботі з аналоговими електронними пристроями, їх вузлами, вимірювальною апаратурою і методикою вимірів.

На лабораторних заняттях студенти повинні навчитися правильно оцінювати результати досліджень, свідомо встановлювати границі застосування теоретичних положень і розуміти причини можливих розходжень результатів експерименту і теорії.

Перед виконанням роботи викладач перевіряє знання студентів і їх підготовленність до роботи.

Для допуску до виконання лабораторної роботи студент повинен:

- розуміти фізику явищ, що вивчається в лабораторній роботі;
- знати схему макета і вимірювальної установки, за допомогою якої проводяться дослідження;
- вміти користуватися відповідною вимірювальною апаратурою;
- уявляти очікувані результати дослідів, вміти їх пояснювати.

Порядок виконання робіт

Лабораторну роботу виконує бригада студентів у складі 2-3 осіб.

Кожний член бригади повинен брати активну участь у проведенні експериментальних досліджень (встановлювати режими, керувати елементами вимірювальної установки, фіксувати покази приладів і т.д.).

Перед початком досліджень слід перевірити з'єднання приладів, макетів і джерел.

Вмикати живлення тільки після дозволу викладача. Студентам забороняється самостійно розбирати макети і вимірювальну апаратуру.

У випадку виявлення несправності слід звернутися до викладача і під його наглядом знайти і ліквідувати пошкодження. Складні

пошкодження, які потребують демонтажу, ліквідує персонал лабораторії.

Чернетки записів дослідів необхідно вести в спеціальних зошитах і супроводжувати їх відповідними таблицями і графіками. Обов'язково фіксувати всі необхідні дані про проведення експериментів (рівні сигналів, завад і шумів, частоти і т.п.), вказувати типи і заводські номери приладів і стендів.

По закінченню роботи викладач перевіряє і візує записи, після чого робить запис в журналі про виконання лабораторної роботи.

Загальні методичні вказівки до виконання експериментальних досліджень

Після увімкнення живлення, і встановлення рекомендованих режимів роботи, необхідно прослідкувати по приладах загальний характер залежностей, що досліджуються, і переконатися у їх відповідності до теорії. Це дозволить встановити доцільні границі вимірів незалежної змінної і функції, а також інтервали між відліками.

При дослідженні кривих, відліки слід здійснювати не менше чим для 8 - 10 точок, в обраному діапазоні зміни незалежної змінної. Отримані відліки повинні забезпечити однозначну побудову графіків залежності, що досліджується. На ділянках перегину функції необхідно збільшувати кількість відліків, тобто інтервали між відліками повинні бути менше чим на ділянках монотонної зміни функції.

З цієї ж причини зняття відліків функції через рівні інтервали надходження аргументу, як правило, не є оптимальним. Запис показів слід виконувати з максимальною точністю.

Оскільки лабораторні макети вміщують вузли, що працюють в діапазоні рівнів і частот реальних сигналів, стають можливими прояви власних шумів, фону і завад. При завищених рівнях вхідних сигналів можливе перевантаження каскадів. Результати вимірів в таких випадках будуть мати значні помилки (промахи). Виходячи з цього рівні вхідних сигналів в процесі експериментальних досліджень необхідно вибирати такими, щоб мінімальний відліковий рівень сигналу на виході перевищував рівень шумів (фону, завад) не меньше чим в 3-5 разів. Максимальний рівень сигналу повинен складати 80-90% граничного його значення, при якому спотворення форми вихідного сигналу можуть бути зафіксовані на екрані осцилографа. Одже, починаючи досліження, слід попередньо визначити рівень фону і шумів макета і максимальну неспотворену вихідну напругу.

Загальні вимоги до змісту і форми звіту

Звіт повинен дати повне уявлення про зміст і результати виконаних досліджень і надати можливість зробити заключення про досягнення мети роботи. Цьому сприяє стисліть і наглядність оформлення текстового і графічного матеріалу, правильність рубрикацій, виконання вимог відповідних стандартів, взаємний зв'язок окремих розділів.

Звіт про виконання лабораторної роботи повинен вміщувати:

- титульний лист з назвою і номером роботи, групу, прізвище та ініціали студента, дату виконання роботи;
- мету виконання роботи;
- перелік апаратури та обладнання;
- схему електричну принципову макета;
- результати виконання домашнього завдання;
- програму експериментальних досліджень;
- результати досліджень та їх обробку;
- висновки по кожному пункту досліджень.

На графіках повинно бути вказано до якого досліду він належить, а також початкові умови експерименту. Величини, що вимірюються повинні відкладатися в зручних для порівняння масштабах. У випадку зміни величини більше чим в 10 раз доцільно використовувати логарифмічний масштаб. Графіки досліджених залежностей слід виконувати таким чином, щоб на них були присутні отримані в результаті експерименту точки.

Звіт повинен мати розділи, підрозділи, пункти, а у випадку необхідності і підпункти. Розділи і підрозділи повинні мати назви.

У висновках повинно бути:

- об'єктивна оцінка отриманих залежностей і пояснення впливу елементів схеми на їх зміну;
- критичне порівняння результатів експерименту і теоретичних положень;
- пояснення причин, у випадку розбіжності результатів експеременту і теоретичних положень.

Захист звіту

Оформлений звіт про виконану лабораторну роботу студент по закінченню роботи, або перед виконанням наступної, подає викладачу для перевірки, а потім для отримання заліку захищає його.

У відповідності з встановленим на кафедрі порядком, захист може відбуватися або в кінці заняття, на якому виконувалась робота, або протягом наступного лабораторного заняття.

Студент, який не захистив звіт більше чим з однієї лабораторної роботи, до виконання наступної не допускається.

При захисті оформленого і перевіреного звіту студент повинен показати, що основна мета цієї лабораторної роботи досягнена. Студент зобов'язаний:

- пояснити принцип дії каскаду або пристрою, що досліджуються;
- знати призначення і взаємодію елементів і вузлів, які входять в досліджуваний пристрій;
- базуючись на знаннях теорії, аналізувати характер досліджуваних залежностей, а також узагальнювати отримані дані і робити вірні висновки;
- давати відповіді на будь-яке питання, що стосується процесу експериментальних досліджень, а також на контрольні питання до роботи.

Лабораторна робота № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КАСКАДІВ НА УНІПОЛЯРНИХ ТА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ

Мета роботи - експериментально дослідити параметри та характеристики підсилювальних каскадів на уніполярних та біполярних транзисторах. Вивчити вплив основних елементів каскадів на їх основні параметри та характеристики.

Теоретичні відомості

В залежності від вигляду прохідної характеристики $I_C = f(U_{ЗВ})$ уніполярного транзистора **(УТ)**, схеми затворного кола підсилювального каскаду різні. Якщо прохідна характеристика має вигляд, зображений на **рис.1.1,а,** що відповідає польовому транзистору з **p-n** переходом, то положення робочої точки **(р.т.)** задається схемою автоматичного зміщення **(рис.1.2,а).** При цьому $U_{ЗВ} = U_З - U_В$, падіння напруги, що виникає на $R_З$, за рахунок дії струму $I_З$, можна вважати рівним нулю внаслідок малого $I_З$. В такому випадку $U_{ЗВ} = -U_В$. В свою чергу, для наведеної схеми $U_В = I_В \times R_В$, а $U_{ЗВ} = -I_В \times R_В$. Цю схему використовують для встановлення положення робочої точки при незбіжності знаків напруг на затворі та стоці транзистора.

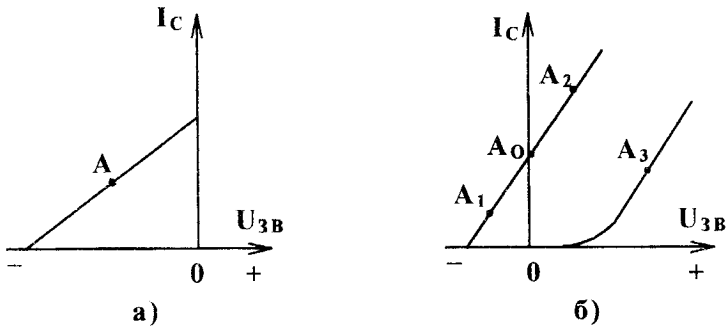


Рис. 1.1

Для транзисторів з вмонтованим та індукованим каналом **(рис. 1.1,б),** використовують схему з подільником в затворному колі

(рис. 1.2,б). В даному випадку $U_{ЗВ} = U_З - U_В$, але $U_З = I_{под} \cdot R2$, де $I_{под} = E / (R1 + R2)$. Очевидно, що схема дозволяє забезпечити $U_З > U_В$.

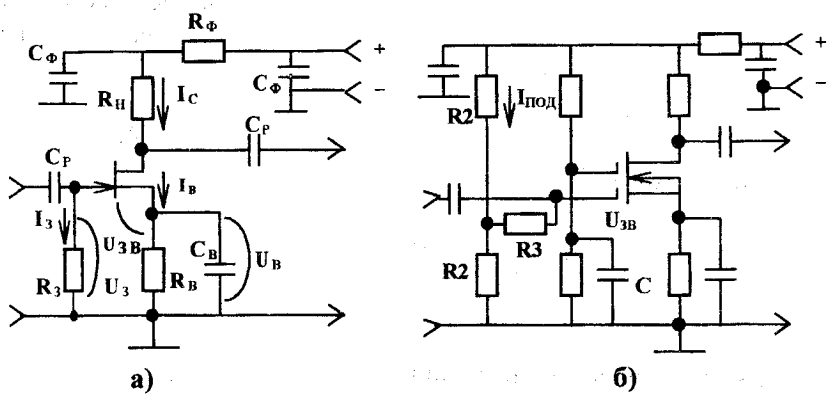


Рис. 1.2

Для **МДН** - транзистора з вмонтованим каналом, що працює в режимі збіднення **(р.т. A_1),** оптимальною буде перша схема, як схема з мінімальною кількістю елементів, яка також рекомендована для використання при положенні **р.т. A_O,** а друга - при **р.т. A_2, A_3.** Застосування другої схеми можливе лише у випадку коли знаки напруг в затворному та стоковому колах транзистора збігаються **(р.т. A_2,A_3).**

Зв'язок між підсилювальними каскадами виконується через конденсатор $C_Р$. Відомо, що для постійної складової $C_Р$ забезпечує нескінченно великий опір. Значення ємності конденсатора $C_Р$ вибирається так, щоб його опір був незначним порівняно з опором $R_З$ **(рис. 1.2,а)**. Конденсатор $C_В$, необхідний для фільтрування змінної напруги та усунення від'ємного зворотного зв'язку **(ВЗЗ)**, послідовного за змінним стумом. Для усунення шунтуючої дії подільника **R1, R2**, в схемі **рис. 1.2,б**, в середню точку подільника під'єднують додатково резистор $R_З$. Живлення кола другого затвора виконується аналогічно першому, при цьому напруга $U_{З_2В} = U_{З_2} - U_В$ задається у відповідності до вимог для даного типу транзистора. Конденсатор С, під'єднаний до другого затвору, усуває зв'язок виходу підсилювального каскаду з входом через міжелектродні ємності транзистора.

Фільтр в стоковому колі необхідний для підвищення стійкості підсилювача до самозбудження. В багатокаскадному підсилювачі з спільним джерелом живлення через його внутрішній опір протікає сумарний струм усіх каскадів. Очевидно, що падіння напруги на опорі навантаження останнього каскаду найбільше, цей каскад має найбільшу амплітуду вихідного струму. Частина цієї напруги через коло живлення підсилювача може бути прикладеною до вхідних каскадів через опір джерела живлення.

Коефіцієнт підсилення підсилювального каскаду (**ПК**) в області середніх частот (**СЧ**) дорівнює

$$\mathbf{K_0} = \frac{\mu}{\mathbf{R}_i}\mathbf{R}_\Sigma = \mathbf{SR}_\Sigma ,$$

де μ, **S**, $\mathbf{R}_i$ - відповідно статичний коефіцієнт підсилення, крутість та внутрішній опір польового транзистора;

$\mathbf{R}_\Sigma$ - паралельне з'єднання опорів $\mathbf{R_H}$, $\mathbf{R}_i$, $\mathbf{R_З}$.

З еквівалентної схеми каскаду і виразу для коефіцієнта підсилення за напругою $\mathbf{K_0}$ видно, що в області **СЧ** коефіцієнт підсилення не залежить від частоти сигналу.

Залежність коефіцієнта підсилення $\mathbf{K_0}$ каскаду від зміни опору навантаження (або коефіцієнта навантаження $\alpha = \mathbf{R_H} / \mathbf{R}_i$) зображено на **рис. 1.3.**

Легко довести, що при $\mathbf{R_H} \to \infty$ теоретично можна досягти значення $\mathbf{K_0} = \mu$ **(рис. 1.3,а).** Однак на практиці, в зв'язку із збільшенням $\mathbf{R_H}$, одночасно зменьшується значення постійної складової струму стоку $\mathbf{Ic_0}$ і напруги $\mathbf{Uc_0}$, що призводить до зміщення **р.т.** каскаду.

Для малого $\mathbf{R_H}$ має місце динамічна характеристика **1** (амплітуда $\mathbf{U_{ВХ}}$ незмінна і дорівнює, наприклад, **0,5 В**), форма вихідної напруги синусоїдальна **(рис. 1.3,б).**

При збільшенні $\mathbf{R_H}$ (динамічна характеристика **2**) струм $\mathbf{Ic_0}$ і напруга $\mathbf{Uc_0}$ зменьшується, вихідна напруга збільшується, що пояснює появу лінійної ділянки навантажувальної залежності $\mathbf{K_0} = \mathbf{f(R_H)}$. Подальше збільшення $\mathbf{R_H}$ (динамічна характеристика **3**) призводить до зміщення **р.т. А** в область насичення, зменшення амплітуди вихідного сигналу, появи нелінійних спотворень і зменшення значення $\mathbf{K_0}$.

Амплітудно - частотна та фазочастотна характеристики каскада визначаються параметрами еквівалентної схеми підсилювача, зокрема сталими часу в областях низьких і високих частот **(НЧ, ВЧ)** $\tau_н$, $\tau_в$. Фазочастотна характеристика каскаду показана на **рис. 1.4.**

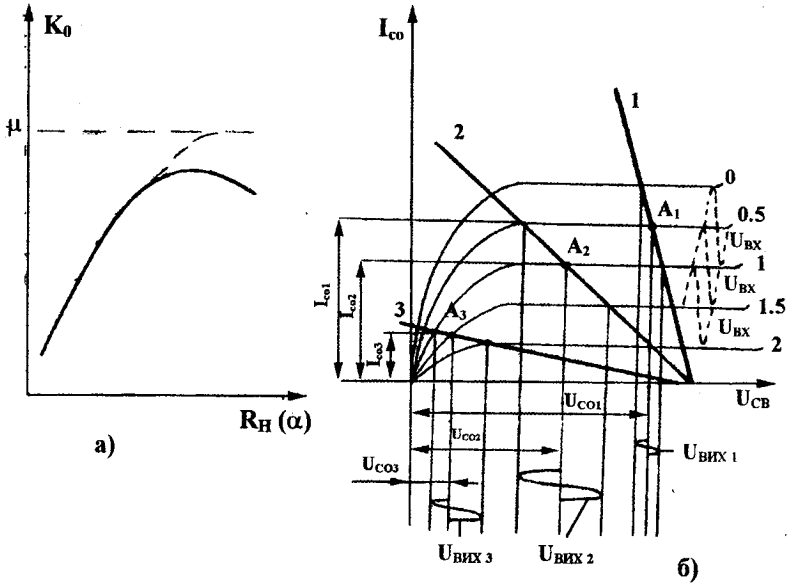


Рис.1.3

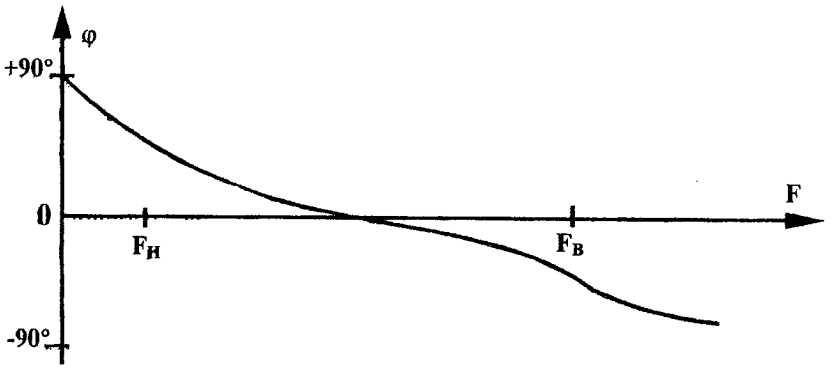


Рис. 1.4

Оскільки в області **СЧ** коефіцієнт підсилення практично не залежить від частоти, фазовий зсув тут близький до нуля. Максимальне значення фазового зсуву в області низьких і високих частот не перевищує **90°**.

Відмінністю біполярного транзистора **(БТ)** від **УТ** є залежність його параметрів і характеристик від температури і частоти. Температурна нестабільність **БТ** визначається зміною некерованого струму $\mathbf{I_{КБо}}$, температурним зміщенням характеристик **БТ.**

Струми **БТ** зв'язанні співвідношенням:

$$\mathbf{I_Е = I_К + I_Б}, \quad \mathbf{I_К = h_{21Б} \times I_Е + I_{КБО}}.$$

Очевидно, що колекторний струм **БТ** змінюється при зміні $\mathbf{h_{21Б}}$, $\mathbf{I_Е}$ або $\mathbf{I_{КБо}}$.

Режим каскаду на **БТ** стабілізується схемою емітерної стабілізації **(рис. 1.5,а).**

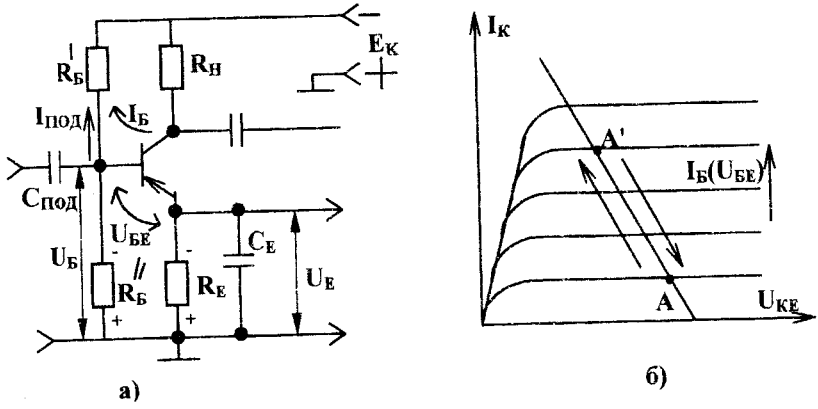


Рис. 1.5

При збільшенні температури зростає струм $\mathbf{I_{КБо}}$, а також і струм $\mathbf{I_К}$ в **р.т.** Можна вважати, що $\mathbf{I_Е \approx I_К}$, а це призводить до збільшення падіння напруги $\mathbf{U_Е}$ на $\mathbf{R_Е}$ і, як наслідок, до зменшення $\mathbf{U_{БЕ}}$, $\mathbf{U_{БЕ}} = \mathbf{U_Б - U_Е}$. Стабільність опорної напруги $\mathbf{U_Б}$ забезпечується подільниками $\mathbf{R_Б'}$ і $\mathbf{R_Б''}$. Резистори подільника вибрані таким чином, щоб $\mathbf{I_{под} >> I_Б}$. Тоді зміна струму бази $\mathbf{I_Б}$ практично не впливає на $\mathbf{U_Б}$. Збільшення колекторного струму компенсується зменшенням напру-

ги зміщення $U_{БЕ}$ або, що є теж саме, струму бази $I_Б$ і струму колектора $I_К$ **(рис.1.5,б).**

Призначення інших елементів каскаду на **БТ**, а також принцип його роботи аналогічний каскаду на **УТ**.

Фазочастотна характеристика каскаду на **БТ** має такий же вигляд, що і для каскаду на **УТ**, але відрізняється значеннями фазового зсуву в області **ВЧ**, що пов'язано з комплексним значенням крутості **БТ**, і обумовлює значне запізнення вихідної напруги відносно вхідної (при нескінченному збільшенні частоти сигналу, фазове зміщення в **БТ** може досягати **180°**).

Опис лабораторної установки

Лабораторний макет являє собою два двокаскадних аперіодичних підсилювача **(рис.1.6).** Двокаскадний підсилювач на уніполярних транзисторах **VT1** та **VT2, КП306, КП303,** та біполярних **VT3, VT4, КТ315А.** Підсилювачі мають спільний вхід та вихід, які комутуються перемикачами **S1, S6.** Опір навантаження підсилювальних каскадів **VT1** і **VT3** може змінюватися - перемикачами **S7** та **S8.** Конденсатори **С5** та **С6**, в колі послідовного **ВЗЗ** за змінним струмом, під'єднуються перемикачем **S2.** Зв'язок між каскадами здійснюється розділовими конденсаторами **С7, С8, С9, С10,** котрі можуть змінюватися перемикачем **S3**. **S4** дозволяє виконати перехрестне включення каскадів **УТ - БТ** та **БТ - УТ.**

Резистори **R17** та **R27** дозволяють змінювати положення робочої точки транзисторів. Перемикачем **S5** під'єднується конденсатор **С11** для дослідження впливу ємнісної складової навантаження. Виходи каскадів навантажені на кола, що імітують вхід наступного каскаду - **R29, R34** та **С12, С14.** Живлення схеми здійснюється від джерела напругою **+15 В.**

Домашнє завдання

1. Ознайомитись з теоретичними положеннями та лекційним матеріалом з даної теми.

2. Ознайомитись зі схемою лабораторного макету та системою комутації кіл макету.

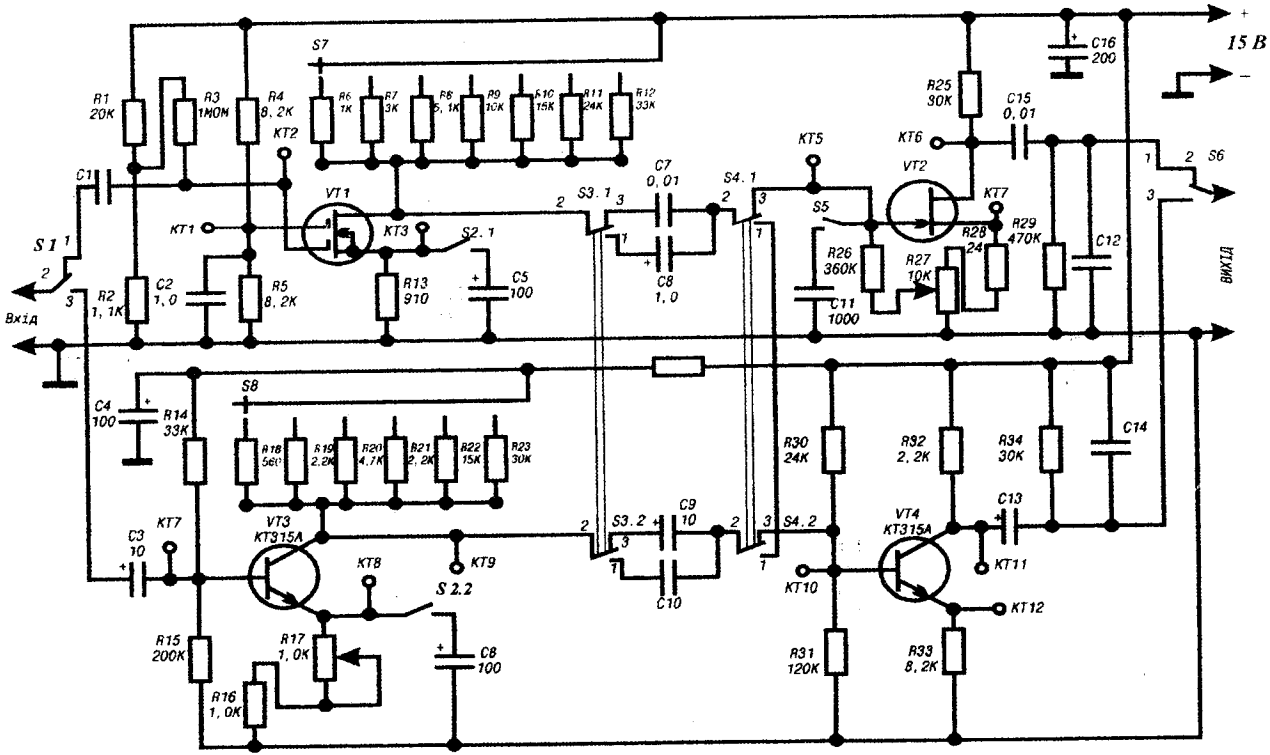

15 В
Вхід
ВИХІД
S1
S2.1
S2.2
S3.1
S3.2
S4.1
S4.2
S5
S6
S7
S8
VT1
VT2
VT3
VT4
КТ315А
R1 20К
R2 1,1К
R3 1МОМ
R4 8,2К
R5 8,2К
R13 910
R14 33К
R15 200К
R16 1,0К
R17 1,0К
R25 30К
R26 360К
R27 10К
R28 24
R29 470К
R30 24К
R31 120К
R32 2,2К
R33 8,2К
R34 30К
C1
C2 1,0
C3 10
C4 100
C5 100
C7 0,01
C8 1,0
C9 10
C10
C11 1000
C12
C13
C14
C15 0,01
C16 200
КТ1
КТ2
КТ3
КТ5
КТ6
КТ7
КТ8
КТ9
КТ10
КТ11
КТ12

Рис. 1.6

3. Розрахувати очікуване значення коефіцієнтів підсилення каскадів на **VT1** та **VT3** в області **СЧ** для номіналів, вказаних на схемі (**рис. 1.6.**).

4. Ознайомитись з приладами та обладнанням, необхідним для проведення досліджень.

5. Розробити методику дослідження основних показників та характеристик у відповідності з програмою експериментальних досліджень.

6. Визначити внутрішній опір транзистора **КП306Б,** при нормальному положенні робочої точки, напруга джерела живлення **+15 В,** опір навантаження **5,1 к.**

Програма експериментальних досліджень

1. Підключити підсилювач на уніполярних транзисторах.

2. Визначити режими транзисторів за постійним струмом **(Uс, Uв, Uз1, Uз2, Uзв).** Встановити оптимальне положення робочої точки **VT2**, виходячи з мінімальних спотворень форми сигналу.

3. Визначити коефіцієнти підсилення напруги кожного з каскадів. Виміри провести при $R_н$ **=10 кОм**, $U_{вх}$ **=50 мВ**, **F =1 кГц.** Дослідити дію конденсатора **С5** на коефіцієнт підсилення.

4. Встановити залежність коефіцієнта підсилення від коефіцієнта навантаження α = **Rн/Ri.** Дослідження провести при параметрах сигналу згідно з **п.3** та зміні опору навантаження в межах **1...33 кОм.**

5. Дослідити амплітудну характеристику підсилювача при опорах навантаження **3...10 кОм.** Частоту сигналу встановити рівною **1кГц**, значення рівня вхідного сигналу змінювати в межах **0...200 мВ.** Визначити лінійні та нелінійні ділянки амплітудної характеристики та динамічний діапазон сигналу підсилювача.

6. Дослідити амплітудно-частотну характеристику **(АЧХ)** підсилювача при опорах навантаження **1кОм; 5,1кОм; 10 кОм.** Орієнтовний рівень вхідного сигналу **50 мВ.** Можливо використовувати інші значення рівня у випадку значних спотворень форми вихідного сигналу. Частоту сигналу змінювати в межах **20 Гц - 1000 кГц.** Визначити області **НЧ, СЧ, ВЧ.**

7. Дослідити **АЧХ** підсилювача при різних значеннях смності розділового конденсатора. Досліди провести при опорі навантаження **10 кОм.**

8. Визначити частотні спотворення підсилювача **Мн** та **Мв**, на частотах **50 Гц** та **50 кГц** і смугу пропускання на рівні **3 дБ**, для всіх використаних значень опорів навантаження і ємностей розділового конденсатора.

9. Дослідити фазочастотну характеристику (**ФЧХ**) підсилювача при опорах навантаження **1кОм** та **10 кОм.** Використати для визначення фазового зсуву між вхідною та вихідною напругою фазометр.

10. Підключити підсилювач на біполярних транзисторах.

11. Визначити режими транзисторів за постійним струмом (**Uк, Uе, Uб, Uбе**). Виставити оптимальне положення робочої точки **VT3** (по формі вихідного сигналу).

12. Визначити коефіцієнти підсилення напруги кожного з каскадів **VT3**, **VT4**. Виміри провести при **Rн=4,7 кОм**, **Uвх=5 мВ**, **F = 1 кГц.** Дослідити дію конденсатора **С6** та шунтуючу дію наступного каскаду.

13. Встановити залежність коефіцієнта підсилення від опору навантаження. Дослід проводити при параметрах сигналу згідно з **п.12** та зміні опору навантаження в межах **0,5...30 кОм.**

14. Дослідити амплітудну характеристику підсилювача при опорах навантаження **2,2 кОм** і **15 кОм** на частоті **1 кГц**, вхідний сигнал змінювати в **межах 0...200 мВ.** Далі згідно з **п.5.**

15. Дослідити **АЧХ** підсилювача при трьох значеннях опору навантаження **0,5кОм**; **4,7кОм**; **15 кОм.** Орієнтовний рівень вхідного сигналу **5 мВ**. Частоту сигналу змінювати в межах **20 Гц - 1000 кГц.**

16. Дослідити **АЧХ** підсилювача при різних значеннях ємності розділового конденсатора. Дослід провести при опорі навантаження **4,7 кОм.**

17. Відповідно до **п.8.**

18. Дослідити **ФЧХ** підсилювача при опорах навантаження **0,5кОм** та **4,7 кОм.**

Досліджувальна та вимірювальна апаратура

1. Лабораторний стенд.

2. Джерело живлення.

3. Генератор сигналів низькочастотний **Г3-102.**

4. Генератор сигналів високочастотний **Г4-102.**

5. Вольтметр цифровий **В7-27А.**

6. Мілівольтметр **В3-38** або **В3-39, В3-40.**
7. Осцилограф **С1-67** або **С1-86.**
8. Фазометр **Ф2-28.**

Короткі методичні вказівки до розрахунку

Для розрахунку внутрішнього опору транзистора в **р.т.** необхідно використовувати його вихідні характеристики, взяті з довідника,

$$R_i = \Delta U_{CB} / \Delta I_C ,$$

Частотні спотворення M_H та M_B обчислити в **дБ** за виразом $M_{H(B)} = 20 \lg K_0 / K_{H(B)}$, визначивши за частотними характеристиками область **СЧ**, K_0 і відповідно K_H та K_B.

Смугу пропускання підсилювача визначити як різницю частот F_B, F_H ($\Delta F = F_B - F_H$) на рівні **3дБ (0, 707K_0).**

Оформлення звіту

Особливістю даної роботи є значна кількість частотних характеристик, які при побудові необхідно раціонально згрупувати. При використанні логарифмічного масштабу вказати на осі не значення логарифму, а вимірювану величину. В іншому використовувати вимоги вступної частини.

Контрольні запитання

1. Пояснити призначення елементів схеми підсилювального каскада на **УТ** та **БТ.**
2. Як вибрати ємність розділового конденсатора ?
3. Пояснити зростаючий і спадаючий проміжок залежності коефіцієнта підсилення від коефіцієнта навантаження.
4. Пояснити хід амплітудної характеристики підсилювального каскаду.
5. Чим зумовлений спад **АЧХ** в області **ВЧ** та **НЧ** ?
6. Як залежить смуга пропускання підсилювача від коефіцієнта підсилення ?

ВДТУ

7. Що таке **ФЧХ** та фазові спотворення ?

8. Як вибирається положення робочої точки і чим воно забезпечується в каскаді на **УТ** та **БТ** ?

9. Які основні відмінності параметрів і характеристик каскадів на **УТ** та **БТ.**

10. В чому причина різних значень ємності розділового конденсатора в каскадах на **УТ** та **БТ,** при однакових значеннях частотних спотворень ?

11. Як вибрати значення елементів розв'язувального фільтра в колі живлення ?

12. Як вибираються номінали блокувального конденсатора в колі витоку, емітера ?

13. В яких випадках використовується схема автоматичного зміщення, в яких схема з подільником ?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІД'ЄМНОГО ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Мета роботи - дослідити вплив від'ємного зворотного зв'язку на основні показники аналогових пристроїв

Теоретичні відомості

Під зворотним зв'язком розуміють передачу сигналу з виходу на вхід пристрою. Таку передачу можна здійснити:

- спеціальними колами, коли утворюється шлях для передачі сигналу з виходу на вхід пристрою - зовнішній зворотний зв'язок;
- фізичними властивостями та конструктивними особливостями активних елементів - внутрішній зв'язок;
- невдалим розміщенням кіл пристрою, неякісним монтажем, що сприяє утворенню паразитних ємностей та індуктивностей, через які відбувається передача сигналу з виходу на вхід пристрою - паразитний зв'язок;
- через загальні кола живлення каскадів пристрою - гальванічний зв'язок.

Коло зворотного зв'язку утворює чотириполюсник зворотного зв'язку, вхід якого приєднано до виходу пристрою (підсилювача), а вихід до входу пристрою (підсилювача) **(рис. 2.1).**

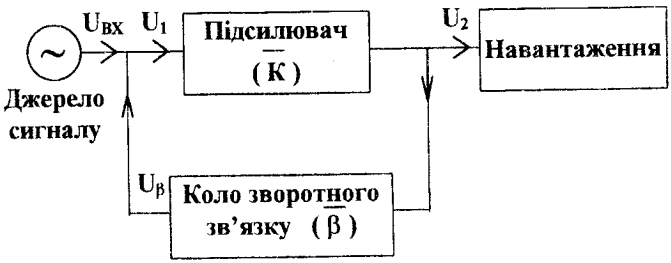


Рис. 2.1

Зворотний зв'язок буває як додатним **(ДЗЗ)** так і від'ємним **(ВЗЗ)**.

Додатний зворотний зв'язок - це такий зв'язок, коли підсумковий сигнал на вході підсилювача зростає. ДЗЗ забезпечується при співпаданні фази вхідної напруги і напруги, що надходить з виходу кола зворотного зв'язку. В підсилювачах **ДЗЗ** викликає самозбудження.

Від'ємний зворотний зв'язок - це такий зв'язок, коли підсумковий сигнал на вході підсилювача зменшується. Це відбувається при протифазності напруг джерела сигналу і кола зворотного зв'язку. **ВЗЗ** широко застосовується в підсилювачах для зміни їх параметрів.

Розрізняють чотири види схем, за допомогою яких реалізується зовнішній **ВЗЗ**.

1. Послідовний від'ємний зворотний зв'язок за струмом або зв'язок **Z** типу **(рис.2.2).** В цій схемі напруга входу підсилювача $\overline{K}$ і вихідна напруга кола зворотного зв'язку $\overline{\beta}$ ввімкнені послідовно. Навантаження Z_H , вхід β - кола і вихід підсилювача також ввімкнені послідовно. При розриві вихідного кола, $Z_H = \infty$, зворотний зв'язок зникає.

Застосування **ВЗЗ**, послідовного за струмом, можна показати на прикладі підсилювального каскаду на **УТ** або на **БТ (рис. 2.3. а,б)**.

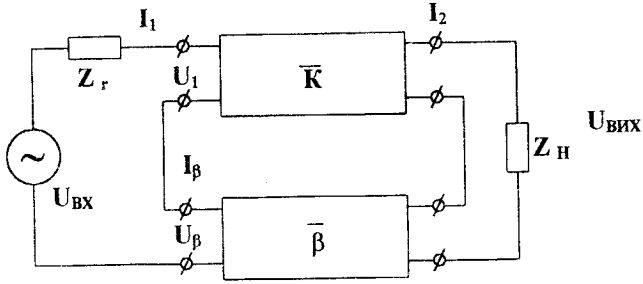


Рис. 2.2

Напруга U_β , що виділяється на резисторі R_B, є напругою послідовного **ВЗЗ** (вихід чотириполюсника зворотного зв'язку $\overline{\beta}$ і джерело збудження U_{BX} відносно зажимів U_1 під'єднані послідовно) за струмом (вихід чотириполюсника $\overline{K}$, опір навантаження R_H і вхід кола зворотного зв'язку $\overline{\beta}$ також під'єднані послідовно).

2. Паралельний від'ємний зворотний зв'язок за струмом або зв'язок **G** типу **(рис.2.4)**. В даній схемі вхідні зажими підсилювача, вихід β - кола з'єднані паралельно і струми I_1 і I_β віднімаються.

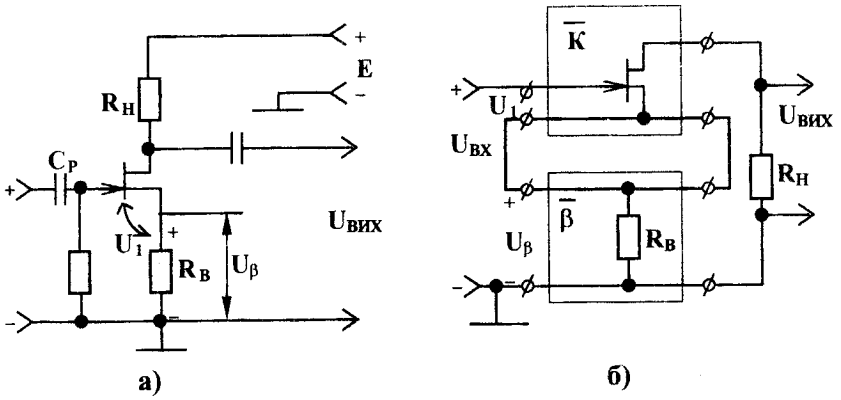


Рис. 2.3

Вихід підсилювача, вхід β - кола та навантаження з'єднані послідовно, в цьому колі протікає струм I_2 , яким визначається значення струму $I_β$.

Застосування **ВЗЗ**, паралельного за струмом, можна показати на прикладі схеми підсилювального каскаду з спільною базою **(СБ)** і спільним затвором **(СЗ) (рис.2.5)**.

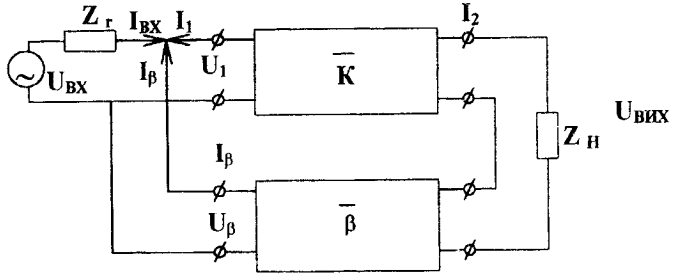
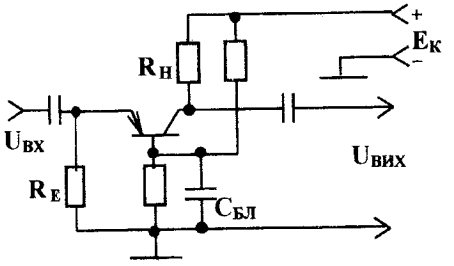


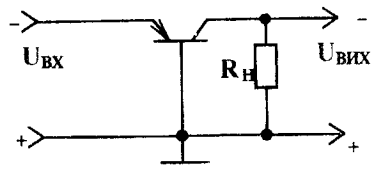
Рис. 2.4

На **рис.2.5,а** зображена повна схема підсилювального каскаду з спільною базою. Аналогічна схема без допоміжних елементів для змінної складової струмів зображена на **рис.2.5,б**. Її можна уявити як схему підсилювального каскаду з спільним емітером (чотириполюсник **К**), що охоплений **ВЗЗ**, паралельним за струмом, **рис.2.5,в**. Вхід підсилювача без **ВЗЗ**, джерело збудження і вихід кола зворотного

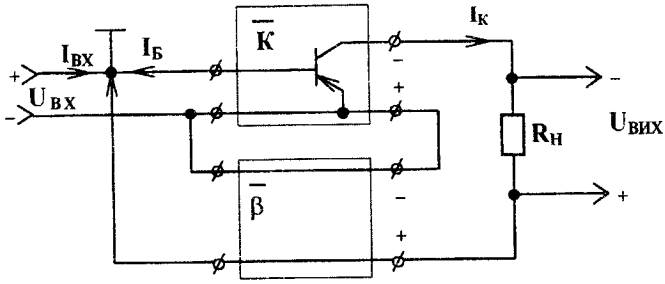
зв'язку з'єднані паралельно (паралельний зв'язок), а вихід підсилювача без **ВЗЗ** (ділянка колектор - емітер), опір навантаження і вхід чотириполюсника зворотного зв'язку з'єднані послідовно (зв'язок за струмом). Струм підсилювача без **ВЗЗ** $\mathbf{I_1}$ (базовий струм $\mathbf{I_Б}$) і струм кола зворотного зв'язку $\mathbf{I_\beta}$ (колекторний струм $\mathbf{I_К}$) мають зустрічний напрямок, тому такий зв'язок є від'ємним.



а)



б)



в)

Рис. 2.5

Характерна особливість цієї схеми - наявність "пустого" чотириполюсника зворотного зв'язку $\bar{\beta}$. Вихідний струм, що протікає по $\mathbf{R_Н}$, прикладається назустріч вхідному, отже існує 100% **ВЗЗ,** паралельний за струмом. Такий **ВЗЗ** визначає властивості каскаду з спільною базою. На **рис.2.5,в** видно, що вихідна напруга каскаду **СБ** є сумою вихідної напруги підсилювача без **ВЗЗ** і вхідної, причому фаза вихідної напруги співпадає з фазою вхідної напруги. Коефіцієнт підсилення за напругою такого каскаду приблизно дорівнює коефіцієнту підсилення каскаду з спільним емітером ($\mathbf{Ku_{СБ} = Ku_{СЕ} + 1}$),

коефіцієнт підсилення за струмом менше одиниці, тобто, це повторювач струму.

Каскад має малий вхідний опір $R_{вх_{СБ}} = 1/S$ (одиниці-десятки **Ом**) і порівняно високий вихідний опір (одиниці **кОм**).

3. Послідовний **ВЗЗ** за напругою або зв'язок **h** типу **(рис.2.6)**, входи підсилювача і виходи $\bar{\beta}$ - кола і навантаження з'єднуються паралельно. Застосування **ВЗЗ** послідовного за напругою можна показати на схемі двокаскадного підсилювача **(рис.2.7)**, де напруга з виходу підсилювача через коло зворотного зв'язку подається на вхід.

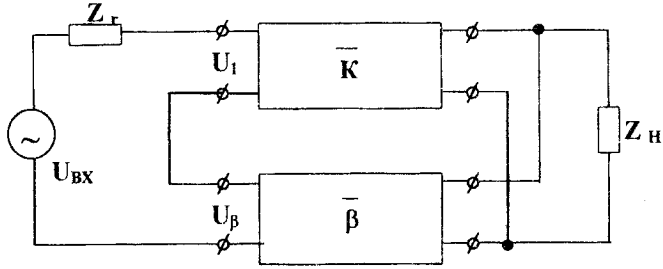


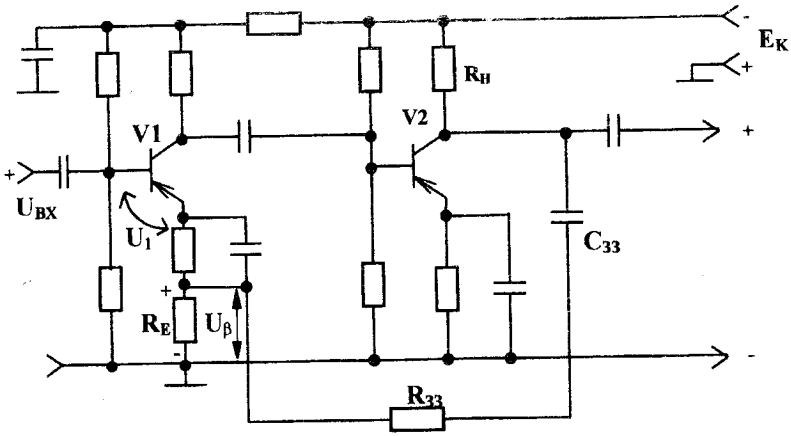
Рис. 2.6

Напруга U_β є напругою **ВЗЗ**, і подається зустрічно до збуджуючої напруги $U_{ВХ}$, зменшуючи напругу на вході підсилювача U_1 **(рис.2.7,б)**. Відносно U_1 обидві напруги подаються послідовно (послідовний **ВЗЗ**). Вихід підсилювача (колектор - емітер **V2**), навантажувальний резистор $R_Н$ і вхід кола зворотного зв'язку з'єднані паралельно (**ВЗЗ** за напругою).

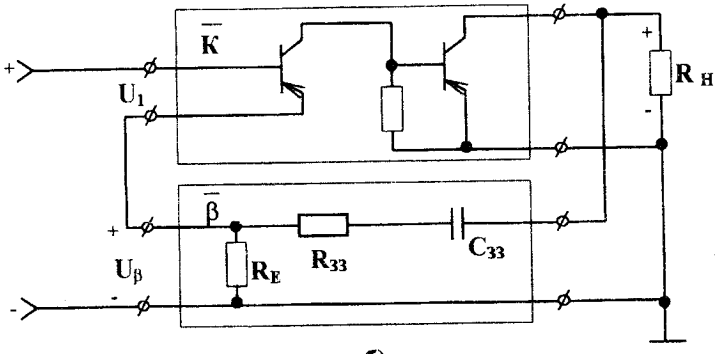
4. Паралельний від'ємний зворотний зв'язок за напругою або зв'язок **V** типу **(рис.2.8)**. При такому зв'язку входи підсилювача і виходи кола зворотного зв'язку з'єднуються паралельно. Також паралельно з'єднані виходи підсилювача, входи β - кола та навантаження. Схема підсилювального каскаду, де застосований **ВЗЗ** зображена на **рис.2.9.**

Частина вихідної напруги, через коло зворотного зв'язку $R_{ЗЗ}$, $C_{ЗЗ}$, подається в протифазі на вхід **(рис.2.9,б).**

5. Витоковий та емітерний повторювачі. Каскад з витоковим навантаженням **(рис.2.10,а)** являє собою підсилювач, що охоплений 100% від'ємним, послідовним зворотним зв'язком за напругою. За змінним струмом стік транзистора заземлений, що відповідає ввімкненню транзистора за схемою з спільним стоком **(рис.2.10,б).**



а)



б)

Рис. 2.7

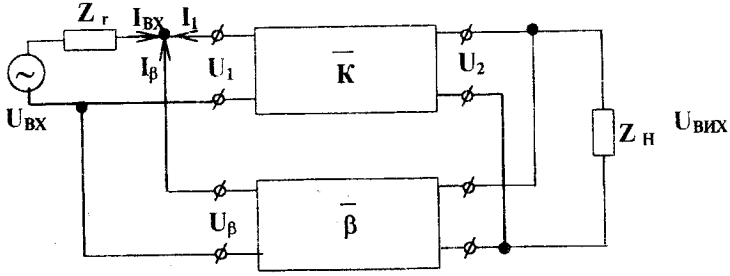


Рис. 2.8

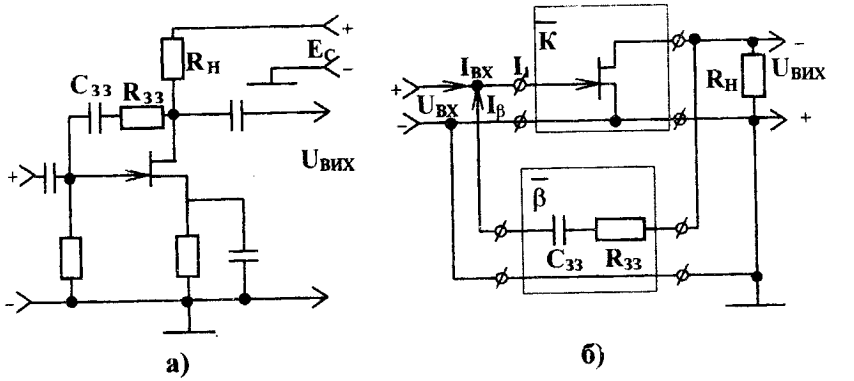


Рис. 2.9

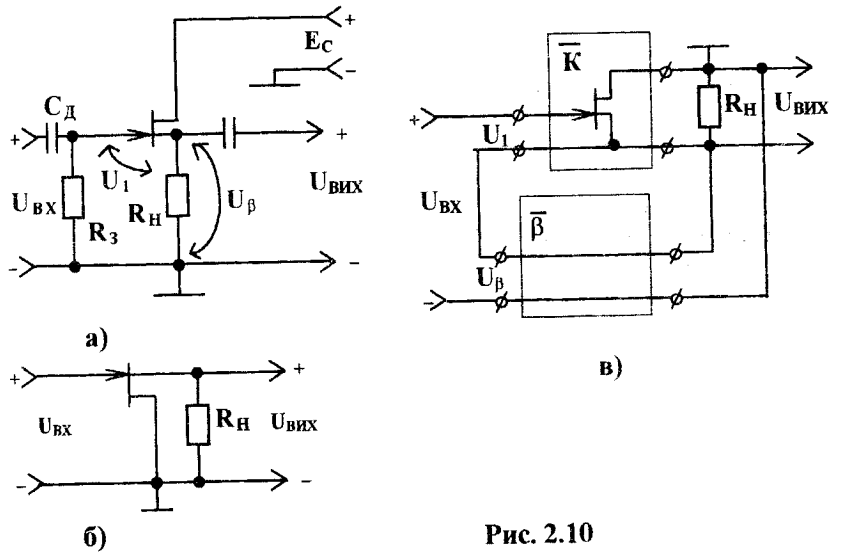


Рис. 2.10

Схему витокового повторювача можна зобразити як схему каскаду з спільним витоком, що охоплений **ВЗЗ**, послідов ним за напругою (вхід підсилювача, джерело збудження і вихід кола зворотного зв'язку з'єднані послідовно). Напруга $U_β$ знімається з $R_н$ і через "пустий" чотириполюсник β повністю прикладається до входу **(рис.2.10,в)**, тому $U_β = U_{вих}$. Коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку $\overline{β} = 1$, тому коефіцієнт підсилення за напругою такого каскаду $\overline{K}_β = \overline{K} / 1+\overline{K}$ і знаходиться на проміжку **0,5...0,8,** тобто це повторювач напруги.

Емітерний повторювач **(ЕП)** характеризується практично аналогічними властивостями, як і витоковий повторювач, **(рис.2.11).**

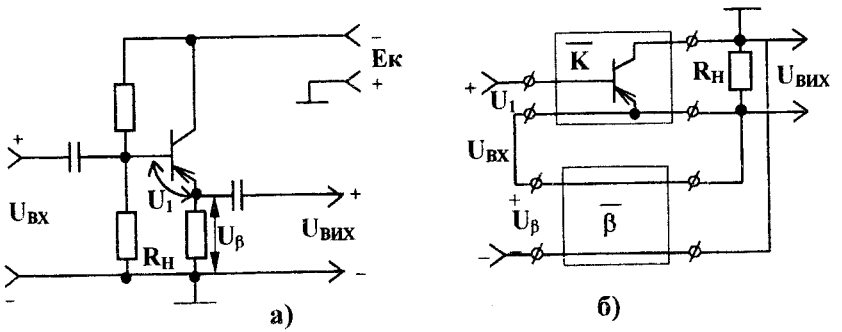


Рис. 2.11

Коефіцієнт передачі за напругою **ЕП** приблизно дорівнює одиниці (**0,95...0,99**), внаслідок більшого значення крутості біполярного транзистора.

Однією з основних властивостей витокового та емітерного повторювачів є великий вхідний і малий вихідний опір. Вони використовуються як елемент узгодження високо - та низькоомних кіл (тому їх інколи називають трансформаторами опорів).

Опис лабораторної установки

Лабораторний макет (**рис.2.12**) містить чотири каскади підсилення на **БТ**, кожен з яких може бути досліджений окремо. Крім того, в складі макета три змінних резистори (**рис.2.13**) **470 Ом, 4,7 кОм та 47 кОм.** Ці резистори використовуються для виміру вхідних та вихідних опорів підсилювальних каскадів, що охоплені різними видами **ВЗЗ.**

Перший каскад на транзисторі **VT1** використовується для реалізації послідовного **ВЗЗ** за напругою. Режим транзистора за постійним струмом обраний з такою умовою, що **ВЗЗ** за струмом, що має місце на **R3,** практично не впливає на режим. Для зміни глибини **ВЗЗ** служить перемикач **S1.**

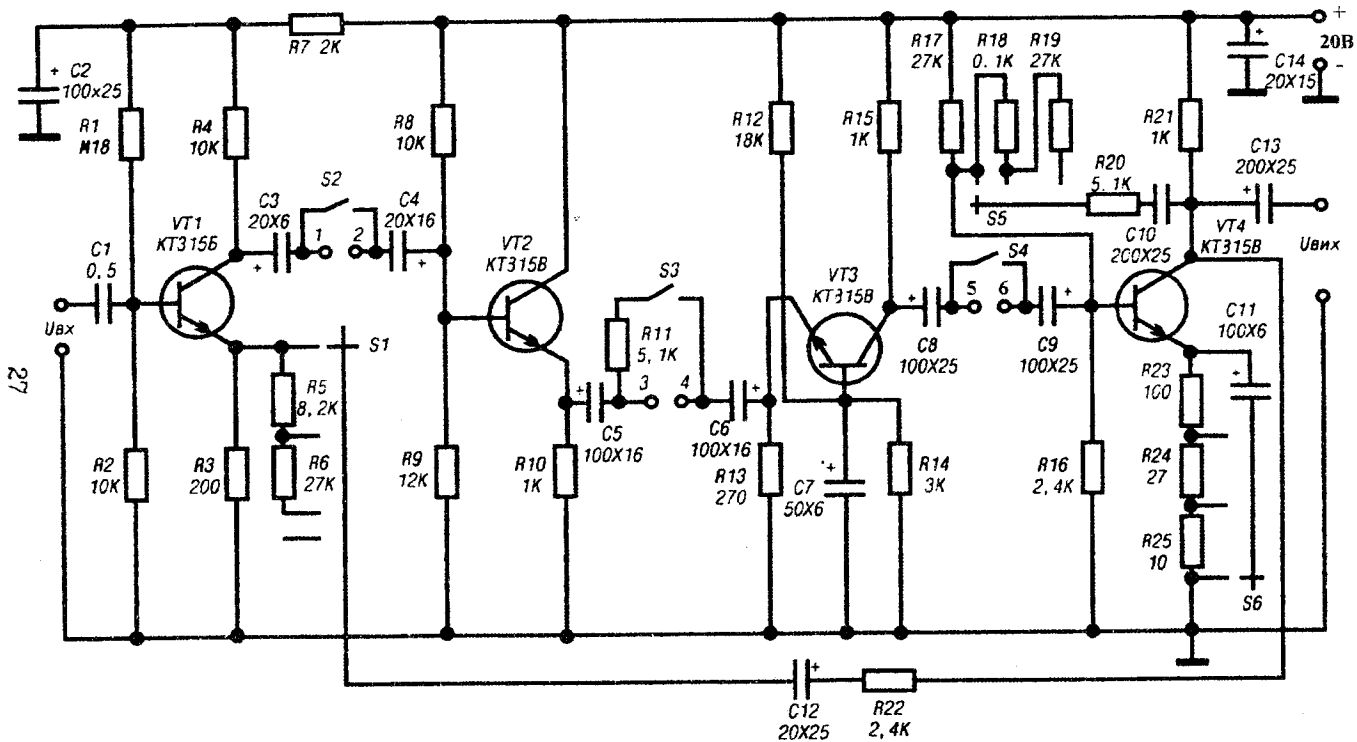

+ C2 100x25
R1 M18
R4 10K
R7 2K
R8 10K
C3 20X6
S2
C4 20X16
VT1 KT315Б
C1 0, 5
Uвх
S1
R5 8, 2K
R2 10K
R3 200
R6 27K
VT2 KT315B
R9 12K
R10 1K
S3
R11 5, 1K
C5 100X16
C6 100X16
R12 18K
R13 270
C7 50X6
R14 3K
VT3 KT315B
R15 1K
R17 27K
R18 0, 1K
R19 27K
S4
S5
C8 100X25
C9 100X25
R16 2, 4K
R20 5, 1K
R21 1K
C10 200X25
VT4 KT315B
C13 200X25
Uвих
C14 20X15
20В
C11 100X6
R23 100
R24 27
R25 10
S6
C12 20X25
R22 2, 4K
27

Рис. 2.12

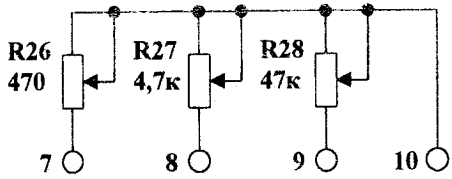


Рис. 2.13

Каскади **VT2 -VT4,** виконані відповідно за схемами **СК, СБ, СЕ,** і працюють в однакових режимах, але різне ввімкнення транзисторів визначає різні їх властивості.

Каскад на **VT2** - емітерний повторювач, його високий вхідний опір узгоджується з опором першого малострумового каскаду, а низький вихідний опір - з низьким вхідним опором третього каскаду на **VT3**, зібраного за схемою **СБ.**

Четвертий каскад на транзисторі **VT4**, виконаний за схемою **СЕ**, і дозволяє досліджувати два види **ВЗЗ** - паралельний за напругою (перемикач **S5**) та послідовний за струмом (перемикач **S6**). Для зменшення загального коефіцієнта підсилення використовується опір **R11.**

Перемикачі **S2 - S4** дозволяють здійснити незалежне дослідження окремих каскадів.

Для зняття **АЧХ** всього підсилювача перемикачі **S2 - S4** повинні бути ввімкнені.

Живлення макета здійснюється від джерела з напругою **+ 20 В.**

Домашнє завдання

1. Вивчити теоретичні положення та лекційний матеріал з даної теми.

2. Ознайомитись зі схемою лабораторної установки і системою комутації ланок макета.

3. Виявити вплив **ВЗЗ** різних типів на якісні показники **АЕП.**

4. Розробити методику експериментального дослідження впливу **ВЗЗ** на основні параметри та характеристики **АЕП.**

5. Ознайомитись з приладами та обладнанням, необхідним для проведення досліджень.

6. Розробити методику досліджень основних параметрів каскадів з різними схемами ввімкнення транзисторів.

Програма експериментальних досліджень

1. Підключити макет і впевнитись в його працездатності (перемикачі **S2 - S4** ввімкнені).

2. Дослідити **АЧХ** підсилювача :

а) без **ВЗЗ**;

б) при наявності **ВЗЗ**, послідовного за напругою;

в) при наявності **ВЗЗ**, паралельного за напругою;

г) при наявності **ВЗЗ**, послідовного за струмом.

Орієнтовний діапазон досліджувальних частот **20 Гц - 200 кГц**, вхідна напруга **Uвх = 45 мВ.**

Діапазон робочих частот та рівень вхідного сигналу можуть бути змінені з метою оптимізації процесу дослідження.

3. Розрахувати частотні спотворення на частотах **50 Гц** та **200 кГц** для всіх знятих **АЧХ**, визначити смугу пропускання підсилювача на рівні **3 дБ**, без **ВЗЗ** і при наявності різного типу **ВЗЗ.**

4. Виміряти коефіцієнт нелінійних спотворень підсилювача без **ВЗЗ** та при наявності **ВЗЗ**, послідовного за струмом, паралельного та послідовного за напругою, на частоті **1 кГц** (глибина **ВЗЗ** максимальна). Рівень вхідного сигналу підібрати.

5. Визначити фазові спотворення підсилювача без **ВЗЗ** і при наявності всіх видів **ВЗЗ** на частоті **100 Гц** (глибина **ВЗЗ** максимальна).

6. Визначити коефіцієнт передачі по напрузі, вхідний та вихідний опір емітерного повторювача на транзисторі **VT2.** Частота вхідного сигналу **Fвх = 1 кГц,** вхідна напруга **Uвх = 1 В.**

7. Визначити коефіцієнт передачі по напрузі, вхідний та вихідний опір каскаду з спільною базою на транзисторі **VT3.** Частота вхідного сигналу **Fвх = 1 кГц**, вхідна напруга **Uвх = 20 мВ.**

8. Визначити коефіцієнт передачі по напрузі, вхідний та вихідний опір каскаду з спільним емітером на транзисторі **VT4** без **ВЗЗ** і у випадку дії **ВЗЗ**, паралельної і послідовної по напрузі.

Досліджувальна та вимірювальна апаратура

1. Лабораторний стенд.
2. Джерело живлення.
3. Генератор сигналів низькочастотний **Г3-102**
4. Вимірювач нелінійних спотворень **С6-5** або **С6-7.**
5. Мілівольтметр **В3-38** або **В3-39, В3-40.**

6. Осцилограф **С1-67** або **С1-86.**
7. Фазометр **Ф2 - 28**.

Короткі методичні вказівки до вимірів та представлення їх результатів

1. Нелінійні спотворення необхідно вимірювати при декількох значеннях вхідної напруги сигналу, спостерігаючи при цьому за формою сигналу на вході і виході каскаду за допомогою осцилографа.

2. Для визначення вхідного опору підсилювального каскаду збирається схема **рис.2.14.** Подаючи з генератора необхідну вхідну напругу, частотою **F =1 кГц**, за допомогою змінного резистора **Rпот** забезпечити на вході досліджуваного каскаду **Uвх = Uген**, режим короткого замикання **Rпот.** Оскільки для вказаної схеми,

$$Uвх = Uген \frac{Rвх}{Rпот + Rвх},$$

при виконанні умови **Rвх = Rпот** ,на вході досліджуваного каскаду буде забезпечена вхідна напруга

$$Uвх = \frac{Uген}{2}.$$

Визначивши, за допомогою вимірювача опору, встановлене значення опору змінного резистора $R_{пот}$, є можливість визначити вхідний опір каскаду, **Rвх** = $R_{пот}$.

Резистор **470 Ом** використовується для визначення вхідного опору каскадів з **СБ**; **4,7 кОм та 47 кОм** - для визначення **Rвх** каскадів **СК** та **СЕ**, а також при наявності паралельного та послідовного **ВЗЗ.**

3. З метою уникнення похибки при вимірах, через близьке до одиниці значеня коефіцієнта передачі, коефіцієнт передачі **ЕП** по напрузі необхідно вимірювати за допомогою одного вольтметра, підімкненого на вхідні або вихідні клеми.

4. При визначенні вихідного опору різних схем підсилювальних каскадів використовується схема **рис.2.15.** Подаючи на вхід підсилювача сигнал, при відключеному опорі потенціометра, фіксують значення вихідної напруги. Потім паралельно вихідним клемам

приєднують змінний резистор і встановлюють, змінюючи положення його повзуна, напругу **Uвих / 2.** В цьому випадку **Rвих = Rпот.** Для визначення вихідного опору повторювачів використовують змінний резистор **470 Ом**, для інших схем - **4,7 кОм.**

5. Частотні спотворення і смугу пропускання підсилювача необхідно визначати з **АЧХ.**

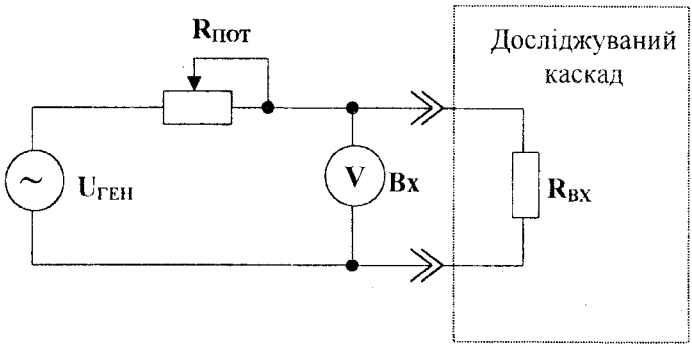


Рис. 2.14

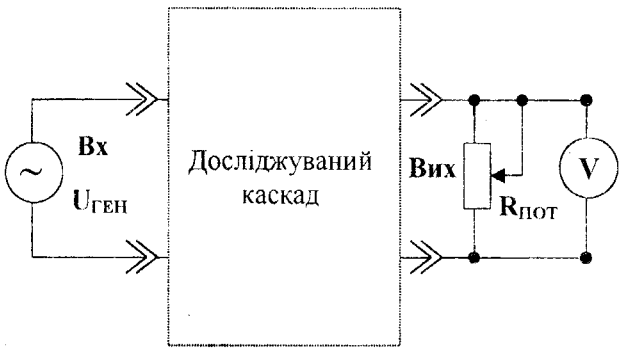


Рис. 2.15

Оформлення звіту

Оформлення звіту необхідно виконати згідно з вимогами викладеними у вступній частині даного посібника.

Контрольні запитання

1. Пояснити призначення від'ємного зворотного зв'язку.

2. Як впливає введення **ВЗЗ** різного виду на коефіцієнти підсилення, частотні, нелінійні та фазові спотворення ?

3. Як змінюється вхідний опір пристрою за рахунок дії послідовного або паралельного **ВЗЗ** ?

4. Як впливає на вихідний опір пристрою введення **ВЗЗ** за струмом або за напругою ?

5. Які властивості емітерного повторювача?

6. Яке призначення емітерного повторювача?

7. Які відмінності параметрів емітерного повторювача та витікового повторювача?

8. Які властивості підсилювача з спільною базою?

9. При яких умовах виникає самозбудження підсилювача з зворотним зв'язком.

10. Як змінюються частотні характеристики підсилювача при різних видах **ВЗЗ**, введенні в коло **ВЗЗ** частотнозалежних елементів?

11. При якому ВЗЗ, за струмом або за напругою, більша зміна напруги на виході при зміні навантаження?

12. Як зміниться вхідний опір пристрою при збільшенні опору джерела сигналу?

Лабораторна робота № 3

ДОСЛІДЖЕНЯ КАСКАДУ КІНЦЕВОГО ПІДСИЛЕНЯ

Мета роботи - дослідити основні параметри та характеристики двотактного безтрансформаторного каскаду кінцевого підсилення, що працює в режимах різних класів.

Теоретичні відомості

Напруги та струми, каскадів кінцевого підсилення (**ККП**), як правило, мають значно більші значення чим в каскадах попереднього підсилення. В зв'язку з цим, в **ККП** прагнуть використовувати всю динамічну характеристику, в тому числі і нелінійні області, що призводить до зростання нелінійних спотворень сигналу. Для **ККП** основними параметрами є коефіцієнти: підсилення по потужності, корисної дії, нелінійних спотворень.

В **ККП** можуть бути реалізовані різні класи режиму роботи підсилювального елемента: **А, В, АВ, С, Д.**

Робоча точка підсилювального елемента в режимі класу **А** вибирається на середині лінійного проміжку динамічної характеристики. В такому випадку вихідний струм підсилювального елементу протікає протягом усього періоду вхідного сигналу, **(рис.3.1).** Амплітуда змінної складової вихідного струму I_m не може бути більшою за струм спокою I_0 , середнє значення вихідного струму практично не змінюється при зміні вхідного сигналу.

В режимі класу **В** робоча точка вибирається в нижньому проміжку динамічної характеристики, струм спокою практично дорівнює нулю, а кут відтину вихідного струму дорівнює **90° (рис.3.2).**

В режимі класу **АВ** струм спокою складає **10...15%** максимального значення вихідного струму, кут відтину більше **90° (рис.3.3).**

Режими перелічених класів характеризуються різними значеннями вихідної потужності, **ККД**, коефіцієнта нелінійних спотворень. Найбільший **ККД** має режим класу **Д**, найменший - класу **А**. Найменшим значенням коефіцієнта нелінійних спотворень характеризується режим класу **А.**

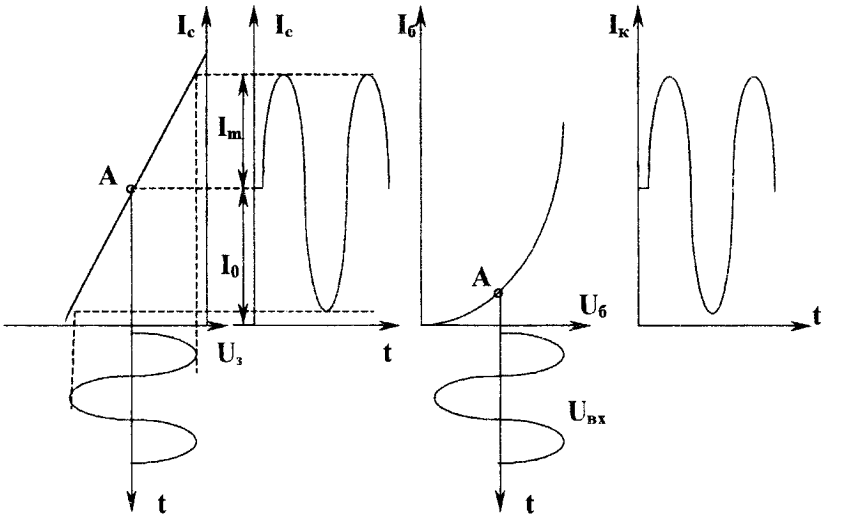

Iс
Iс
Iб
Iк
Im
I0
A
A
Uз
t
t
Uб
t
Uвх
t

Рис. 3.1

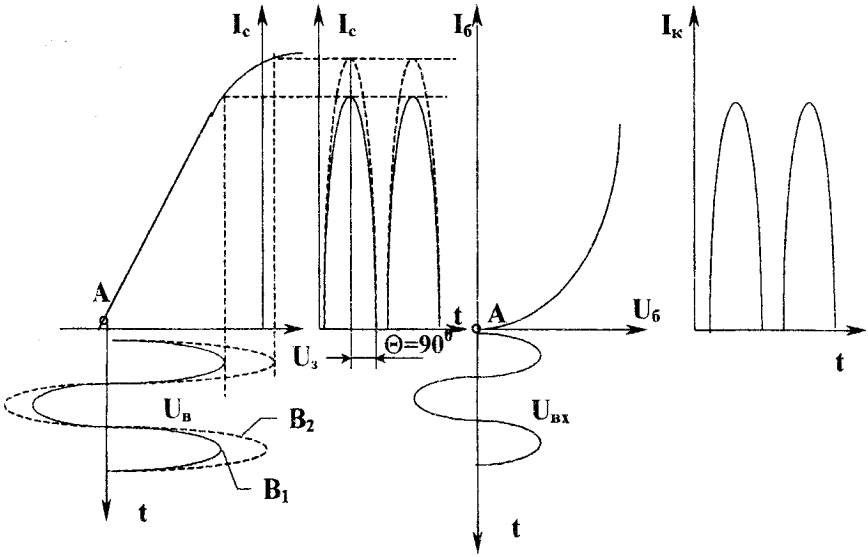

Iс
Iс
Iб
Iк
A
A
t
Uб
Uз
Θ=90°
t
UВ
B2
B1
Uвх
t
t

Рис. 3.2

Вихідна потужність (коливальна) $P_{\sim} = 0{,}5\ Im \times Um$, де **Um** – амплітуда вихідної напруги, та коефіцієнт нелінійних спотворень **ККП** залежать від опору навантаження.

З вихідних характеристик підсилювального елемента коливальна потуж ність може бути визначена площею прямокутного трикутника з катетами **Im** і **Um** **(рис.3.4,а).** При незмінному вхідному сигналі для малого опору навантаження (динамічна характеристика 1), площа трикутника, а відповідно, і коливальна потужність малі. При збільшенні навантаження (динамічна характеристика 2) площа трикутника і коливальна потужність зростають. Однак при значному збільшенні опору навантаження (динамічна характеристика 3) коливальна потужність зменшується. Графік залежності $P_{\sim} = f(R_H)$ має максимальне значення при оптимальному навантаженні, $R_H = R_{вих}$ **(рис.3.4,в).**

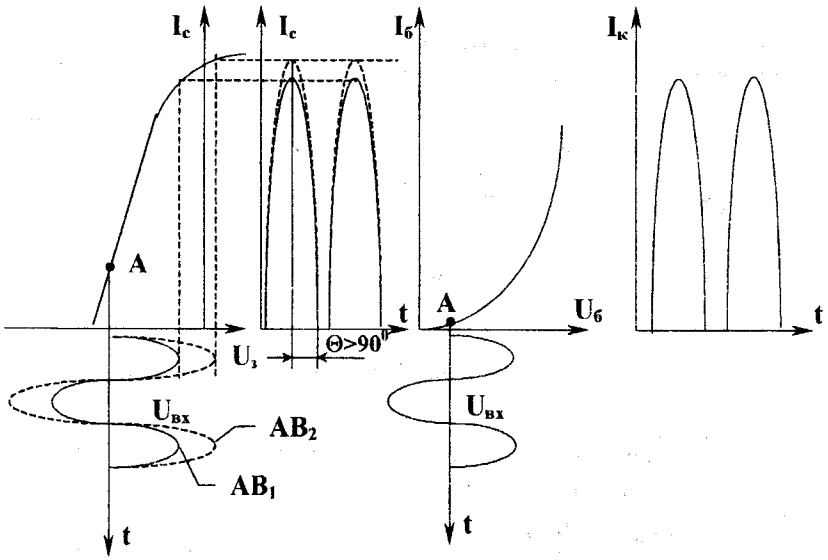
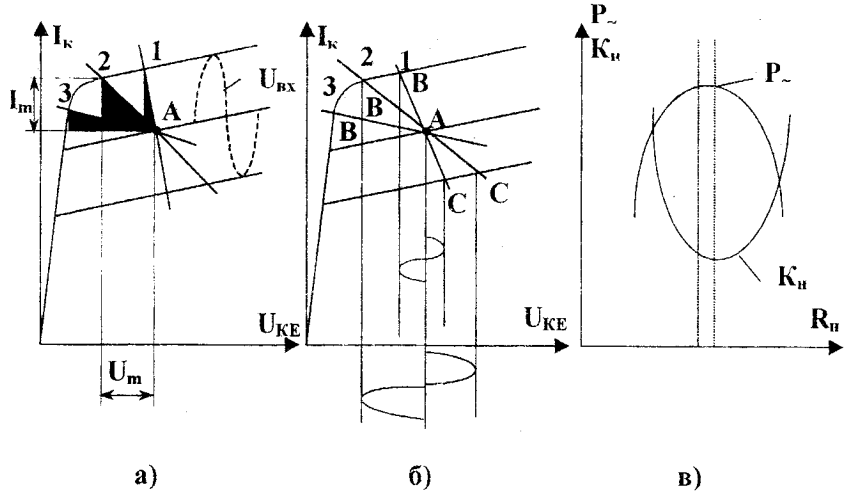


Рис. 3.3

Залежність коефіцієнта нелінійних спотворень від опору навантаження $K_H = f(R_H)$ можна прослідкувати по зміні форми вихідного сигналу при зміні R_H **(рис. 3.4,в).** Коли опір навантаження малий (динамічна характеристика 1), напівперіоди вихідного сигналу

відмінні за амплітудою **(рис.3.4,б)**, що свідчить про значні нелінійні спотворення сигналу. Відрізки динамічної характеристики **АВ** і **АС** не рівні. Збільшення опору навантаження (динамічна характеристика 2) призводить до зменшення нелінійних спотворень, відрізки **АВ** і **АС** практично рівні. Однак при подальшому збільшенні навантаження рівність відрізків **АВ** і **АС** порушується, що визначає зростання нелінійних спотворень.



а) б) в)

Рис. 3.4

Максимум вихідної потужності не співпадає з мінімумом нелінійних спотворень при зміні навантаження.

В **ККП** на біполярних транзисторах, при роботі їх в режимі класу **В,** вибір робочої точки робиться так, щоб уникнути появи додаткових нелінійних спотворень типу "сходинка". Можливість появи таких спотворень зумовлена тим, що подача синусоїдального сигналу на вхід **ККП,** при малих значеннях крутості прохідної характеристики транзистора в області малих напруг **(0,2...0,3 В),** призводить до спотворень синусоїди **(рис.3.5).** Для усунення таких спотворень на біполярних транзисторах вибір робочої точки здійснюється в точці різкого зростання вихідного струму **(р.т. A_1).**

Особливість безтрансформаторного **ККП** на транзисторах різної провідності - відсутність фазоінверсних каскадів. Різні характеристи-

ки транзисторів в плечах **ККП,** дозволяють отримати у навантаженні різні напрямки струмів сталої складової і парних гармонік.

Розрізняють безтрансформаторні **ККП** з одним і двома джерелами живлення **(рис. 3.6)**. Схема з двома джерелами живлення дозволяє приєднати опір навантаження без розділового конденсатора, оскільки потенціал середньої точки, при відсутності сигналу, дорівнює нулю **(рис. 3.6,б).** Розділовий конденсатор **С** одночасно є додатковим джерелом живлення для нижнього плеча схеми. Режими живлення плеч схеми підбираються таким чином, щоб опори верхнього та нижнього плеч були рівні. В такому разі, при відсутності сигналу, конденсатор **С** заряджається до напруги $E_К / 2$, котра є напругою живлення нижнього плеча схеми.

Для зменшення частотних спотворень значення розділового конденсатора вибирають з умови $1 / \omega_Н C << R$. З урахуванням цих вимог, при навантаженні одиниці **Ом**, ємність конденсатора **С** лежить в межах **1000...2000 мкФ**. При таких значеннях **С** напруга заряду конденсатора практично не змінюється з зміною амплітуди вихідного сигналу.

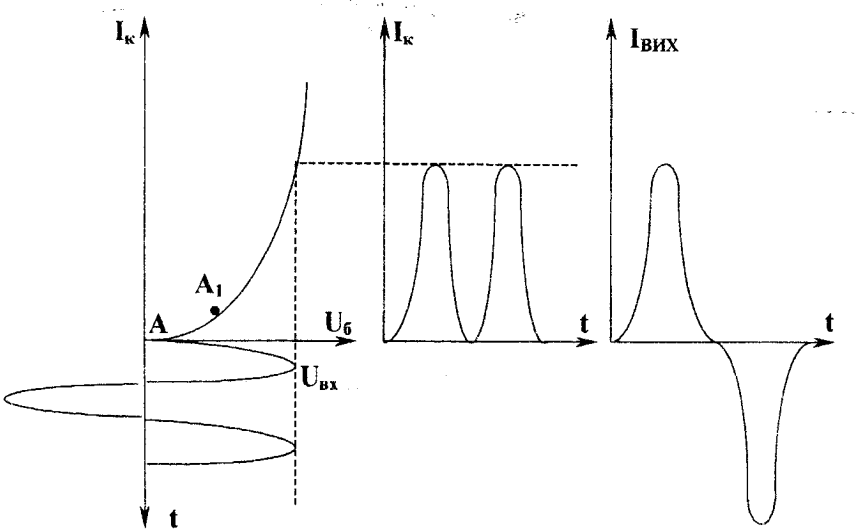


Рис. 3.5

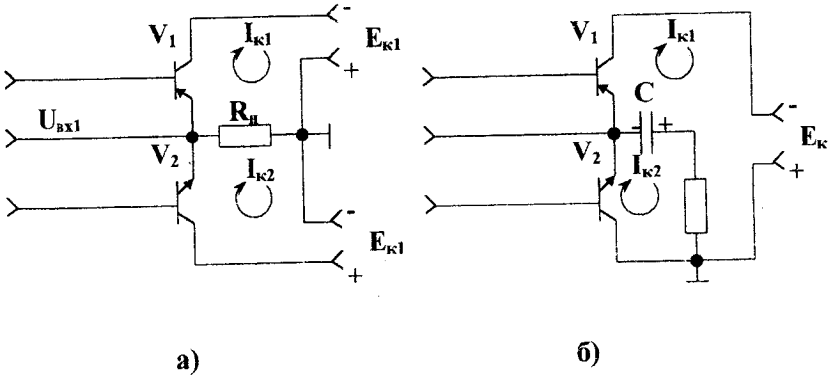


Рис. 3.6

Опис лабораторної установки

Лабораторний макет **(рис.3.7)** являє собою безтрансформаторний двотактний **ККП** на транзисторах **VT3** і **VT4** типу **КТ816Г** та **КТ817Г** з симетричним джерелом живлення. Передкінцевий каскад - емітерні повторювачі на аналогічних транзисторах, а каскад попереднього підсилення, виконаний на операційному підсилювачі **К140УД1Б** в схемі інвертуючого включення. Додаткове балансування нуля операційного підсилювача здійснюється резистором **R3.**

В макеті передбачено забезпечення різних режимів роботи **ККП,** шляхом зміни напруги зміщення транзисторів **VT3** і **VT4**, перемикач **S1.** Можливість підключеня, в характерних точках схеми, дозволяє досліджувати режими каскадів за постійним струмом та знімати осцилограми напруг. **ККП** працює з різними опорами навантаження **Rн**. Перемикач **S2** дозволяє досліджувати вплив навантаженя на параметри та характеристики **ККП.**

Домашнє завдання

1. Вивчити теоретичні положення, ознайомитись з схемою та системою комутації макету.

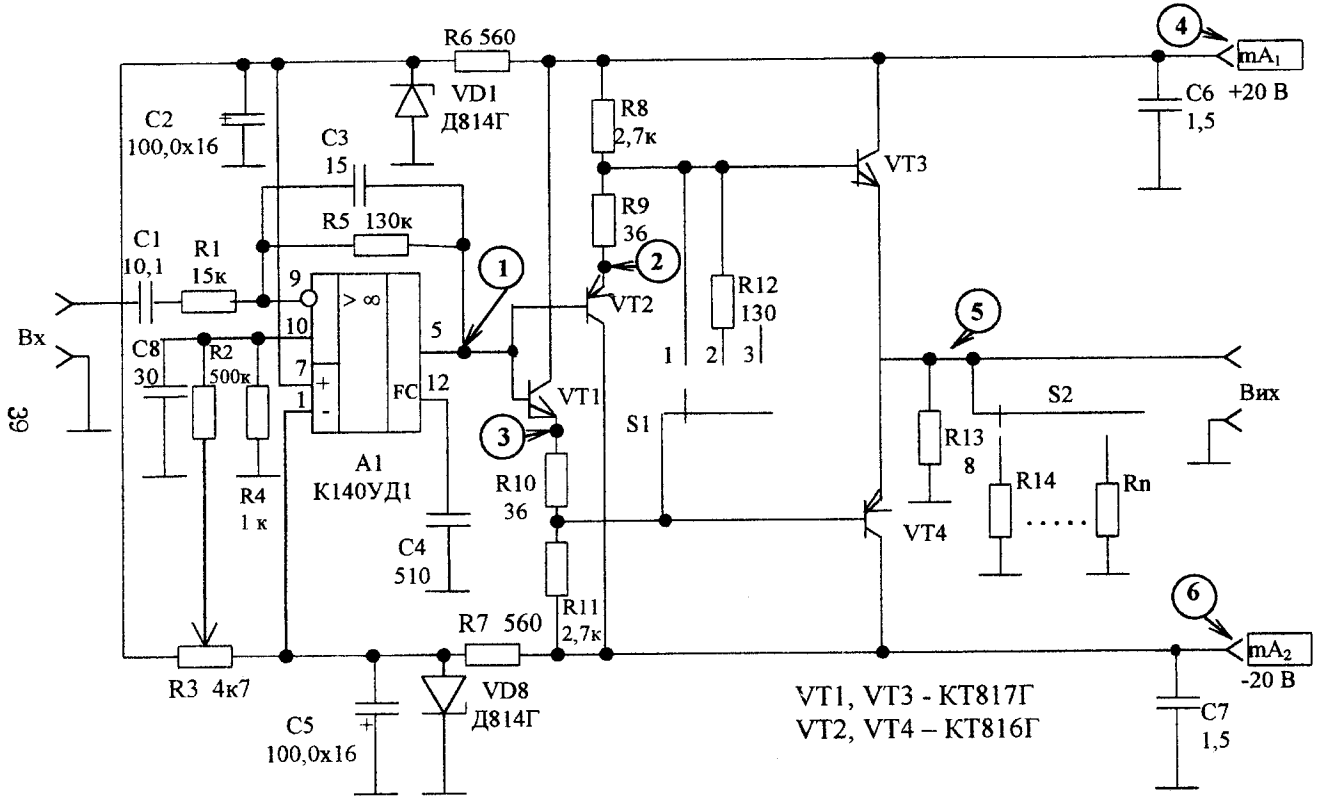

R6 560
VD1
Д814Г
C2
100,0x16
C3
15
R5 130к
C1
10,1
R1
15к
Вх
C8
30
R2
500к
R4
1 к
R3 4к7
A1
К140УД1
C4
510
C5
100,0x16
R7 560
VD8
Д814Г
R8
2,7к
R9
36
VT2
VT1
R10
36
R11
2,7к
R12
130
S1
VT3
VT4
R13
8
R14
Rn
S2
Вих
C6 +20 В
1,5
mA1
C7
1,5
mA2
-20 В
VT1, VT3 - КТ817Г
VT2, VT4 – КТ816Г

Рис. 3.7

2. Ознайомитись з параметрами та характеристиками транзисторів **КТ817Г** і **КТ816Г**, підібрати орієнтовне значення напруги зміщення, що забезпечить режими різних класів **(А, АВ, В).**

3. Розробити методику визначення споживаної потужності, вихідної потужності, потужності втрат, **ККД**, коефіцієнта нелінійних спотворень, коефіцієнта підсилення за напругою.

Програма експериментальних досліджень

1. При відсутності вхідного сигналу, дослідити режими **ККП** за постійним струмом при роботі в режимах різних класів.
2. Дослідити вплив навантаження на значення вихідної потужності підсилювача при роботі в режимах різних класів.
3. Для оптимального опору навантаження, для режимів різних класів визначити потужності: вихідну, споживану, втрат на транзисторах кожного з плеч; а також **ККД.**
4. Зафіксувати осцилограми сигналів, в характерних точках схеми, що відповідають режимам різних класів.
5. Дослідити вплив навантаження на нелінійні спотворення сигналу при роботі в режимах різних класів.
6. Дослідити вплив асиметрії **ККП** на нелінійні спотворення сигналу.
7. Дослідити **АЧХ** підсилювача.
8. Провести необхідні розрахунки, побудувати графіки, таблиці, зробити висновки.

Досліджувальна та вимірювальна апаратура

1. Лабораторний стенд.
2. Джерело живлення.
3. Генератор сигналів низькочастотний **Г3-102.**
4. Мілівольтметр **В3-38** або **В3-39, В3-40.**
5. Осцилограф **С1-67** або **С1-86.**
6. Вимірювач нелінійних спотворень **С6-5** або **С6-7.**

Короткі методичні вказівки до вимірів та подання результатів

Споживаний макетом струм вимірювати з урахуванням струму кожного з джерел.

Вихідну та споживану потужність визначати з виразів:

$$P_{вих} = \frac{U^2_{вих}}{R_н}, \qquad Po = E \times I_o.$$

При визначенні **ККД** вихідного каскаду враховувати тільки струм даного каскаду, він визначається як різниця струмів,спожитого всією схемою та струму попередніх каскадів.

Потужність втрат на колекторі транзистора, визначити з виразу.

$$Pк = 0{,}5(Po - Pвих).$$

При проведенні досліджень рівень вхідного сигналу макета встановити в межах **Uвх = 250 - 300 мВ.** Вихідний сигнал при цьому не повинен мати помітних нелінійних спотворень (при роботі в режимі класу **А**), а вихідна напруга повинна бути максимально можливою (на межі обмеження).

Частоту вхідного сигналу встановити рівною **1 кГц.** **АЧХ** досліджувати в діапазоні частот **20 Гц - 200 кГц.**

При дослідженні режимів різних класів особливу увагу звернути на залежність споживаного струму від рівня вхідного сигналу, встановити основні закономірності.

Оформлення звіту

Згідно з вимогами вступної частини.

Контрольні запитання

1. В чому полягає відмінність каскадів кінцевого та попереднього підсилення?
2. Чим викликане обмеження вихідної потужності підсилювача в режимі класу А при заданому коефіцієнті нелінійних спотворень ?
3. Як забезпечити реалізацію режимів різних класів ?

4. Яка залежність вихідної потужності **ККП** від опору навантаження?

5. Яка залежність коефіцієнта нелінійних спотворень **ККП** від опору навантаження?

6. Чому в двотактній схемі відбувається різке збільшення вихідної потужності, зменшення коефіцієнта нелінійних спотворень у порівнянні з однотактною ?

7. Які основні показники двотактних **ККП** (споживаний струм, споживана потужність, коефіцієнт нелінійних спотворень, потужність втрат, вихідна потужність) в режимах різних класів **(А, В, АВ)**?

8. В чому полягають причини появи додаткових спотворень типу "сходинка" ?

9. Яку умову необхідно забезпечити в **ККП** для його роботи в режимі максимальної вихідної потужності, без використання вихідного узгоджувального трансформатора ?

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ НА ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

Мета роботи - вивчити та експериментально дослідити різні схеми ввімкнення операційних підсилювачів, їх параметри і характеристики. Розробити експериментальні методики такого дослідження.

Теоретичні відомості

Операційний підсилювач (**ОП**) - це підсилювач, що виконується на базі диференціального підсилювача постійного струму і відповідає таким вимогам:

- великий вхідний опір (ідеальний **ОП** – $R_{ВХ} \to \infty$);
- малий вихідний опір (ідеальний **ОП** – $R_{ВИХ} \to 0$);
- великий коефіцієнт підсилення (10^{15}-10^{6} в смузі підсилення: нуль - одиниці **МГц**);
- підсилення як з інверсією сигналу, так і без інверсії;
- малий дрейф нуля.

Перша вимога дозволяє підімкнути **ОП** до будь-якого кола, не порушуючи його роботи. Друга вимога гарантує виконання **ОП** його функцій, незважаючи на величину і характер навантаження. Четверта - забезпечує охоплення **ОП** зворотним зв'язком будь - якого виду (додатний чи від'ємний).

При виконанні усіх вказаних умов передаточна характеристика усієї системи з великою точністю відповідає передаточній характеристиці кола зворотного зв'язку і практично незалежить від параметрів **ОП**.

Сучасна промисловість випускає багато типів інтегральних **ОП**, які мають малі габарити і масу, відповідно дешеві і доступні.

ОП використовуються в різних схемах ввімкнення.

Інвертувальний підсилювач

Інвертувальний підсилювач на **ОП** або інвертувальне ввімкнення **ОП**, реалізує паралельний **ВЗЗ** за напругою (**рис.4.1**).

Для інвертувальної схеми ввімкнення ідеального **ОП** коефіцієнт підсилення за напругою дорівнює:

$$K_U = -\frac{R2}{R1} = \frac{1}{\beta}, \qquad (4.1)$$

де β - коефіцієнт зворотного зв'язку.

Вихідна напруга має полярність, протилежну вхідній напрузі.

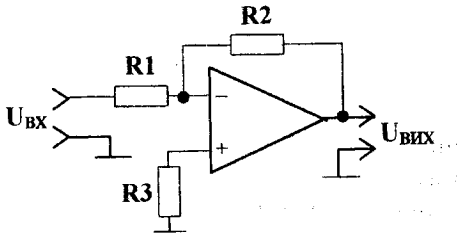


Рис. 4.1

Вхідний опір зі сторони джерела сигналу визначається як, $R_{ВХ} = R1$.

Вихідний опір такої схеми визначається зворотним зв'язком:

$$R^*_{ВИХ} = \frac{Uвих_{XX}}{Iвих_{КЗ}} = \frac{R_{ВИХ}}{1 + K_O}, \qquad (4.2)$$

де $R_{ВИХ}$ - вихідний опір **ОП** без **ЗЗ**; K_O - середнє значення коефіцієнта підсилення **ОП**.

Вплив $R_{ВХ}$ і K_O на вихідну напругу визначається співвідношенням:

$$U_{ВИХ} = -U_{ВХ}\frac{R2}{R1} \times \frac{1}{1 + \frac{1}{K_O}\left(1 + \frac{R3}{R1} + \frac{2R3}{R_{ВХ}}\right)}, \qquad (4.3)$$

де $R_{ВХ}$ - вхідний опір **ОП** без **ЗЗ**.

Вираз **(4.3)** показує, що коефіцієнт передачі реального **ОП** зі зворотним зв'язком менший ідеального значення **R2 / R1**. Похибка зростає при зменшенні K_O і $R_{ВХ}$.

Для зменшення зміщення нуля від дії вхідного струму під'єднують резистор **R3.** Резистор **R3** вибирається з умови:

$$R3 = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2}.$$

Неінвертувальний підсилювач

Це ввімкнення **ОП** з послідовним зворотним зв'язком за напругою **(рис.4.2)**.

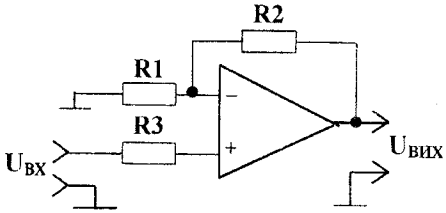


Рис. 4.2

Коефіцієнт передачі **неінвертувального підсилювача з** ідеальним **ОП** дорівнює:

$$K_U^* = -\frac{R2}{R1} + 1 = \frac{1}{\beta}.$$

Вхідний опір підсилювача:

$$R_{ВХ}^* = R_{ВХ}\left(1 + \beta K_O\right),$$

$$R_{ВХ}^* = R_{ВХ}\frac{K_O}{K_H^*}.$$

Вихідний опір підсилювача $R_{ВИХ}^* = \frac{R_{ВИХ}}{\left(1 + \beta K_O\right)}$.

Похибка неінвертувального підсилювача визначається виразом (4.3), якщо в ньому замість $U_{вх} \times \frac{R2}{R1}$ підставити $U_{вх} \times \frac{R1 + R2}{R1}$.

Такий підсилювач має ще одну похибку, що викликається кінцевим значенням коефіцієнта послаблення синфазної напруги:

$$U_{вих} = U_{вх} \frac{R1 + R2}{R1} \left(1 + \frac{1}{K_{пос.сф}}\right)$$

де $K_{пос.сф}$ - коефіцієнт послаблення синфазної напруги.

У випадку $\beta = 1$ підсилювач забезпечує $K_U = 1$ і використовується в якості електричного буфера, тобто це повторювач напруги на ОП (рис. 4.3).

Диференціальний підсилювач

Диференціальна схема ввімкнення ОП (рис.4.4) є поєднання інвертувальної та неінвертувальної схеми. Для пояснення принципа дії цієї схеми, треба мати на увазі, що різниця напруг між входами ОП приблизно дорівнює нулю.

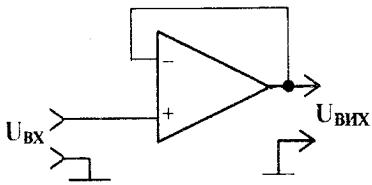


Рис. 4.3

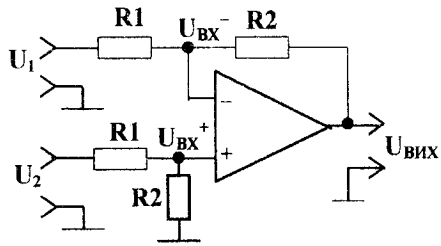


Рис. 4.4

В такому випадку $U_{вих}$ буде дорівнювати:

$$U_{вих} = (U_2 - U_1)\frac{R2}{R1}.$$

Опис лабораторного макету

Лабораторний макет **(рис.4.5)** це підсилювач на основі **ОП**, що дозволяє досліджувати його основні параметри, характеристики та схеми ввімкнення.

Перемикач **S1** забезпечує інвертувальне (полож. 1) та неінвертувальне (положення 2) ввімкнення **ОП.** Перемикач **S2,** в положенні **2,** забезпечує дослідження амплітудної характеристики без подачі сигналу від генератора. Перемикач **S3** призначений для зміни параметрів кола зворотного зв'язку, **S4** - параметрів коректуючого кола, **S5** - опору навантаження. Резистори **R5** та **R15** дозволяють визначити вхідний та вихідний опір схеми. Резистор **R11** забезпечує подачу на входи **ОП** постійної напруги, необхідної для дослідження амплітудної характеристики. Входи **X1** та **X2** призначені для прикладання вхідного сигналу та дослідження вхідного опору; **X3**, **X6** - для виміру вихідної напруги та вихідного опору; **X4**, **X5** та **X3**, **X4** -для виміру вхідної та вихідної напруги при дослідженні амплітудної характеристики; **X7**, **X6** - для під'єднання напруги живлення.

Домашне завдання

1. Вивчити теоретичні положення, ознайомитись зі схемою та системою комутації ланок макета.
2. Розрахувати значення коефіцієнтів підсилення для інвертувального та неінвертувального ввімкнення **ОП,** при значеннях номіналів, вказаних на схемі.
3. Розробити методику експериментального дослідження основних параметрів підсилювачів на основі **ОП.**
4. Розробити методику проведення обчислювального експерименту по визначенню основних параметрів підсилювачів на **ОП**. Підготувати дані для вводу в **ПЕОМ** (використовуючи програми **Micro-Cap 2,3,4,5**).

Програма експериментальних досліджень

1. Дослідити амплітудну характеристику **ОП** на постійній напрузі при різних опорах навантаження. Визначити за амплітудною характеристикою коефіцієнт підсилення.

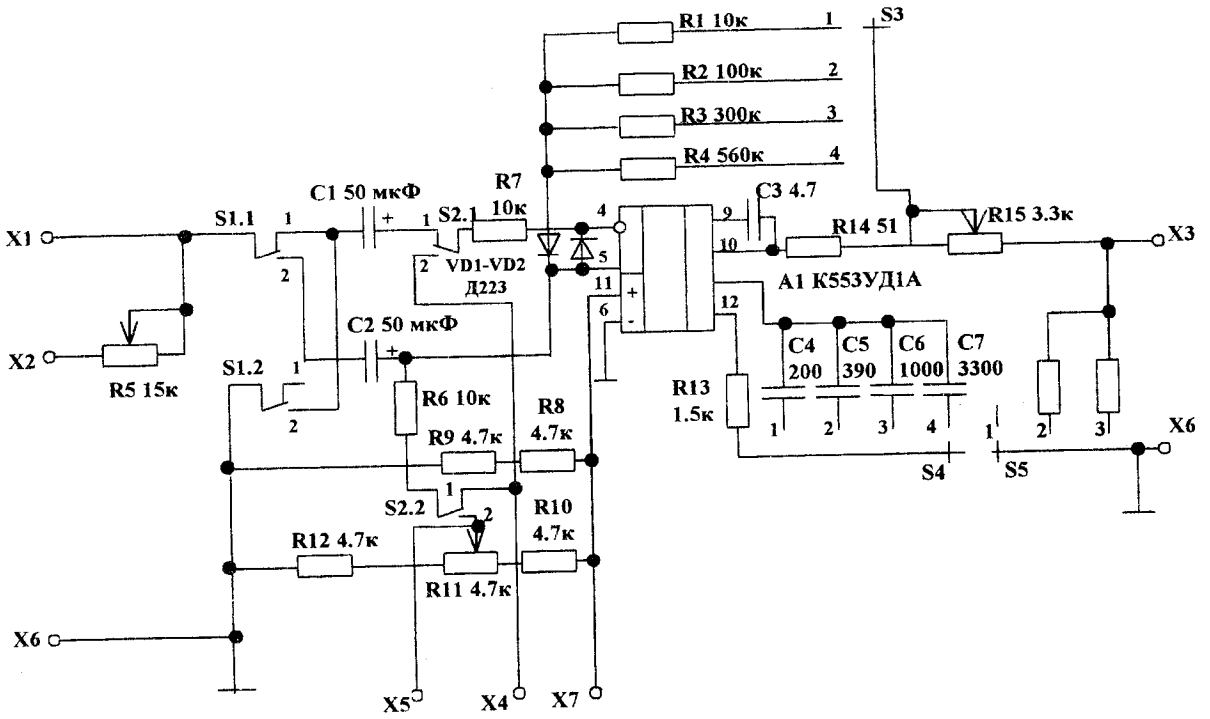

R1 10к
R2 100к
R3 300к
R4 560к
S3
C1 50 мкФ
S1.1
S2.1
R7
10к
C3 4.7
R14 51
R15 3.3к
X1
X3
VD1-VD2
Д223
A1 К553УД1А
X2
C2 50 мкФ
C4
200
C5
390
C6
1000
C7
3300
R5 15к
S1.2
R6 10к
R13
1.5к
R8
4.7к
R9 4.7к
X6
S4
S5
S2.2
R10
4.7к
R12 4.7к
R11 4.7к
X6
X5
X4
X7

Рис. 4.5

2. Дослідити **АЧХ** при інвертувальному ввімкненні **ОП** та різній глибині **ВЗЗ.** Оцінити розрахункове значення коефіцієнтів підсилення та фактично отримане.

3. Дослідити АЧХ при неінвертувальному ввімкненні ОП та різній глибині **ВЗЗ.** Оцінити розрахункове значення коефіцієнтів підсилення та фактично отримане.

4. Для випадків **пп.2,3** визначити смугу пропускання, крутість нахилу **АЧХ** в перехідній області (**ВЧ** та **НЧ**), вхідний та вихідний опори. **Опори для інвертувального та неінвертувального ввімкнення** визначити для гранично близької глибини зворотного зв'язку.

5. Дослідити вплив коректуючого кола та визначити смугу пропускання для різних сталих часу коректуючого кола, форму **АЧХ** в перехідній області та її нахил. Змоделювати фазочастотну характеристику підсилювача, що відповідає отриманій **АЧХ.**

6. Дослідити фазочастотну характеристику підсилювача. Проаналізувати ступінь стійкості підсилювача в різних частотних областях та різних значеннях коректуючого кола.

Досліджувальна та вимірювальна апаратура

1. Лабораторний стенд.
2. Джерело живлення.
3. Генератор сигналів низькочастотний **Г3-102.**
4. Генератор сигналів високочастотний **Г4-102**
5. **Вольтметр** цифровий **В7-27А.**
6. Мілівольтметр **В3-38** або **В3-39, В3-40.**
7. Осцилограф **С1-67** або **С1-86.**
8. Вимірювач нелінійних спотворень **С6-5** або **С6-7.**

Короткі методичні вказівки до вимірів та подання результатів

1. Для дослідження амплітудної характеристики необхідно **S2** встановити в положення **2 (рис. 4.5)**, а рівень вхідної постійної напруги змінювати резистором **R11.** Рівень вхідної напруги і її полярність вимірювати на входах **X4**, **X5** цифровим вольтметром постійного струму. Звернути увагу на характер зміни вихідної напруги при різних опорах навантаження **S5.** Визначити за амплітудною

характеристикою коефіцієнт підсилення схеми. Зафіксувати значення постійної вихідної напруги при **Uвх = 0.**

2. При дослідженні **АЧХ** рівень вхідного сигналу необхідно вибирати таким, щоб були відсутні помітні спотворення вихідного сигналу. Перемикач **S4** встановити в положення, яке відповідає мінімальній коректуючій ємності. Резистори **R5** і **R15** закоротити. Побудову **АЧХ** проводити в логарифмічному масштабі.

3. Вхідний і вихідний опір визначити на частоті сигналу **1кГц** за допомогою резисторів **R5** та **R15** за методикою, яка викладена в лабораторній роботі **№ 2.** Номінал резистора **R5,** при подачі сигналу від генератора на вхід **X2,** підібрати таким чином, щоб сигнал на вході **X1** був в два рази менший за сигнал, який подається з генератора, у цьому випадку **Rвх = R5.**

При визначенні **Rвих,** попередньо, виміряти вихідну напругу при відімкненому навантаженні. Потім підключити навантаження і змінюючи **R15** домогтись значення вихідної напруги, що дорівнює **0,5 Uвих** без навантаження. Очевидно, що в такому випадку буде виконуватись умова:

$$R_{вих} + R14 + R15 = R_н \; ; \; R_{вих} = R_н - R14 - R15.$$

Опори резисторів **R5** та **R15** виміряти омметром.

Оформлення звіту

Згідно з вимогами вступної частини.

Контрольні запитання

1. Наведіть значення основних параметрів **ОП**, використаного в макеті **(Rвх, Rвих, Ко, Fод).**

2. Наведіть розрахункові вирази для коефіцієнтів підсилення інвертувального і неінвертувального ввімкнення **ОП**, а також їх конкретні значення для номіналів, вказаних на макеті при різній глибині від'ємного зворотного зв'язку.

3. Наведіть амплітудну характеристику **ОП** при живленні однополярним джерелом.

4. Яке призначення елементів **R6, R8, R9** ?

5. Яке призначення діодів **VD1,VD2** ?

6. Яке призначення резистора **R14** ?

7. Яка форма **АЧХ** та **ФЧХ** некоректованого **ОП** ?

8. Поясніть у чому полягає принцип корекції **АЧХ ОП** коректуючою **RC** – ланкою ?

9. Як змінюється вхідний опір схеми при **інвертувальному** та **неінвертувальному ввімкненні ОП**?

10. Чому ОП рідко використовується як підсилювач сигналів при розімкненому колі **ЗЗ** ?

11. Чому неможливо використовувати ОП без корекції при малих значеннях коефіцентів підсилення зі **ЗЗ**.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мамонкин И.Г. Усилительные устройства. - М.: Связь, 1977.
2. Рудик В.Д. Конспект лекцій до курсу "Аналогові електронні пристрої". - Вінниця: ВПІ, 1991.
3. Манаев Е.И. Основы радиоэлектроники. - М.: Радио и связь, 1985.
4. Терещук Р.М. и др. Полупроводниковые приёмно – усилительные устройства. Справ. радиолюбителя. - Киев: Наук. думка, 1989.
5. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике. - М.: Мир, 1991.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1993.
7. Сухов М.Е. та ін. Схемотехніка високоякісного звуковідтворення. - Київ: Техніка, 1992.
8. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре. - М.: Сов. радио, 1979.
9. Достал И. Операционные усилители. - М.: Мир, 1982.
10. Щербаков В.И., Грездов Г.И. Электронные схемы на операционных усилителях. Справочник. - Киев: Техніка. 1983.
11. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. - М.: Мир, 1988.
12. Транзисторы для аппаратуры широкого применения. Справочник. Под. ред. Б.Л.Перельмана. - М.: Радио и связь, 1981.

Міністерство освіти України
Вінницький державний технічний університет

Вадим Данилович Рудик

Аналогові та підсилювальні електронні пристрої

Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Редактор В.О. Дружиніна
Коректор З.В. Поліщук

Тир 65 прим. Зам №
ВДТУ, 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе 95.