

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторного практикуму з дисципліни
“АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНІКА”
для студентів спеціальності
6.050801 “Мікро- та наноелектроніка”,
денної й заочної форм навчання

2012

Методичні вказівки до лабораторного практикуму з дисципліни “Аналогова схемотехніка” для студентів спеціальності 6.050801 “Мікро- та наноелектроніка” денної і заочної форм навчання / Укл.: Н.М. Нагорна, Є.Л. Жавжаров. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012.– 54 с.

Укладачі: Н.М. Нагорна, ст. викладач

Є.Л. Жавжаров, доц., канд.фіз.-матем. наук

Рецензент: О.В.Томашевський, доц., канд.техн.наук

Відповідальний за випуск: Г.В. Сніжной, доц., канд.фіз.-матем. наук

Затверджено
на засіданні кафедри
“Мікро- та наноелектроніка”
Протокол № 9
від 15 червня 2012 р.

ЗМІСТ

1 Лабораторна робота №1 „Підсилювач на біполярному транзисторі з двополярним живленням”	4
1.1 Теоретичні відомості	4
1.2 Обладнання.	9
1.3 Порядок виконання роботи.	9
1.4 Порядок обробки результатів експериментів.	11
1.5 Зміст звіту.	12
1.6 Контрольні запитання.	12
2 Лабораторна робота №2 „Диференційний каскад”.	13
2.1 Теоретичні відомості	13
2.2 Обладнання.	21
2.3 Порядок виконання роботи.	22
2.4 Зміст звіту.	25
2.5 Контрольні запитання	26
3 Лабораторна робота №3 „Двокаскадний підсилювач”	27
3.1 Теоретичні відомості.	27
3.2 Дослідження двокаскадного підсилювача.	32
3.3 Дослідження впливу кіл зворотних зв'язків на параметри двокаскадного підсилювача.	35
3.4 Порядок оформлення звіту.	37
3.5 Контрольні запитання.	37
4 Лабораторна робота №4 „Операційний підсилювач”.	38
4.1 Теоретичні відомості.	38
4.2 Завдання.	45
4.3 Порядок виконання завдання.	45
4.4 Порядок оформлення звіту.	50
4.5 Контрольні запитання.	51
Рекомендована література.	52
Додаток А Правила роботи з осцилографом С1-73.	53

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 "ПІДСИЛЮВАЧ НА БІПОЛЯРНОМУ ТРАНЗИСТОРІ З ДВОПОЛЯРНИМ ЖИВЛЕННЯМ"

Метою роботи є:

- вивчення принципу роботи підсилювального каскаду на інтегральному біполярному транзисторі з двополярним живленням;
- дослідження схемотехнічних особливостей підсилювача з двополярним живленням;
- дослідження характеристик і розрахунок параметрів підсилювального каскаду.

1.1 Теоретичні відомості

Схема найпростішого підсилювача на біполярному транзисторі з двополярним живленням показана на рис. 1.1.

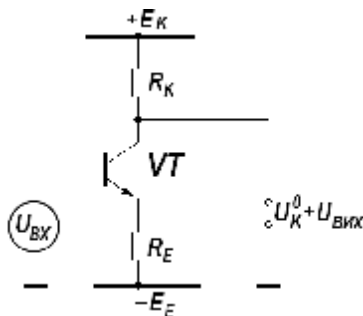


Рисунок 1.1 - Схема підсилювального каскаду

Якщо вхідний сигнал U_{BX} дорівнює нулю, то у схемі протікають складові струмів, обумовлені джерелами E_K і E_E . Режим відсутності вхідного сигналу прийнято називати режимом спокою підсилювача.

При наявності вхідного сигналу до постійних складових додаються змінні складові, пропорційні величині U_{BX} . Отже, у робочому режимі повні величини напруг і струмів можна записати у вигляді:

$$U = U^0 + \Delta U, \quad I = I^0 + \Delta I.$$

Тут верхній індекс "0" відповідає постійним складовим, змінні складові позначені як збільшення.

Аналіз постійних і змінних складових можна проводити незалежно. Роздивимось постійні складові, властиві режиму спокою.

Приймемо $U_{BX} = 0$ і зобразимо еквівалентну схему (рис. 1.2).

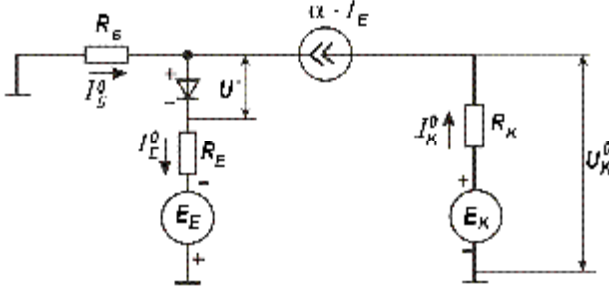


Рисунок 1.2 - Еквівалентна схема каскаду для постійних складових

У еквівалентній схемі на рис. 1.2 використана спрощена модель Еберса-Молла, що відповідає активному режиму, а в ланцюг бази для спільності введений опір R_{ϕ} . Він містить у собі внутрішній опір r_{ϕ} , а також опір джерела сигналу або попереднього каскаду.

При обході вхідного контуру схеми на рис. 1.2 отримаємо рівняння

$$I_{\phi}^0 R_{\phi} + U^* + I_E^0 R_E - E_E = 0. \quad (1.1)$$

Після підстановки $I_{\phi}^0 = (1 - a)I_E^0$ у (1.1) легко знайти струм емітера

$$I_E^0 = \frac{E_E - U^*}{R_E + (1 - a)R_{\phi}}. \quad (1.2)$$

Потенціал колектора отримаємо із співвідношення:

$$U_K^0 = E_K - I_K^0 R_K, \quad (1.3)$$

$$\text{де } I_K^0 = a I_E^0.$$

Сукупність величин I_E^0 та U_K^0 визначають робочу точку транзистора в режимі спокою.

Опір R_E , як правило, вибирають з умови:

$$R_E \gg (1 - a) R_{\phi}.$$

Сигнал U_{BX} викликає зміни потенціалів і струмів у схемі, тобто "породжує" змінні складові. Для знаходження цих складових використовують малосигнальну модель транзистора.

Малосигнальна еквівалентна схема каскаду в області низьких частот показана на рис. 1.3.

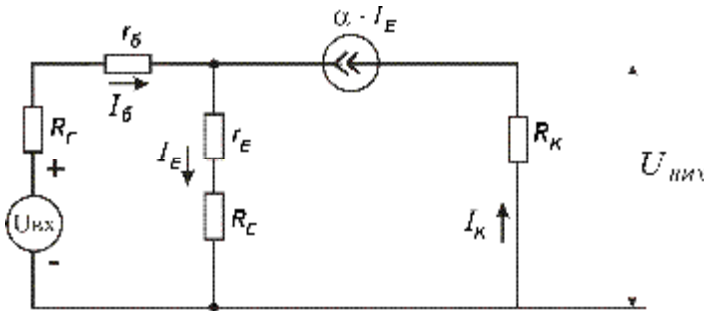


Рисунок 1.3 - Малосигнальна еквівалентна схема каскаду в області низьких частот

На схемі рисунка 1.3 величини струмів і напруг записані без знаку Δ.

Відповідно схемі рис. 1.3

$$U_{BX} = I_{\phi}(R_{\Gamma} + r_{\phi}) + I_E(R_E + r_E).$$

Підставляючи $I_{\tilde{o}} = (1-a)I_E$, легко знайти струм емітера:

$$I_E = \frac{U_{BX}}{R_E + r_E + (1-a)(R_{\Gamma} + r_{\tilde{o}})}. \quad (1.4)$$

Коефіцієнти (розмірні і безрозмірні), що зв'язують змінні складові між собою і з вхідним сигналом, називають диференціальними параметрами підсилювача.

Найбільш важливим з цих параметрів є коефіцієнт підсилення:

$$K = \frac{U_{BIX}}{U_{BX}}.$$

Вихідним сигналом прийнято вважати змінну складову колекторної напруги ΔU_K .

З рис. 1.3 випливає:

$$U_{B\tilde{E}\tilde{O}} = -aI_E R_K.$$

З урахуванням виразу для струму I_E з (1.4) і ділення частин рівняння на U_{BX} , знаходимо коефіцієнт підсилення

$$K = -\frac{aR_K}{R_E + r_E + (1-a)(R_{\Gamma} + r_{\tilde{o}})}. \quad (1.5)$$

Знак "мінус" свідчить про розходження полярностей вхідного і вихідного сигналів.

Якщо перетворити співвідношення (1.5), підставивши в нього R_K і R_E зі співвідношень (1.2) і (1.3), і вважаючи $r_E \ll R_E$, можна одержати:

$$K = -\frac{E_K - U_K^0}{U_E - U^*}. \quad (1.6)$$

З даного співвідношення витікає обмеженість значення коефіцієнта підсилення і його залежність від робочих струмів.

Важливим параметром підсилювача є вхідний опір

$$R_{BX} = U_{BX} / I_{BX},$$

де I_{BX} - змінна складова базового струму;

U_{BX} - змінна складова вхідної напруги, яка прикладається безпосередньо до бази, тобто $R_{\Gamma} = 0$.

Стосовно джерела сигналу вхідний опір відіграє роль навантаження. Тому, чим більше вхідний опір, тобто чим менше навантажене джерело сигналу, тим краще передається його напруга на вхід каскаду.

Зі схеми на рис. 1.3, вважаючи $R_{\Gamma} = 0$, одержуємо

$$U_{BX} = I_{\bar{o}} r_{\bar{o}} + I_E (R_E + r_E).$$

Підставивши $I_E = (b + 1)I_{\bar{o}}$ і розділивши рівняння на $I_{\bar{o}} = I_{BX}$, знаходимо вхідний опір у загальному вигляді:

$$R_{BX} = r_{\bar{o}} + (b + 1)(R_E + r_E). \quad (1.7)$$

Третій важливий параметр підсилювача - вихідний опір

$$R_{BIX} = (U_{BIX})_{XX} / (I_{BIX})_{K3},$$

де $(U_{BIX})_{XX}$ - вихідна напруга при холостому ході каскаду (при цьому $R_H = \infty$);

$(I_{BIX})_{K3}$ - вихідний струм при короткому замиканні вихідних затискачів (мається на увазі коротке замикання для змінних складових).

Вихідний опір характеризує навантажувальну здатність каскаду: чим він менше, тим більший струм можна відбирати у зовнішнє нава-

нтаження і тим менше може бути зовнішній опір.

Для схеми, показаної на рис. 1.3, немає необхідності проводити спеціальні розрахунки. Оскільки вхідна частина схеми відділена від виходу генератором струму і оскільки цей генератор при $U_{BX} = 0$ не діє, можна відразу записати $R_{BHX} = R_K$.

1.2 Обладнання

У даній лабораторній роботі використовується збірка транзисторів 198НТ1А (рис. 1.4, а) або збірка транзисторів 1НТ251 (рис. 1.4, б).

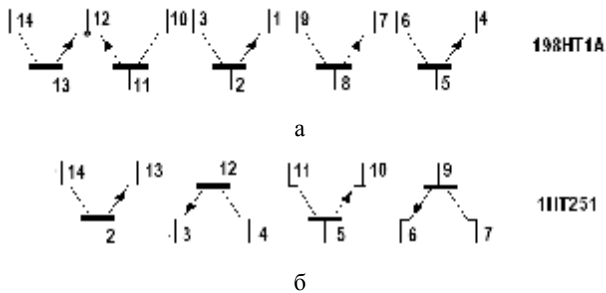


Рисунок 1.4 - Маркування мікросхеми 198НТ1А, КР198НТ1А (а) і мікросхеми 1НТ251 (б)

1.3 Порядок виконання роботи

1.3.1 Складіть і випробуйте схему для зняття вихідних характеристик інтегрального транзистора (рис. 1.5).

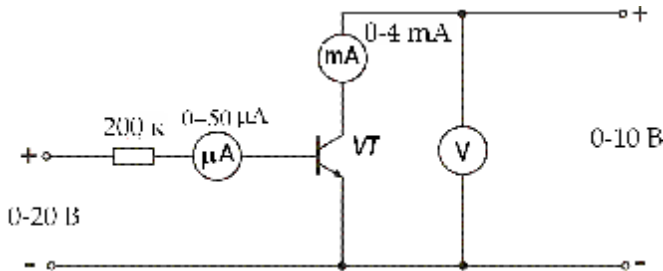


Рисунок 1.5 - Схема для зняття вихідних характеристик транзистора $I_K = f(U_{KE})$

1.3.2 Зніміть вихідні характеристики інтегрального транзистора.

Вихідні характеристики транзистора знімаються при трьох значеннях струму бази в інтервалі $I_{\bar{\sigma}} = 10 \dots 35$ мкА. На схемі рис. 1.5 біля приладів зазначені границі їх вимірювань.

1.3.3 Зберіть схему підсилювального каскаду на інтегральному транзисторі з двополярним живленням (рис. 1.6).

В схемі $R_K = 1000$ Ом; $R_E = 200$ Ом. Необхідно пам'ятати, що вивід резистора R_E зв'язується з мінусовим полюсом джерела живлення E_E , а полюс "плюс" джерела живлення E_E необхідно з'єднати з "землею".

1.3.4 Зніміть передавальну і вхідну характеристики підсилювача. Для цього необхідно спочатку установити напруги живлення $E_K =$ плюс 4В; $E_E =$ мінус 1 В, а потім, змінюючи вхідну напругу, зніміть залежності $U_{BIX} = f(U_{BX})$ і $I_{BX} = f(U_{BX})$.

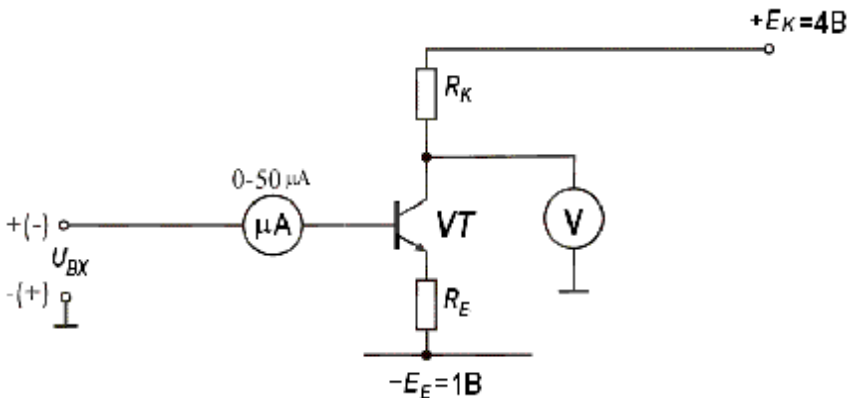


Рисунок 1.6 - Схема підсилювального каскаду на інтегральному транзисторі з двополярним живленням

Передавальна характеристика підсилювача, що досліджується, розташована у I та II квадрантах координатної площини. Тому для зняття її ділянки у II квадранті необхідно змінити полярність вхідного джерела напруги.

1.4 Порядок обробки результатів експериментів

1.4.1 За вихідними характеристиками визначте коефіцієнт підсилення транзистора:

$$b = \Delta I_K / \Delta I_{\sigma} \quad \text{при} \quad U_{KE} = 2 \text{ В.}$$

1.4.2 На вихідних характеристиках транзистора проведіть навантажувальну пряму за виразом:

$$U_{KE} = E_K + E_E - I_K (R_K + R_E / a),$$

на котрій необхідно зазначити робочу точку підсилювача (U_{KE}^0, I_K^0).

Коефіцієнт підсилення за струмом транзистора в схемі зі спільною

базою
$$a = \frac{b}{1 + b}.$$

Використовуючи отримані залежності $U_{BHX} = f(U_{BX})$ і $I_{BX} = f(U_{BX})$, визначте коефіцієнт підсилення каскаду і вхідний опір каскаду.

Коефіцієнт підсилення каскаду розраховується за формулою:

$$K = \Delta U_{BHX} / \Delta U_{BX}.$$

Отримане значення треба порівняти з розрахунковим, обчисленим за формулами (1.5) і (1.6). При виконанні розрахунків прийняти, що опір в колі бази дорівнює опоріві мікроамперметра, тобто $R_{\sigma} = 2000 \text{ Ом}$. Його необхідно урахувати у формулі (1.5). Параметри транзистора $r_E = 15 \text{ Ом}$; $r_{\sigma} = 10 \text{ Ом}$. Падіння напруги на відкритому емітерному переході U^* необхідно визначити з формули (1.2).

Вхідний опір каскаду:

$$R_{BX} = \Delta U_{BX} / \Delta I_{BX}.$$

Отримане значення треба порівняти з розрахунковим, обчисленим за формулою (1.7).

1.5 Зміст звіту

Звіт повинен містити :

- найменування і мету роботи;
- схему для зняття вихідних характеристик інтегрального транзистора;
- схему для зняття параметрів підсилювального каскаду;
- таблиці спостережень;
- вихідні характеристики транзистора;
- передавальну і вхідну характеристики підсилювального каскаду;
- розрахунки параметрів;
- стислі висновки за результатами роботи.

1.6 Контрольні запитання

- 1 Які схематичні особливості має досліджуваний підсилювач?
- 2 Що являє собою режим спокою підсилювача?
- 3 Як можна визначити значення елементів схеми, якщо задана робоча точка транзистора в режимі спокою?
- 4 Як визначаються значення змінних струмів і напруг підсилювача, якщо відоме значення вхідної напруги?
- 5 Як побудувати навантажувальну пряму транзистора за постійним струмом?
- 6 Що являють собою диференціальні параметри підсилювача?
- 7 За схемою підсилювального каскаду визначте спосіб вмикання транзистора.
- 8 За рахунок чого в підсилювачі відбувається підсилення потужності вхідного сигналу?
- 9 Чому в малосигнальній еквівалентній схемі каскаду (рис. 1.3) відсутні джерела E_E , E_K ?
- 10 Якщо до підсилювача з двополярним живленням під'єднується значне ємнісне навантаження, то малий вихідний опір підсилювача сприяє цьому?
- 11 Виведіть формулу $a = \frac{b}{1 + b}$.
- 12 Як зміниться навантаження джерела вхідного сигналу, якщо вхідний опір підсилювача збільшити?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

"ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ КАСКАД"

Метою роботи є: вивчення принципу роботи каскаду; визначення його основних малосигнальних параметрів; виявлення розбалансу каскаду від дестабілізуючих факторів.

2.1 Теоретичні відомості

2.1.1 Режим спокою диференційного каскаду

Диференційний каскад є основою для побудови операційного підсилювача. Схема диференційного каскаду приведена на рис. 2.1.

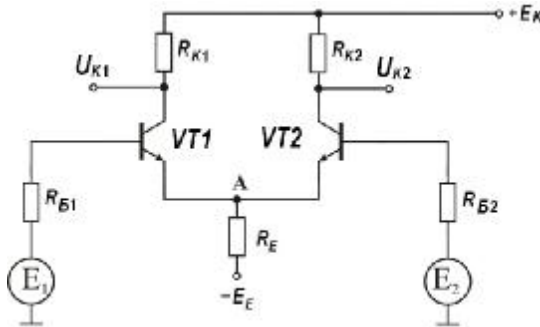


Рисунок 2.1 - Схема диференційного каскаду

За своїми підсилювальними властивостями транзистори **VT1** і **VT2** повинні бути ідентичними (так само, як і резистори R_{K1} та R_{K2}) Це досягається виконанням їх методом планарної технології на одній кремнієвій пластині в безпосередній близькості один від одного в єдиному технологічному циклі. Режим роботи каскаду за постійним струмом задається за допомогою резистора R_E .

При цьому струми у колекторних ланцюгах схеми

$$I_{K1} = I_{K2} = \frac{a}{2} \left(\frac{E_E - U_{E\delta} - I_{\delta} R_{\delta}}{R_E} \right)$$

Робоча точка знаходиться в активній області характеристик транзистора.

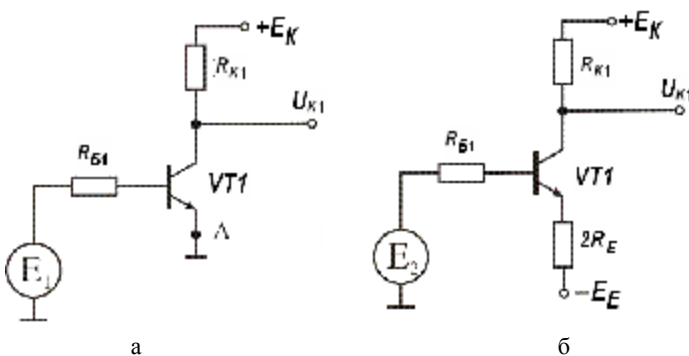
Ідентичність елементів каскаду забезпечує за відсутності сигналів на входах рівність потенціалів U_{K1} та U_{K2} і приблизно однакове їх змінювання з температурою Це, в кінцевому підсумку, дозволяє використовувати каскад для підсилювання малих сигналів, що повільно змінюються.

2.1.2 Підсилювальні властивості диференційного каскаду

Для аналізу підсилювальних властивостей каскаду зручно розглянути реакцію каскаду на парафазний і синфазний сигнали.

Щоб подати на входи парафазний сигнал, треба установити напруги генераторів E_1 і E_2 рівними за величиною та протилежними за фазою. Прикладення на входи каскаду такої напруги приведе до однакового за абсолютною величиною і протилежного за фазою змінювання струмів колекторів транзисторів. В такому випадку їх сумарний струм, що протікає крізь резистор R_E , не змінюється.

Не зміниться також потенціал точки A (рис. 2.1). Це дає можливість оцінити підсилювальні властивості каскаду на основі аналізу одного його плеча, вважаючи його каскадом зі спільним емітером (СЕ). Еквівалентна схема плеча диференційного каскаду для підсилення парафазного сигналу зображена на рис. 2.2, а.



а - для підсилення парафазного сигналу;

б - для підсилення синфазного сигналу

Рисунок 2.2 - Еквівалентні схеми плеча диференційного каскаду

Використовуючи відомі співвідношення для каскаду СЕ, отримаємо вираз для коефіцієнта підсилення парафазного сигналу:

$$K_{Unap} = \frac{U_{BHX}}{E_{BX}} = b \frac{R_{K1}}{R_{\bar{o}} + R_{BX_E}}. \quad (2.1)$$

Якщо $R_{\bar{o}} \ll R_{BX_E}$, то

$$K_{Unap} = b \frac{R_K}{R_{BX_E}} = \frac{a R_K}{R_{BX_{\bar{o}}}} \approx \frac{R_K}{r_E} = \frac{R_K I_K}{j_T}. \quad (2.2)$$

Останнє співвідношення у формулі (2.2) дає значення K_{Unap} з деяким завищенням, яке тим менше, чим менше струм I_K . Вхідний опір каскаду для парафазного сигналу:

$$R_{BXnap} = R_{BX_E} = r_{\bar{o}} + r_E(b+1) \approx \frac{j_T(b+1)}{I_K} \quad (2.3)$$

може становити одиниці - десятки кілоом у залежності від величини струму через каскад.

При поданні синфазного сигналу напруги генераторів E_1 і E_2 повинні бути рівними не тільки за величиною, але також повинні збігатися і за фазою. Подання такої напруги на входи каскаду спричиняє ідентичні синфазні змінення струмів колекторів. При цьому змінення струму через резистор R_E дорівнює подвоєному зміненню струму колектора. Ця умова дозволяє аналіз каскаду для змінного струму звести до аналізу одного плеча, якщо включити у емітерне коло опір $2R_E$ (рис. 2.2, б).

Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу дорівнює:

$$K_{Uсинф} = \frac{U_{BHX}}{E_{BX}} = \frac{bR_K}{R_{\bar{o}} + R_{BX_E} + 2R_E(b+1)}. \quad (2.4)$$

На практиці $R_{\bar{o}}, R_{BX_E} \ll 2R_E(b+1)$.

У такому випадку

$$K_{U\text{синф}} \approx \frac{aR_K}{2R_E}. \quad (2.5)$$

Через те, що $2R_E \gg r_E$, то $K_{U\text{синф}} \ll K_{U\text{нар}}$.

Вхідний опір каскаду для синфазного сигналу можна виразити як:

$$R_{BX\text{синф}} = R_{BX_E} + 2R_E(b+1) \approx 2R_E(b+1). \quad (2.6)$$

Неважко побачити, що $R_{BX\text{синф}} \gg R_{BX\text{нар}}$.

Реальний сигнал може бути розкладений на синфазну і парафазну складові:

$$E_{BX\text{нар}} = \pm \frac{E_1 - E_2}{2}; \quad E_{BX\text{синф}} = \frac{E_1 + E_2}{2}.$$

У такому випадку підсилення довільного сигналу можна оцінити, якщо використати лінеаризовану модель каскаду, припускаючи при цьому, що підсилення кожного сигналу відбувається незалежно:

$$\begin{aligned} U_{K1} &= K_{U\text{нар}} E_{1\text{нар}} + K_{U\text{синф}} E_{1\text{синф}}, \\ U_{K2} &= K_{U\text{нар}} E_{2\text{нар}} + K_{U\text{синф}} E_{2\text{синф}}. \end{aligned}$$

Якщо вимірювати вихідний сигнал як різницю напруги між колекторами $U_{ВІХ} = U_{K1} - U_{K2}$, то виявиться, що за умови ідентичності елементів каскаду

$$\begin{aligned} U_{ВІХ\text{нар}} &= (E_1 - E_2) K_{U\text{нар}}; \\ U_{ВІХ\text{синф}} &= 0. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Тобто каскад реагує тільки на різницю вхідних напруг. Тому він називається диференційним.

Можна показати, що при неідентичності елементів каскаду подання синфазного сигналу приведе до появи на виході парафазного сигналу, і навпаки. Це небажане явище.

Значно менше підсилення синфазного сигналу в порівнянні з парафазним є цінною властивістю каскаду і дозволяє зменшити вплив зміни температури і напруг живлення E_K , E_E на вихідний сигнал. Такі змінення однаково діють на обидва транзистори і тому є синфазними. Прагнуть так побудувати каскад, щоб ослаблення синфазного сигналу, яке характеризується коефіцієнтом ослаблення синфазного сигналу $K_{OCсинф}$:

$$K_{OCсинф} = K_{Unna} / K_{Uccин} ,$$

було максимальним.

З цієї метою замість резистора R_E часто використовують динамічний вихідний опір транзистора r_{KE} (рис. 2.3).

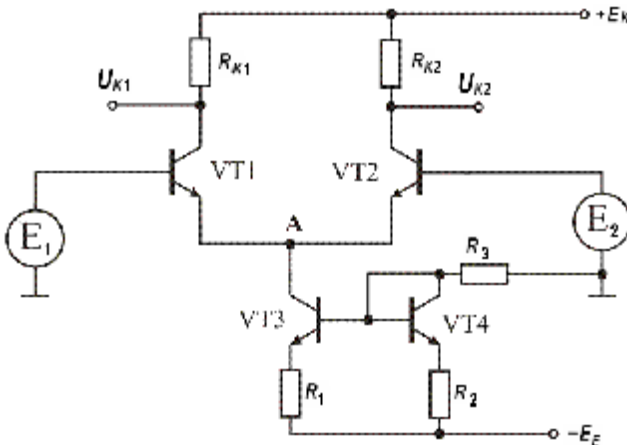


Рисунок 2.3 - Схема диференційного каскаду з джерелом струму на транзисторі

Транзистор $VT3$ при цьому задає і стабілізує струми транзисторів $VT1$, $VT2$. Ослаблення синфазного сигналу тоді буде дорівнювати

$$K_{OC\sin\phi} = \frac{2r_{KE}}{r_E}.$$

2.1.3 Передавальна характеристика каскаду

Подання на входи диференційного каскаду парафазного сигналу приводить до рівних, але протилежних змінень потенціалів його колекторів. Передавальні характеристики каскаду зображені на рис. 2.4. По нахилу передавальної характеристики легко визначається коефіцієнт $K_{U\text{нар}}$. Максимально можлива амплітуда вихідного сигналу визначається тоді, коли один транзистор знаходиться у режимі відсікання, а другий - у режимі насичення.

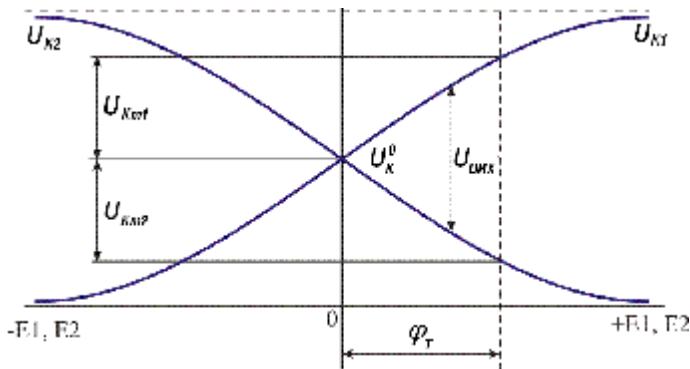


Рисунок 2.4 - Передавальні характеристики каскаду для парафазного сигналу

Оцінка максимальної зміни потенціалу колектора і відповідного вхідного сигналу робиться за положенням робочої точки

$$U_K^0 = E_K - I_K R_K. \quad (2.8)$$

З рис. 2.4 видно, що при максимальній амплітуді вихідної напруги, рівній U_{Km1} або U_{Km2} , максимально допустима вхідна напруга, що відповідає роботі в активній області характеристик транзистора, складає $j_T = 25$ мВ при $T = 300$ К.

2.1.4 Розбаланс і температурний дрейф каскаду

У реальному каскаді невелика, але кінцева різниця у властивостях транзисторів $VT1$ і $VT2$, а також резисторів R_{K1} та R_{K2} , завжди має місце. Це приводить до появи різниці напруг на виходах каскаду:

$$U_{K1} - U_{K2} = I_{K1}R_{K1} - I_{K1}R_{K2}$$

навіть при відсутності вхідного сигналу. Розглядаючи малі приращення ΔI_{K1} , ΔI_{K2} , ΔR_{K1} , ΔR_{K2} і нехтуючи членами вищого порядку малості, можна записати

$$U_{K1} - U_{K2} = I_K \Delta R_K - \Delta I_K R_K, \quad (2.9)$$

$$\text{де } I_K = (I_{K1} + I_{K2})/2; \quad R_K = (R_{K1} + R_{K2})/2.$$

Розбаланс каскадів оцінюють напругою U_{3M}^0 , яку необхідно прикласти до входу, щоб збалансувати каскад:

$$U_{3M}^0 = (U_{K1} - U_{K2})/K_{Unap}. \quad (2.10)$$

Найбільш суттєво впливає на розбаланс неідентичність параметрів транзисторів, а також опорів у колах їх баз. Це приводить до переваги другого члена у виразі (2.9). Сильний вплив на розбаланс струмів робить нерівність напруг $U_{Eб1}$ і $U_{Eб2}$. Різниця напруг:

$$\Delta U_E = U_{E\bar{6}1} - U_{E\bar{6}2}$$

еквівалентна парафазному сигналу, поданому на вхід схеми. Розбаланс струмів колектора, викликаний цією причиною, дорівнює:

$$\Delta I_K / I_K = \Delta U_E / j T.$$

Другою причиною розбалансу струму каскаду є різниця коефіцієнтів підсилення за струмом транзисторів ($b_1 \neq b_2$). У цьому випадку навіть при рівності емітерних струмів

$$I_{E1} = I_{E2} = (E_E - U_{E\bar{6}}) / (2R_E),$$

струми їх колекторів, так само як і базові струми, виявляться різними. Різниця колекторних струмів приводить до розбалансу каскаду.

Різниця базових струмів створює на опорах $R_{\bar{6}}$ розбаланс входних напруг $\Delta U_{BX} = \Delta I_{\bar{6}} R_{\bar{6}}$, що еквівалентно входному парафазному сигналу, який викличе додаткову зміну вихідної напруги $\Delta U_{ВИХ} = \Delta U_{BX} K_{Unap}$.

До аналогічного ефекту приводить третя причина – нерівність опорів джерел сигналу у колах баз ($R_{\bar{6}1} \neq R_{\bar{6}2}$), що створює розбаланс входного сигналу $\Delta U_{BX} = \Delta R_{\bar{6}} I_{\bar{6}}$ навіть за умови повної симетрії транзисторів. Для зменшення впливу базового струму бажано, щоб диференційні каскади працювали при малих струмах, транзистори мали високе β , а джерело сигналу було низькоомним.

Сумарне зміщення нуля каскаду від трьох причин можна записати як

$$U_{3M}^0 = \Delta U_E + \Delta I_{\bar{6}} R_{\bar{6}} + \Delta R_{\bar{6}} I_{\bar{6}}, \quad (2.11)$$

де $I_{\bar{6}} = (I_{\bar{6}1} + I_{\bar{6}2}) / 2$; $R_{\bar{6}} = (R_{\bar{6}1} + R_{\bar{6}2}) / 2$.

При добре підібраній парі транзисторів ΔU_{3M}^0 знаходиться в межах ± 2 мВ. Якщо $R_{\sigma 1} = R_{\sigma 2} = 0$, то $\Delta U_{3M}^0 \cong \Delta U_E$.

Температурний дрейф вихідної напруги зміщення у припущенні, що $\Delta U_{3M}^0 \cong \Delta U_E$, можна оцінити за формулою

$$e^T_{3M} = \Delta U_{3M}^0 / \Delta T = \Delta U_{3M}^0 / T,$$

тобто дрейф прямо пропорційний початковому зміщенню каскаду і обернено пропорційний температурі. На практиці температурний дрейф e^T_{3M} складас 3...10 мкВ/К при 300К.

2.2 Обладнання

При виконанні лабораторної роботи на стенді встановлюється панель "Диференційний каскад", на якій змонтована схема диференційного підсилювача. Схема досліджуваного каскаду приведена на рис. 2.5. Вона має високе значення K_{Unap} . Для зручності вимірів на

панелі змонтований дільник напруги, що дозволяє подавати на входи як синфазний, так і парафазний сигнали. Дана схема дозволяє ввести в кола баз резистори R_6, R_7 для здійснення розбаланса опорів баз транзисторів. Резистор R_1 необхідний для зняття вихідних характеристик транзистора.

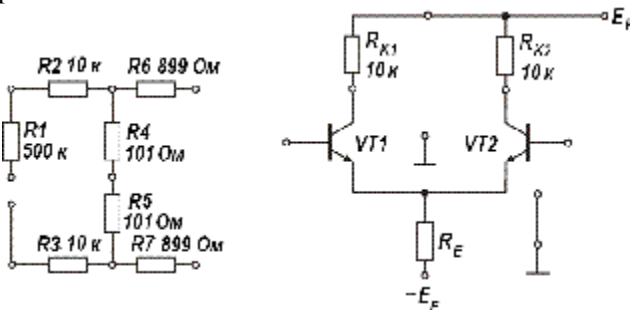


Рисунок 2.5 – Схема досліджуваного каскаду

2.3 Порядок виконання роботи

2.3.1 Установіть на стенд панель "Диференційний каскад".

2.3.2 Зніміть вихідні характеристики транзистора. Для цього необхідно зібрати схему, показану на рис. 2.6. В коло бази транзистора підключіть резистор $R1$. Вихідні характеристики транзистора зніміть при трьох значеннях струму бази (4, 8, 12 мкА), змінюючи напругу E_2 у межах від 0 до 10 В.

2.3.3 Оцініть параметри диференційного каскаду в режимі за постійним струмом. Для цього зберіть схему, показану на рис. 2.7. Встановіть напруги джерел живлення $E_K = E_E = 10$ В. Виміряйте потенціали колекторів і емітерів, при цьому бази транзисторів повинні бути заземлені.

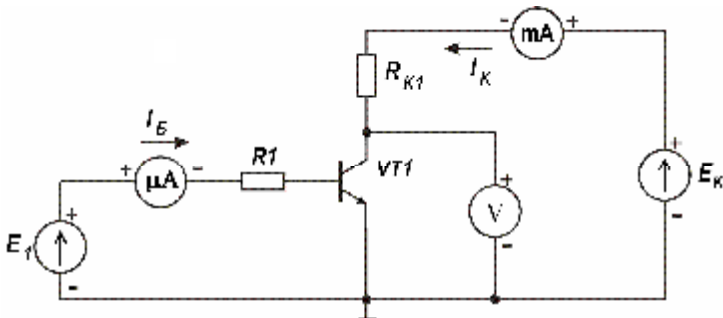


Рисунок 2.6 - Схема для отримання вихідних характеристик транзистора

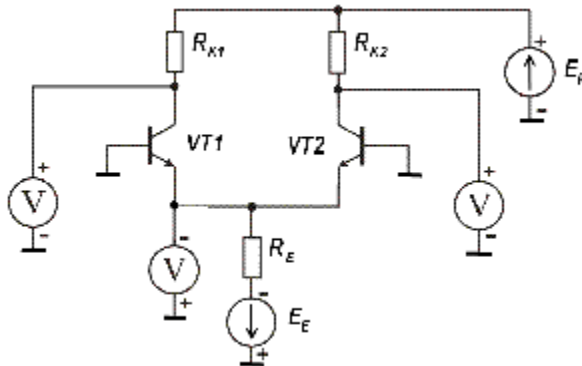


Рисунок 2.7 - Схема для вимірювання U_{K1}^0, U_{K2}^0, U_E

Оцініть струми колекторів транзисторів за формулами

$$I_{K1} = \frac{E_K - U_{K1}^0}{R_{K1}}; \quad I_{K2} = \frac{E_K - U_{K2}^0}{R_{K2}}.$$

Використовуючи параметри елементів, приведені на схемі досліджуваного каскаду (рис. 2.5), і результати оцінки струмів транзисторів, розрахуйте $K_{U_{нар}}$, $K_{U_{синф}}$, $R_{ВХ_{нар}}$, $R_{ВХ_{синф}}$ за формулами (2.2), (2.5), (2.3), (2.6) відповідно. Оцініть величину $K_{ОС_{синф}} = K_{U_{нар}} / K_{U_{синф}}$ та максимальну амплітуду вихідного сигналу

$$U_{Km1} = U_{Km2} = E_K - U_K^0.$$

2.3.4 Зніміть передавальні характеристики ДК, побудуйте їх, визначте параметри ДК. Для цього подайте на входи підсилювача постійну напругу через дільник сигналу. Зніміть і побудуйте передавальні характеристики каскаду як для парафазного, так і для синфазного сигналів на входах підсилювача. Схема для зняття передавальних характеристик каскаду при парафазному сигналі на входах приведена на рис. 2.8, при синфазному сигналі - на рис. 2.9.

По нахилу передавальних характеристик знайдіть $K_{U_{нар}}$, $K_{U_{синф}}$. Визначте робочу точку на вихідних статичних характеристиках транзистора.

Порівняйте результати вимірювань і розрахунків за п. 2.3.4 з результатами розрахунків за п. 2.3.3.

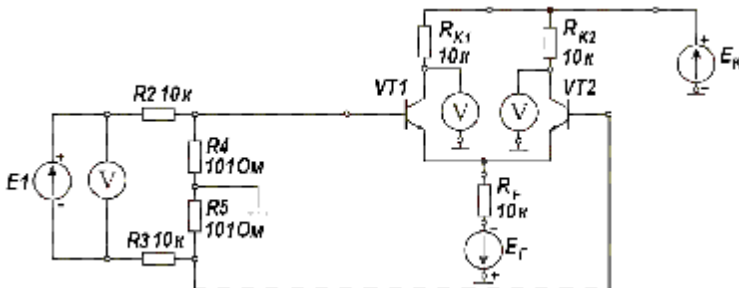


Рисунок 2.8 - Схема для зняття передавальних характеристик каскаду для парафазного сигналу

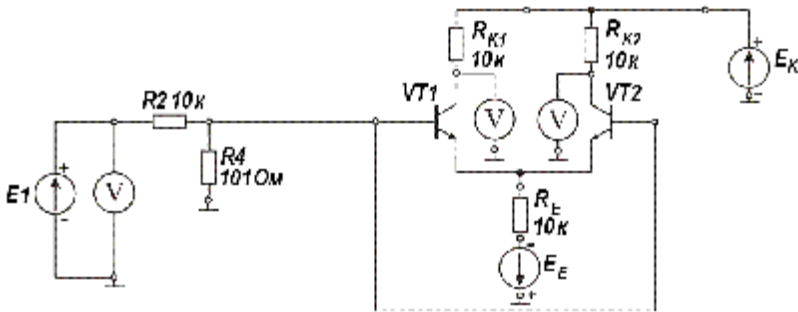


Рисунок 2.9 - Схема для зняття передавальних характеристик каскаду для синфазного сигналу

2.3.5 Визначте напругу зміщення диференційного каскаду ΔU_{3M}^0 . Напруга зміщення каскаду розраховується за формулою

$$\Delta U_{3M}^0 = (U_{K1} - U_{K2}) / K_{Unap}, \quad (2.11)$$

при цьому різниця $U_{K1} - U_{K2}$ вимірюється при замкнених на землю входах. Напруга зміщення каскаду зв'язана з різницею напруг ΔU_E співвідношенням $\Delta U_E \approx \Delta U_{3M}^0$.

2.3.6 Оцініть вплив розбалансу опорів в колах баз транзисторів на напругу зміщення. Для цього необхідно здійснити розбаланс опорів у колах баз транзисторів (рис. 2.10) та виконати спостереження за показами вимірювальних приладів.

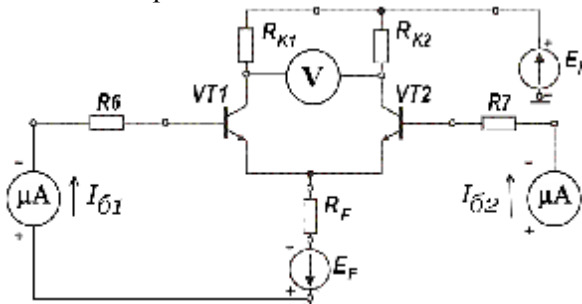


Рисунок 2.10 - Схема для дослідження розбалансу у колах баз транзисторів

Оцініть напругу зміщення нуля каскаду за формулою (2.11). Порівняйте отриманий експериментальний результат з теоретично очікуваним, розрахованим за формулою (2.11).

2.3.7 Оцініть вплив зміни напруги живлення ΔE_1 і ΔE_2 на напругу зміщення нуля каскаду. Для цього E_1 і E_2 змінюйте по черзі в межах $\pm 25\%$ від номінальних значень. Розрахуйте коефіцієнти чутливості $\Delta U_{3M}^0 / \Delta E_1$ і $\Delta U_{3M}^0 / \Delta E_2$.

2.4 Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- найменування і мету роботи;
- схему диференційного каскаду (рис. 2.1);
- схему (рис. 2.6), таблиці спостережень вихідних характеристик транзистора і графіки вихідних характеристик;
- схему для вимірювання параметрів U_{K1}^0 , U_{K2}^0 , U_E (рис. 2.7) та результати їх спостережень;
- розрахунки параметрів ДК за п. 2.3.3;
- схему (рис. 2.8), таблиці спостережень передавальних характеристик каскаду для режиму парафазного сигналу і графіки передавальних характеристик;
- схему (рис. 2.9), таблиці спостережень передавальних характеристик каскаду для режиму синфазного сигналу і графіки передавальних характеристик;
- результати розрахунків параметрів ДК за п. 2.3.4;
- порівняльний аналіз результатів вимірів і розрахунків за п.2.3.3 з результатами розрахунків за п. 2.3.4;
- результати вимірювань і розрахунків напруги зміщення диференційного каскаду ΔU_{3M}^0 за п. 2.3.5;
- результати вимірювань і розрахунків напруги зміщення диференційного каскаду ΔU_{3M}^0 за п. 2.3.6;
- порівняльний аналіз результатів розрахунків напруги зміщення нуля каскаду за п. 2.3.5 і п. 2.3.6;

- оцінку впливу зміни напруг живлення ΔE_1 і ΔE_2 на зміщення нуля каскаду;
- стислі висновки за результатами роботи.

2.5 Контрольні запитання

- 2 1 Який принцип роботи диференційного каскаду?
- 3 Методика знаходження вхідних опорів.
- 4 Яке призначення генератора струму в диференційному каскаді?
- 5 Визначення парафазного сигналу. Підсилювальні властивості каскаду при подаванні парафазного сигналу. Коефіцієнт підсилення парафазного сигналу.
- 6 Визначення синфазного сигналу. Підсилювальні властивості каскаду при подаванні синфазного сигналу. Коефіцієнт підсилення синфазного сигналу.
- 7 Розкладання довільного сигналу на парафазну і синфазну складові.
- 8 Як можна виміряти вихідний сигнал диференційного каскаду? Чому такий каскад зветься диференційним?
- 9 Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу. Що він характеризує?
- 10 Розбаланс диференційного каскаду та його основні причини.
- 11 Розрахувати напругу зміщення, необхідну для того, щоб збалансувати каскад, якщо відомі величина розбалансу та K_{Unap} (за завданням викладача). На який вхід каскаду у даному випадку треба подавати ΔU_{3M}^0 ?
- 12 Визначення температурного дрейфу вихідної напруги. Шляхи його зменшення.
- 13 Як працює диференційний каскад в режимі спокою?
- 14 Як забезпечується ідентичність елементів диференційного підсилювача?
- 15 Чому при поданні парафазного сигналу підсилювальні властивості диференційного каскаду оцінюються на основі аналізу роботи його одного плеча?
- 16 Які дестабілізуючі фактори можуть впливати на роботу ДК?
- 17 Як визначити температурний дрейф вихідної напруги зміщення нуля?

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

"ДВОКАСКАДНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ"

Метою роботи є:

- вивчення принципів побудови багатокаскадних підсилювачів;
- ознайомлення з системою параметрів підсилювачів;
- дослідження характеристик і параметрів двокаскадного підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком;
- дослідження впливу кіл зворотних зв'язків на параметри двокаскадного підсилювача.

3.1 Теоретичні відомості

3.1.1 Основні властивості двокаскадного підсилювача

Окремий підсилювальний каскад, як правило, не може забезпечити потрібний коефіцієнт підсилення. Тому будують багатокаскадні підсилювачі, у яких окремі каскади з'єднуються послідовно.

Сучасні інтегральні багатокаскадні підсилювачі мають різне призначення. Це готові функціональні вузли з відомими параметрами. Комбінуючи та з'єднуючи їх поміж собою відповідним чином, реалізують багатокаскадні підсилювачі, які мають необхідні параметри та характеристики перетворення.

Існують наступні види зв'язків між підсилювальними каскадами: гальванічний (безпосередній), резистивно-ємнісний (за допомогою RC -кіл), трансформаторний, оптронний, зв'язок за допомогою частотно-залежних кіл. Частіше використовують гальванічний і резистивно-ємнісний зв'язки.

На рис. 3.1 приведена схема двокаскадного підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком на $n-p-n$ транзисторах.

Підсилювач складається з двох підсилювальних каскадів зі спільним емітером, з'єднаних між собою через ємність зв'язку $C3$, ввімкнену між колектором транзистора $VT1$ і базою транзистора $VT2$. Ємність $C3$ не пропускає постійну складову колекторної напруги транзистора $VT1$ у базове коло транзистора $VT2$. Ємність $C4$ не пропускає постійну складову колекторної напруги транзистора $VT2$ на навантажувальний пристрій, який підключають до цієї ємності. Ємність $C1$ не пропускає постійну складову на вхід підсилювача.

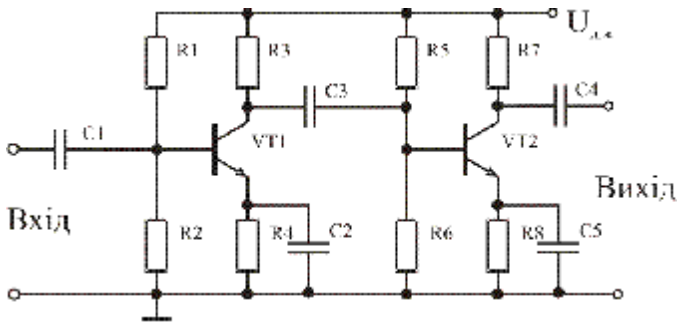


Рисунок 3.1 – Схема двокаскадного підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком

Для зменшення впливу температури на характеристики підсилювальних каскадів зі спільним емітером (СЕ) у коло емітерів $VT1$ та $VT2$ вмикаються резистори, шунтовані ємностями ($C2$ і $R4$, $C5$ і $R8$). Наявність зазначених резисторів приводить до зростання падіння напруги на них при збільшенні емітерного струму I_e внаслідок підвищення температури. Це викликає зниження потенціалу бази по відношенню до потенціалу емітера, а тому і до зменшення струмів I_e та I_k .

Величини ємностей підбираються так, щоб при всіх частотах підсилюваної змінної напруги їх активний опір був меншим опорів у колах емітерів. При цьому падіння напруги на ділянці $C2$, $R4$ (чи $C5$, $R8$) від змінної складової I_e буде незначним. Тому напруга на емітерному переході $VT1$ практично дорівнює вхідній: $U_{\bar{o}e} \approx U_{BX}$. Дільники $R1$, $R2$ і $R5$, $R6$ створюють початкове зміщення на базах транзисторів. Наприклад, напруга $U_{\bar{o}e}$ транзистора $VT1$ залежить від опору резисторів $R1$ і $R2$:

$$U_{\bar{o}e} = \frac{E_K R2}{R1 + R2} - I_e R4,$$

де E_K – напруга, що відповідає напрузі живлення.

Виконання каскаду підсилювача за схемою зі спільним колектором (СК) (рис. 3.2) дозволяє отримати коефіцієнт підсилення за напругою каскаду рівним $0,9 \dots 0,99$.

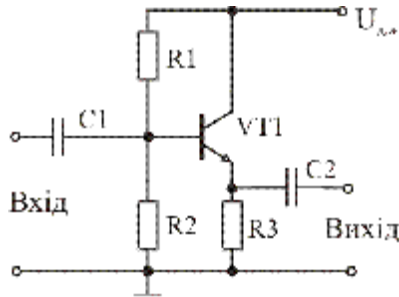


Рисунок 3.2 – Підсилювальний каскад зі спільним колектором

Схему зі СК називають *емітерним повторювачем*, тому що її вихідна напруга майже не відрізняється від вхідної за амплітудою і фазою.

Вхідний опір емітерного повторювача досягає декілька сотень кілоом. Вихідний опір має значення порядку десятків ом. Таким чином, емітерний повторювач має великий вхідний і малий вихідний опори. Тому його коефіцієнт підсилення за струмом може бути високим.

Емітерний повторювач зазвичай пристосовують для узгодження високоопірного джерела підсилювальної напруги з низькоопірним навантажувальним пристроєм. У підсилювальному каскаді зі СК температурна стабілізація забезпечується опором, ввімкненим у емітерне коло.

3.1.2 Параметри і характеристики підсилювача

Основні параметри підсилювача перелічені нижче.

Коефіцієнти підсилення за напругою, струмом, потужністю

$$K_U = U_{ВНХ} / U_{ВХ}; \quad K_I = I_{ВНХ} / I_{ВХ}; \quad K_P = P_{ВНХ} / P_{ВХ},$$

де $U_{ВНХ}$, $U_{ВХ}$, $I_{ВНХ}$, $I_{ВХ}$, $P_{ВНХ}$, $P_{ВХ}$ - вихідні і вхідні напруги, струми, потужності.

Коефіцієнт підсилення за напругою багатокаскадного підсилювача

$$K_U = K_{U1} K_{U2} \dots K_{Un},$$

де n – кількість каскадів; $K_{U1}, K_{U2}, \dots, K_{Un}$ - коефіцієнти підсилення за напругою окремих каскадів.

Вхідний і вихідний опори підсилювача на низьких частотах

$$R_{BX} = U_{BX} / I_{BX} ; \quad R_{BIX} = U_{BIX} / I_{BIX} .$$

Для оцінки діапазону змін вхідних напруг, що підсилюються без спотворень, використовується амплітудна характеристика (рис.3.3). У нижній частині амплітудна характеристика має вигін, тому що рівень шумів підсилювача порівняний з амплітудою вхідних сигналів. На ділянці АВ характеристика майже лінійна. При роботі на цій ділянці спотворення сигналу у підсилювача будуть мінімальними. У верхній частині амплітудна характеристика має вигін внаслідок нелінійності характеристик транзисторів.

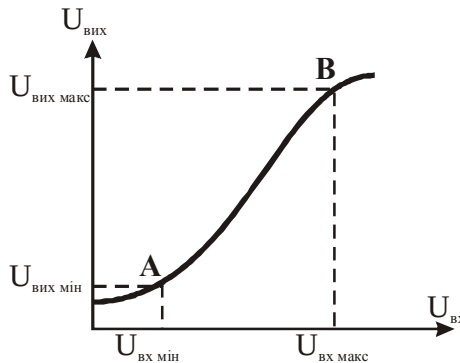
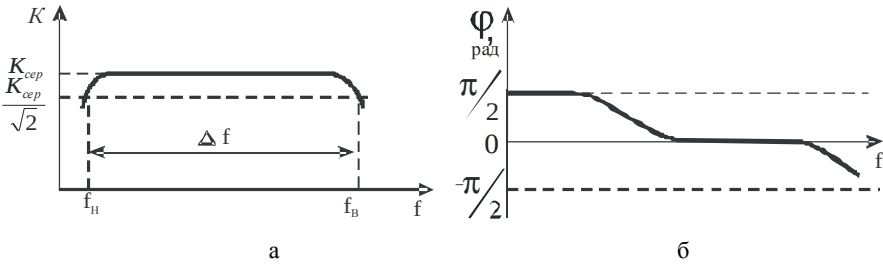


Рисунок 3.3 – Амплітудна характеристика підсилювача

Для оцінки роботи підсилювача на різних частотах використовуються амплітудно-частотна і фазочастотна характеристики (рис. 3.4).



а - амплітудно-частотна характеристика;

б - фазочастотна характеристика

Рисунок 3.4 – Характеристики підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком

При дуже низьких частотах $f_H \rightarrow 0$ коефіцієнт підсилення підсилювача наближається до нуля, тому що опір конденсаторів C_3 і C_4

$$X_{C_{3,4}} = 1/(2p f_H C_{3,4}) \rightarrow \infty.$$

При дуже високих частотах $f_{B \rightarrow \infty}$ коефіцієнт підсилення підсилювача наближається до нуля, тому що опір навантажувальної ємності

$$X_{C_H} = 1/(2p f_B C_H) \rightarrow 0.$$

Навантажувальна ємність C_H складається з вхідної ємності навантажувального каскаду і ємності монтажу

$$C_H = C_{BX2} + C_M.$$

До виходу підсилювача ємність C_H і резистор R_H під'єднуються паралельно.

На рис. 3.4 застосовуються наступні позначення:

$K_{сер}$ - максимальний коефіцієнт підсилення за напругою (на середніх частотах);

f_H, f_B - нижня та верхня граничні частоти;

$\Delta f = f_B - f_H$ - ширина смуги пропускання.

Послідовне з'єднання каскадів підсилювача приводить до зменшення спільної смуги пропускання.

Фазочастотна характеристика підсилювача (рис. 3.4, б) показує, що на ділянці нижніх частот вихідна напруга випереджає за фазою вхідну, а на ділянці верхніх частот відстає від неї. У граничних випадках $f \rightarrow 0$ та $f \rightarrow \infty$ кут зсуву фаз наближається відповідно до $\pi/2$ та мінус $\pi/2$.

3.1.3 Вплив кіл зворотного зв'язку на роботу підсилювача

Дія зворотного зв'язку у електронних схемах заснована на особливому способі збудження, коли вихідний сигнал схеми впливає на її вхідний сигнал.

Позитивний зворотний зв'язок (ПЗЗ) - це зв'язок, при якому фаза напруги, підведеної з виходу на вхід схеми, збігається з фазою вхідної напруги схеми.

Коли фази обох сигналів збігаються, то на вхід підсилювача подається збільшена напруга порівняно з напругою на вході схеми.

ПЗЗ є основою роботи генераторів.

Негативний зворотний зв'язок (НЗЗ) - це зв'язок, при якому фаза напруги, підведеної з виходу на вхід схеми, є протилежною фазі вхідної напруги схеми.

НЗЗ викликає зменшення коефіцієнта підсилення підсилювача, охопленого НЗЗ, тому що із напруги, поданої на вхід схеми, віднімається напруга, що надходить з кола НЗЗ. Внаслідок цього на вході схеми діє більша напруга, ніж на вході підсилювача. При цьому вихідна напруга має менше значення.

Уведення НЗЗ спричиняє розширення смуги пропускання підсилювача, при цьому нижня гранична частота зменшується, а верхня гранична частота збільшується, але добуток коефіцієнта підсилення на ширину смуги пропускання є постійною величиною.

Властивості схеми з НЗЗ, до яких належать і значення вхідного і вихідного опорів, залежать від способу зняття сигналу з виходу схеми і його передачі на вхід.

3.2 Дослідження двокаскадного підсилювача

3.2.1 Ознайомлення з лабораторною установкою ЛУ-4

Уважно розгляньте верхню панель лабораторної установки і за своїте правила використання контрольно-вимірювальних приладів, які використовуються при проведенні даної роботи (додаток А).

3.2.2 Дослідження параметрів, характеристик двокаскадного підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком на каскадах СЕ-СЕ

3.2.2.1 Зберіть схему підсилювача (рис.3.5).

3.2.2.2 Ввімкніть установку тумблером „МЕРЕЖА”.

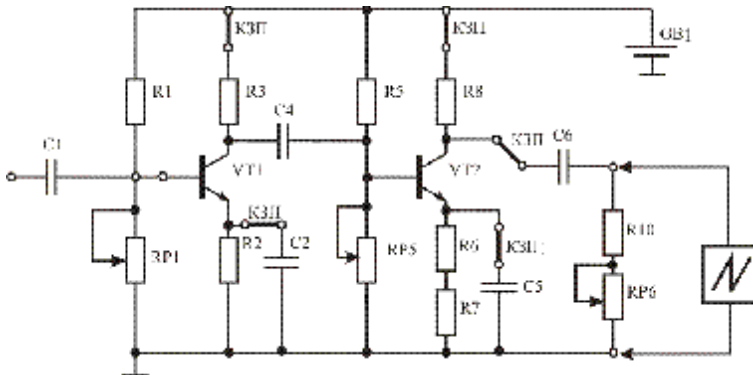


Рисунок 3.5 - Схема підсилювача на каскадах СЕ-СЕ

3.2.2.3 Виміряйте величину напруги джерела $GB1$.

3.2.2.4 Задайте положення робочих точок спочатку транзистора $VT1$, а потім транзистора $VT2$. Для цього підключіть вольтметр між колектором транзистора і корпусом. Установіть потенціали колекторів рівними половині напруги джерела $GB1$ за допомогою потенціометрів $RP1$ і $RP5$.

3.2.2.5 Виміряйте напруги $U_{гео}^1$, $U_{гео}^2$, $U_{кео}^1$, $U_{кео}^2$ і струми $I_{кео}^1$, $I_{кео}^2$ (верхній індекс відповідає номеру каскаду; індекс "0" відповідає режиму спокою). Результати занесіть у табл. 3.1, форма якої наводиться нижче.

3.2.2.6 Підключіть осцилограф з метою спостереження форми вихідного сигналу.

3.2.2.7 На вхід підсилювача подайте безперервний сигнал синусоїдальної форми. Для чого з'єднайте вихід генератора $G1$ за допомогою короткозамкнутої перемички (КЗП) зі входом підсилювача і установіть тумблер $SA1$ у положення „~”.

3.2.2.8 Змінюючи амплітуду вхідного сигналу рукою потенціометра " $U_{мвх}$ " і використовуючи органи керування осцилографа, добийтеся стійкого зображення на екрані осцилографа одного періоду вихідного сигналу. При цьому максимально використовуйте площину екрана осцилографа.

3.2.2.9 Виміряйте амплітуди напруги на вході та виході кожного каскаду: $U_{мвх}^1$, $U_{мвих}^1$, $U_{мвх}^2$, $U_{мвих}^2$. Результати вимірювань занесіть у табл. 4.1. Слід пам'ятати, що вольтметр вимірює діюче значення, а осци-

логарф - амплітудне.

3.2.2.10 Розрахуйте коефіцієнти підсилення за напругою першого і другого каскадів K^1_U , K^2_U , а також коефіцієнт підсилення двокаскадного підсилювача K_U .

3.2.2.11 Виміряйте амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача за допомогою вимірювання амплітуди вхідного сигналу синусоїдальної форми, який формується генератором $G1$, і реєструючи амплітуди вихідного сигналу за допомогою осцилографа. За результатами вимірювань побудуйте амплітудну характеристику підсилювача і знайдіть її робочу ділянку.

3.2.2.12 По черзі замініть резистори у ланцюгах колектора $R3$ на $R4$, $R8$ на $R9$. Змініть величину опору навантаження ($RP6$). Зробіть висновки щодо впливу їх номіналів на параметри підсилювача.

3.2.2.13 Оцініть частотні властивості підсилювача за допомогою імпульсів прямокутної форми. Для чого подайте прямокутні імпульси невеликої амплітуди на вхід схеми за допомогою генератора $G1$. Переконайтеся, що зміна амплітуди вхідного сигналу не призводить до зміщення робочої точки у ділянку насичення, у противному випадку необхідно зменшити амплітуду вхідних імпульсів.

Таблиця 3.1- Результати вимірювань

Показники підсилювача	Схема СЕ-СЕ		Схема СЕ-СК		Схема СЕ-СЕ			
	1 каскад	2 каскад	1 каскад	2 каскад	ПЗЗ+НЗЗ		НЗЗ	
					1 каскад	2 каскад	1 каскад	2 каскад
$U_{\text{бео}}, \text{В}$								
$U_{\text{кео}}, \text{В}$								
$I_{\text{ко}}, \text{мА}$								
$U_{\text{м вх}}, \text{В}$								
$U_{\text{м вих}}, \text{В}$								
K_U^1, K_U^2								
K_U								
$R_{\text{вих}}, \text{кОм}$								
$f_{\text{в}}, \text{кГц}$								

За допомогою осцилограми вихідного імпульсу з максимально "розтягнутим" фронтом, виміряйте його час наростання t_H і розрахуйте верхню граничну частоту f_B :

$$f_B = (0,35 \dots 0,5) / t_H.$$

Прогляньте осцилографом осцилограми прямокутних імпульсів на вході і виході першого каскаду, на вході і виході другого каскаду. Зверніть увагу на полярність сигналів у цих точках, результати занесіть у таблицю.

3.2.3 Дослідження параметрів і характеристик двокаскадного підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком на каскадах СЕ-СК

Зберіть схему підсилювача (рис.3.6).

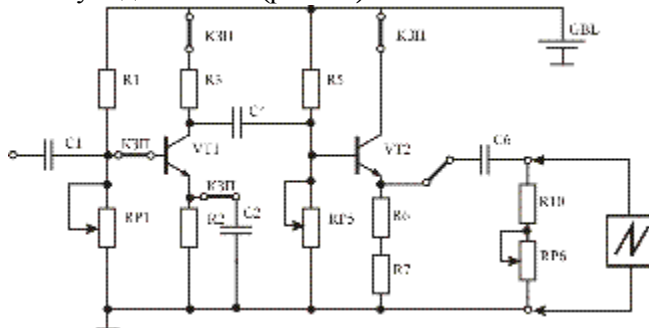


Рисунок 3.6 - Схема підсилювача на каскадах СЕ-СК

Ручкою потенціометра $RP1$ задайте положення робочої точки для $VT1$. Користуючись методикою пункту 3.2.1, проведіть дослідження амплітудної і частотної характеристик даного підсилювача. Результати вимірів і розрахунків занесіть у табл. 3.1, а характеристики побудуйте у тих же площинах. Порівняйте їх з даними попереднього підсилювача. Зробіть висновок.

3.3 Дослідження впливу кіл зворотних зв'язків на параметри двокаскадного підсилювача

3.3.1 Встановлення робочих точок транзисторів

Зберіть схему підсилювача без підключення кіл ЗЗ (рис. 3.7). Ручками потенціометрів $RP1$, $RP5$ задайте положення робочих точок для $VT1$ і $VT2$ ($U_{кe0}^1 = U_{кe0}^2 = 0,5U_{ж}$). Подайте на вхід підсилювача з генера-

тора G1 неперервний сигнал синусоїдальної форми і добийтеся сталого зображення одного періоду вихідного сигналу підсилювача з максимальною амплітудою і мінімальними спотвореннями. Результати досліджень занесіть у табл. 3.1.

Для дослідження впливу кіл 33 зробіть дії у нижченаведеній послідовності.

3.3.2 Дослідження впливу ПЗЗ

Замкніть коло ПЗЗ за напругою за допомогою КЗП, з'єднавши *RP3* з базою *VT1*. Змінюючи опір *RP3*, добийтеся збудження підсилювача. Повторіть декілька разів цю операцію і зробіть висновок щодо впливу ПЗЗ на роботу підсилювача. Виміряйте величини струму і напруги в колі ПЗЗ.

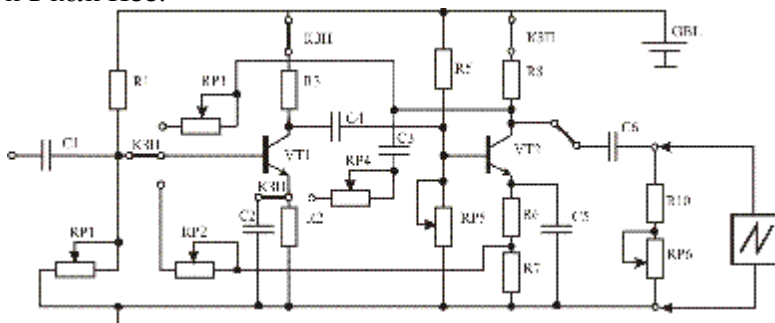


Рисунок 3.7 - Схема підсилювача для дослідження впливу кіл 33

3.3.3 Дослідження впливу ПЗЗ+НЗЗ

Замкніть коло НЗЗ за постійним струмом за допомогою з'єднання *RP2* з базою *VT1*. Змінюючи опір *RP2* і спостерігаючи за зміною форми вихідного сигналу, добийтеся сталої роботи підсилювача. Виміряйте величину струму і напруги у колі НЗЗ. Зробіть висновок щодо додаткового впливу на роботу схеми НЗЗ.

Як змінився вихідний опір підсилювача при введенні НЗЗ за струмом?

3.3.4 Дослідження впливу НЗЗ

Зніміть КЗП, що з'єднують *RP2* з базою *VT1* і *RP3* з базою *VT1*. Введіть послідовний частотно-залежний НЗЗ за напругою за допомогою підключення *RP4* до емітера *VT1*. При цьому *C2* відімкніть. Змінюючи глибину НЗЗ ручкою потенціометра *RP4*, добийтеся сталої роботи

підсилювача. За допомогою НЗЗ з виходу другого каскаду через $C3$ і $RP4$ подається частина енергії вихідного сигналу на вхід підсилювача. Ємність $C3$ вибирається такою, щоб її опір на середніх і високих частотах був достатньо малим. У цьому разі глибина зворотного зв'язку буде визначатися тільки опором $RP4$. Виміряйте вихідний струм і вихідну напругу підсилювача. Розрахуйте $R_{\text{вих}}$ підсилювача з колом НЗЗ. Порівняйте отримані результати і зробіть висновки.

3.4 Порядок оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- мету роботи;
- схеми підсилювачів (рис. 3.5, 3.6);
- амплітудні характеристики підсилювачів на каскадах СЕ-СЕ та СЕ-СК;
- результати вимірювань і параметри підсилювачів у табл. 3.1;
- висновки по кожному пункту завдання з аналізом результатів досліджень.

3.5 Контрольні запитання

- 1 Який принцип роботи має двокаскадний підсилювач з резистивно-ємнісним зв'язком?
- 2 Які типи міжкаскадних зв'язків використовують?
- 3 Яке призначення ємностей у двокаскадному підсилювачі з резистивно-ємнісним зв'язком?
- 4 Для чого виконують каскадування?
- 5 Яке призначення підсилювального каскаду зі СК?
- 6 Які характерні ділянки має амплітудна характеристика підсилювача?
- 7 Які основні параметри підсилювача?
- 8 Як визначається ширина смуги пропускання підсилювача?
- 9 Яку форму має фазочастотна характеристика підсилювача з резистивно-ємнісним зв'язком?
- 10 Яка різниця між ПЗЗ і НЗЗ?
- 11 Як діє термостабілізація у каскадах?
- 12 Як зміниться смуга пропускання підсилювача, якщо додати у його схему ще один каскад, що підсилює напругу?

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 "ОПЕРАЦІЙНИЙ ПІДСИЛЮВАЧ"

Метою роботи є:

- вивчення принципу дії, основних параметрів і характеристик операційного підсилювача;
- експериментальне дослідження та аналіз інвертувального і неінвертувального підсилювача;
- дослідження операційного підсилювача як повторювача, інтегратора, диференціатора.

4.1 Теоретичні відомості

Операційним підсилювачем (ОП) називається підсилювач постійного струму, який має коефіцієнт підсилення вище тисячі, великий вхідний та малий вихідний опори, забезпечує підсилення сигналів у смузі частот до десятків мегагерц з низьким рівнем шумів при добрій температурній стабільності. Підсилювачі постійного струму відрізняються від підсилювачів змінного струму тим, що дозволяють підсилювати сигнали, які повільно змінюються у часі. На вході, виході і поміж каскадами у них відсутні реактивні компоненти (конденсатори, трансформатори), які не пропускають постійну складову сигналу.

Спочатку ОП призначався для виконання різних математичних операцій в аналоговій обчислювальній техніці, та надалі став найбільш широко використовуваною універсальною аналоговою ІС. Зараз на основі ОП розробляються схеми виборчих підсилювачів, генераторів, перетворювачів, активних фільтрів, електронних стабілізаторів, а також інші функціональні вузли. Умовне позначення ОП приведене на рис. 4.1.

Підсилювач (рис 4.1,а) має основні і допоміжні виводи. До основних виводів відносяться вихідний вивід і два вхідних. Вхід, напруга на якому зсунута за фазою на 180° відносно вихідної напруги, називається *інвертувальним* і позначається знаком інверсії. Вхід, напруга на якому збігається за фазою з вихідною напругою, називають *неінвертувальним*.

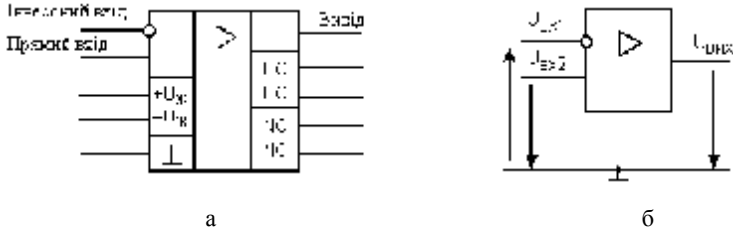


Рисунок 4.1 - Умовне (а) та спрощене умовне (б) позначення ОП

До допоміжних виводів відносяться виводи для підключення електричного кола, коректуючого амплітудно-частотну характеристику ОП, які мають мітки FC на допоміжному полі, а також виводи з мітками NC - для підключення елементів балансування за постійним струмом (з метою установки нуля на виході при $U_{п\text{ вх}1} = U_{п\text{ вх}2} = 0$).

Допоміжні виводи з мітками $+U_{ж}$, $-U_{ж}$ призначені для організації двополярного живлення схеми, щоб забезпечити можливість роботи як з позитивними, так і з негативними входними сигналами. При двополярному живленні постійна напруга на виході відсутня за умови, що постійних напруг на входах немає. Завдяки вказаній якості джерела входних сигналів і навантаження можливо безпосередньо підключати до виводів ОП, не турбуючись про розподіл змінної та постійної складових і не ризикуючи змінити статичні режими роботи підсилювальних каскадів. Вивід з міткою $\perp$ з'єднується зі спільним виводом пристрою, до якого входить ОП.

Для більшої наочності принципових схем допускається спрощене позначення ОП (рис. 4.1, б), яке має тільки основне поле і сигнальні виводи.

Якщо до входів прикласти синфазні, діючі одночасно, однакові за величиною і фазою відносно спільного дроту сигнали, то їх вплив буде взаємно збалансованим, і вихід буде мати нульовий потенціал. Завдяки цьому параметри ОП мало чутливі до зміни напруги живлення, температури та інших зовнішніх факторів.

Якщо на входи ОП подані різні за фазою і амплітудою сигнали, то ОП підсилює їх різницю: $U_{\text{диф}} = U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}$. Такі сигнали називаються диференціальними. Вихідна напруга ОП вимірюється відносно спільного дроту.

При використуванні ОП в схемах з глибоким зворотним зв'язком параметри схем визначаються переважно параметрами кола нега-

тивного зворотного зв'язку (НЗЗ), а сам ОП стає функціонально непомітним. Такий ОП за своїми характеристиками повинен наближатися до ідеального, тобто мати нескінченно великий коефіцієнт підсилення у нескінченно великій смузі пропускання, нескінченний вхідний і нульовий вихідний опори.

Реальні параметри ОП можуть тільки наближатися до ідеальних властивостей. Наприклад, якщо коефіцієнт підсилення схеми, що визначається колом НЗЗ, дорівнює 10, а коефіцієнт підсилення підсилювача дорівнює 10^6 , то з практичної точки зору останній коефіцієнт близький до нескінченності.

На рис. 4.2 приведені амплітудні (передавальні) характеристики ОП для випадків: а - вхідний сигнал подається на інвертувальний вхід 1, а неінвертувальний вхід 2 заземлений ($U_{\text{ВІХ}}$ протифазно $U_{\text{ВХ1}}$); б - вхідний сигнал подається на неінвертувальний вхід 2, а інвертувальний вхід 1 заземлений ($U_{\text{ВІХ}}$ синфазно $U_{\text{ВХ2}}$).

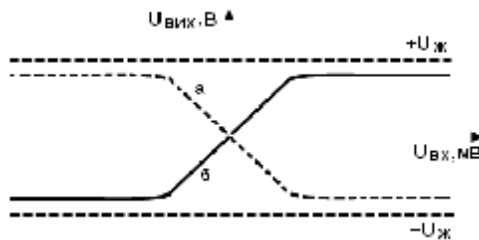


Рисунок 4.2 - Амплітудні характеристики ОП

ОП характеризуються параметрами, за якими вибирають той чи інший прилад для використання у реальній схемі.

До основних параметрів ОП відносяться наступні параметри.

Вхідні опори в залежності від характеру сигналу, що подається на входи, поділяють на диференціальний і синфазний.

Вхідний опір для диференціального сигналу - це повний вхідний опір, що визначається за формулою:

$$R_{\text{ВХ диф}} = \Delta U_{\text{ВХ диф}} / \Delta I_{\text{ВХ}},$$

де $\Delta U_{\text{ВХ диф}}$ - прирощення напруги між входами ОП;

$\Delta I_{\text{ВХ}}$ - прирощення вхідного струму неінвертувального входу у режимі короткого замикання.

Значення $R_{\text{ВХ диф}}$ знаходиться в інтервалі декількох десятків кілоом - сотень мегаом. Велике $R_{\text{ВХ диф}}$ дозволяє забезпечити керування пі-

дсилювачем при найменших витратах потужності джерела сигналу та передати на вхід ОП без втрат напругу джерела сигналу.

Вхідний опір для синфазного сигналу визначається як зміна вхідного струму під дією вхідної синфазної напруги:

$$R_{\text{вх сф}} = \Delta U_{\text{вх сф}} / \Delta I_{\text{вх}} ,$$

де $\Delta U_{\text{вх сф}}$ - прирощення вхідної синфазної напруги вхід - "земля".

Вхідний синфазний опір $R_{\text{вх сф}}$ на декілька порядків більше $R_{\text{вх диф}}$, тому що синфазна складова подавляється ОП.

Вхідні струми обумовлені необхідністю забезпечити нормальний режим роботи вхідного диференційного каскаду ОП на біполярних транзисторах. При використанні у схемі польових транзисторів – це струми можливих витоків. Коли до обох входів підключені джерела сигналів з різними внутрішніми опорами, то струми зміщення створюють різні падіння напруги на цих внутрішніх опорах. Між входами ОП з'являється диференціальний сигнал, що змінює вихідну напругу. З метою його зменшення опори, що підключаються до обох входів, треба мати по-можливості однаковими. Реально струми входів ОП відрізняються один від одного на 10 ... 20%.

Середній вхідний струм $I_{\text{вх}}$ - середнє арифметичне значення постійних струмів інвертувального і неінвертувального входів у відсутності сигналу.

Зазвичай $I_{\text{вх}}$ не перевищує сотень наноампер.

Вхідний струм зсуву $I_{\text{вх}} = I_{\text{вх2}} - I_{\text{вх1}}$ - різниця вхідних струмів, він у декілька разів менше середнього вхідного струму. Знаючи струм зсуву, можна підібрати номінал балансувального резистора.

Напруга зміщення нуля $U_{\text{зм}}$ – це потенціал на виході підсилювача при нульовому вхідному сигналі, розділеному на коефіцієнт підсилення. Цей параметр показує яке джерело напруги треба підключити до входу ОП для отримання на виході $U_{\text{вих}} = 0$. Потенціал на виході при відсутності сигналу на вході з'являється внаслідок різниці падіння напруги база – емітер вхідних інтегральних транзисторів, розкиду номіналів їх навантажень і наявності вхідних струмів.

Дрейф вихідної напруги зміщення - $\varepsilon_{\text{зм}} = \Delta U_{\text{зм}} / \Delta T^{\circ}\text{C}$ – відношення прирощення вхідної напруги зміщення до прирощення температури навколишнього середовища. Зазвичай він складає 1...5 мкВ/°C.

Вихідний опір $R_{\text{вих}}$ - внутрішній опір виходу ОП. Зазвичай складає 20...2000 Ом (у залежності від схемотехнічного рішення і призначення ОП). Він зменшує амплітуду вихідного сигналу, особливо при роботі підсилювача на малий опір навантаження при слабкому НЗЗ. Коли у ОП присутня схема захисту від коротких замикань, вихідний опір не обмовляється.

Коефіцієнт підсилення $K = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta U_{\text{диф}} = \Delta U_{\text{вих}} / (\Delta U_{\text{вх2}} - \Delta U_{\text{вх1}})$ - відношення прирощення $U_{\text{вих}}$ до відповідного прирощення різниці вхідних напруг при замкненому колі зворотного зв'язку. У ідеальних ОП $K \rightarrow \infty$. У реальних ОП коефіцієнт підсилення складає від сотні до сотень тисяч.

Напруга на виході підсилювача обмежена напругою джерела живлення, яка зазвичай не перевищує 10...15 В, тому при великих коефіцієнтах підсилення напруга $U_{\text{вх}}$ є дуже малою. При більших $U_{\text{вх}}$ транзистори переходять у режим насичення.

Смуга пропускання - смуга частот, у котрій $U_{\text{вих}}$ зменшується не більш, ніж на 0,707 свого максимального значення при незмінній амплітуді на вході. Іноді вказується частота одиничного підсилення f_t , при якій коефіцієнт підсилення зменшується до одиниці.

Частота зрізу $f_{\text{зр}}$ - частота, до якої лінеаризована амплітудно-частотна характеристика підсилювача, охопленого негативним зворотним зв'язком, залишається плоскою.

Швидкість наростання вихідної напруги $V_{U_{\text{вих}}} = \Delta U_{\text{вих}} / \Delta t$ - відношення прирощення $\Delta U_{\text{вих}}$ до інтервалу часу, за який відбувається це прирощення при подачі на вхід прямокутного імпульсу. Чим вище частота зрізу, тим більше швидкість наростання вихідної напруги.

Час установлення вихідної напруги $t_{\text{уст}}$ - час, протягом якого $U_{\text{вих}}$ ОП змінюється від рівня 0,1 до рівня 0,9 сталого значення $U_{\text{вих}}$ при дії на вхід ОП прямокутних імпульсів. Час установлення також є пропорційним частоті зрізу.

Максимальний вихідний струм $I_{\text{вих max}}$ - гранична амплітуда вихідного струму, який може бути поданим на навантаження.

Максимальна потужність розсіювання P_{max} - максимально допустима потужність, котра може бути розсіяна ОП при наявності вхідної напруги і приєднаного навантаження.

У роботі досліджується ОП 140УД7, цоколювка його показана на рис. 4.3.



Рисунок 4.3 - Цоколювка ОП 140УД7

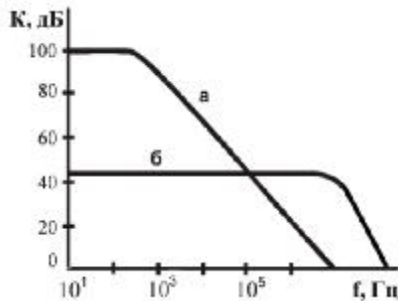
Основні параметри ОП 140УД7 приведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Основні параметри ОП 140УД7

Параметр	Значення параметра
Коефіцієнт підсилення за напругою, в.о.	50000
Напруга джерела живлення $U_{дж}$, В	± 15
Опір вхідний $R_{вх}$, МОм	$\geq 0,4$
Опір вихідний $R_{вих}$, Ом	150
Опір навантаження (максимально допустимий), кОм	2
Струм вхідний $I_{вх}$ при $U_{дж} = \pm 15В$, $R_{н} = 2кОм$, нА	200
Різниця вхідних струмів $\Delta I_{вх}$ при $U_{дж} = \pm 15В$, $R_{н} = 2кОм$, нА	50
Струм споживання $I_{спож}$ при $U_{дж} = \pm 15В$, $R_{н} = 2кОм$, мА	2,8
Максимальний вихідний струм $I_{вих\ max}$, мА	20
Максимальна вихідна напруга $U_{вих\ max}$ при $U_{дж} = \pm 15В$, В	10,5
Максимальна вхідна напруга $U_{вх\ max}$, В	12
Напруга зміщення $U_{зм}$, мВ	4
Напруга синфазного сигналу (максимально допустима) при $U_{дж} = \pm 15В$, В	12
Частота одиночного підсилення f_T , МГц	0,8
Швидкість наростання вихідної напруги $V_{U_{вих}}$, В/мкс	0,7
Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу $K_{ос\ сф}$, дБ	70
Температурний дрейф напруги зміщення $\Delta U_{зм}/\Delta T$, мкВ/°С	6

ОП 140УД7 має внутрішню частотну корекцію на конденсаторі C_K , котрий створює НЗЗ у проміжному підсилювальному каскаді ОП. При збільшенні частоти опір C_K зменшується, тому глибина ЗЗ збільшується, а коефіцієнт підсилення зменшується.

Частотна корекція необхідна для усунення автоколиваний, які можуть виникнути при введенні ЗЗ. Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика ОП 140УД7 з внутрішньою частотною корекцією приведена на рис. 4.4 (крива а).



- а - ОП з внутрішньою частотною корекцією;
б - ОП з випереджаючою частотною корекцією

Рисунок 4.4 - Амплітудно-частотна характеристика ОП 140УД7

Внутрішньої корекції іноді недостатньо для забезпечення стійкої роботи підсилювача. Тому її доповнюють зовнішніми ланцюгами корекції. Якщо підключити до виводу 8 додатковий навісний конденсатор, то можна змінити частотну корекцію і ліквідувати автоколивання. При підключенні конденсатора між виводами 2 і 8 з'являється позитивний зворотний зв'язок, який зменшує глибину негативного ЗЗ, здійсненого через внутрішній коректуючий конденсатор. Така частотна корекція називається випереджаючою. При цьому збільшується швидкість наростання $U_{\text{вих}}$ і підвищується частота, при якій починається зменшення коефіцієнта підсилення підсилювача. Логарифмічна АЧХ підсилювача з випереджаючою частотною корекцією приведена на рис. 4.4 (крива б).

4.2 Завдання

В роботі необхідно виконати дії у такій послідовності:

- вивчіть принцип дії ОП, ознайомтеся з параметрами, характеристиками, схемами вмикання і можливостями застосування ІМС ОП;
- розгляньте передню панель установки ЛУ-5 і вивчіть правила роботи з приладами, які використовуються при виконанні роботи (правила роботи з осцилографом С1-73 приведені у додатку А);
- проведіть дослідження роботи інвертувального підсилювача, неінвертувального підсилювача, повторювача напруги, інтегратора, диференціатора.

4.3 Порядок виконання завдання

4.3.1 Дослідження інвертувального підсилювача

Використовуючи короткозамкнені перемички (КЗП), складіть схему підсилювача з паралельним ЗЗ (рис.4.5).

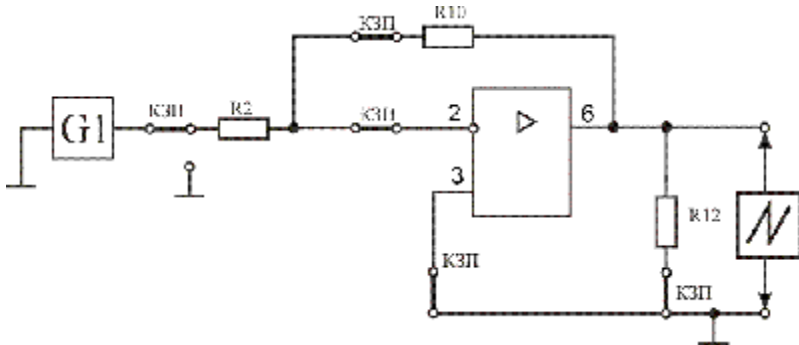


Рисунок 4.5 - Схема інвертувального підсилювача

З дозволу викладача ввімкніть лабораторну установку тумблером "МЕРЕЖА". Виміряйте напругу живлення ОП (виводи 4 і 7).

Зробіть висновок щодо величини і полярності напруги живлення.

Вимкніть КЗП, яка з'єднує джерело напруги $G1$ і резистор $R2$. За допомогою КЗП приєднайте резистор $R2$ до гнізда "⊥". При цьому $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$.

Виміряйте величину вихідної напруги $U_{вих}$. Якщо $U_{вих} \neq 0$, то рукою потенціометра $PR1$ "БАЛАНС" добийтеся, щоб напруга $U_{вих}$ була нульовою на самій малій межі вимірювання приладу. Після вико-

нання балансування ОП положення ручки "БАЛАНС" змінювати не можна.

Установіть тумблер SA1 у положення „~”. Підключіть до виходу генератора G1 осцилограф і за допомогою ручки потенціометра " $U_{\text{м вх}}$ " задайте амплітуду синусоїдального сигналу порядку 0,1...0,2 В.

Отримайте на екрані осцилографа стійке зображення одного періоду гармонічного сигналу. Виміряйте його амплітуду і період. Подайте цей сигнал на вхід підсилювача (з'єднайте вихід генератора G1 з опором R2). Осцилографом виміряйте амплітуду вихідного сигналу.

Розрахуйте коефіцієнт підсилення двома способами: використовуючи амплітудні значення вхідної і вихідної напруги, а також використовуючи значення номіналів резисторів, які установлені у колі НЗЗ (R_0) і на інвертувальному вході (R_B):

$$K = - U_{\text{м вих}} / U_{\text{м вх}} = -R_0/R_B = - R10/R2.$$

Замість КЗП підключіть міліамперметр і виміряйте вхідний і вихідний струми. Порівняйте їх з відповідними паспортними параметрами ОП.

Не змінюючи амплітуду вхідного сигналу, замініть опір R10 у колі НЗЗ на R11. Виміряйте амплітуду вихідного сигналу. Розрахуйте коефіцієнт підсилення підсилювача.

Замініть опір R2 у вхідному колі на R3. Роздивитесь осцилограму вихідного сигналу. Розрахуйте коефіцієнт підсилення підсилювача.

Зробіть висновки про те, як залежить коефіцієнт підсилення підсилювача від величини резисторів R_0 , R_B і коефіцієнта підсилення самого ОП.

4.3.2 Зняття передавальної характеристики інвертувального підсилювача

Відновіть у вхідному колі опір R2, а у колі НЗЗ - R10. Зніміть передавальну характеристику підсилювача, тобто залежність $U_{\text{м вих}} = f(U_{\text{м вх}})$. Амплітуду вхідного сигналу змінюйте у діапазоні 0,1; 0,2...1,2В. Під час роботи не допускайте спотворення форми вихідного синусоїдального сигналу. Результати вимірів занесіть у таблицю.

Передавальна характеристика при побудові повинна знаходитись у II і IV квадрантах координатної площини.

4.3.3 Визначення швидкості наростання вихідної напруги інвертувального підсилювача

Подайте на інвертувальний вхід підсилювача імпульси прямокутної форми амплітудою 0,4...0,5 В. Для цього вимикач SA1 переведіть у положення „┐┘”. Подивитесь на осцилограму вихідного сигналу. Виміряйте амплітуду і зверніть увагу на полярність виводів. Зробіть висновок.

Одержіть на екрані осцилографу один вихідний імпульс і, розтягнувши його передній фронт, виміряйте час установлення. Розрахуйте швидкість наростання вихідної напруги за формулою

$$V = U_{\text{м вих}} / t_{\text{уст}}$$

Порівняйте значення швидкості наростання з паспортним параметром.

За допомогою КЗП з'єднайте інвертувальний вхід 2 через конденсатор C2 з виводом 8 ОП. Як зміниться при цьому швидкість наростання вихідної напруги?

Зробіть висновок щодо призначення конденсатора C2. Установіть ручку потенціометра " $U_{\text{м вх}}$ " у крайнє ліве положення і відімкніть установку.

4.3.4 Дослідження неінвертувального підсилювача

Складіть схему неінвертувального підсилювача (рис. 4.6).

Увімкніть установку і зробіть балансування ОП. Для цього неінвертувальний вхід ОП за допомогою КЗП з'єднайте з корпусом, тимчасово відімкніть джерело G1. Після балансування ОП до ручки "БАЛАНС" не доторкайтесь!

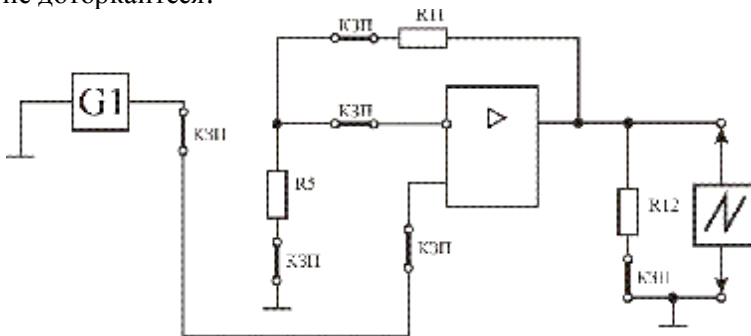


Рисунок 4.6 - Схема неінвертувального підсилювача

З'єднайте джерело $G1$ з неінвертувальним входом ОП і подайте на нього прямокутні імпульси амплітудою 0,2 - 0,3 В. Зверніть увагу на їх полярність. Підключіть осцилограф до виходу підсилювача і виміряйте амплітуду вихідних сигналів. Чи змінилася полярність імпульсів?

Розрахуйте коефіцієнт підсилення неінвертувального підсилювача:

$$K = U_{\text{м вих}} / U_{\text{м вх}} = 1 + R_O / R_B = 1 + R_{11} / R_5.$$

Замініть резистор R_{11} на R_{10} . Як змінилася амплітуда вихідних імпульсів?

Відновіть у колі НЗЗ R_{11} і подайте на вхід підсилювача сигнал синусоїдальної форми.

Зніміть і побудуйте передавальну характеристику неінвертувального підсилювача.

Відімкніть установку і зробіть висновки щодо роботи підсилювача.

4.3.5 Дослідження повторювача напруги

Використовуючи КЗП, зберіть схему повторювача напруги (рис. 4.7).

Увімкніть установку і зробіть балансування ОП. Подайте на неінвертувальний вхід ОП прямокутні імпульси амплітудою 0,6 - 0,7 В. Запам'ятайте їх полярність. Підключіть осцилограф до виходу підсилювача, виміряйте амплітуду вихідних імпульсів і зверніть увагу на їх полярність. Змінилася вона чи ні порівняно з полярністю вхідних імпульсів?

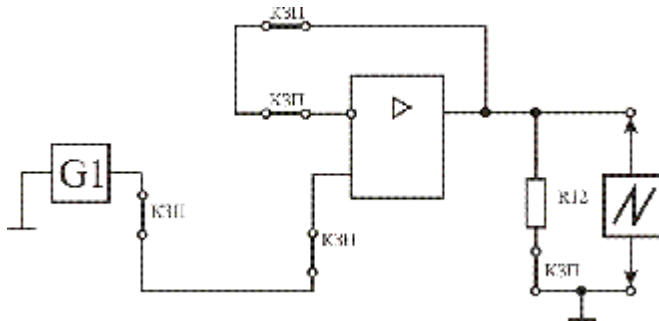


Рисунок 4.7 - Схема повторювача напруги

Змініть амплітуду входних імпульсів. Як змінилася амплітуда вихідних імпульсів? Розрахуйте коефіцієнт підсилення для даної схеми:

$$K = U_{\text{м вих}} / U_{\text{м вх}} .$$

Де може бути пристосований даний підсилювач?

Установіть амплітуду входних сигналів на неінвертувальному вході 0,3 - 0,4 В. Максимально використовуючи робочу площину екрана осцилографа, оцініть крутість входних і вихідних імпульсів і визначте швидкість наростання вихідної напруги. Подивитесь, як зміняться осцилограми вихідних імпульсів при зміні амплітуди входних.

Відімкніть установку і зробіть висновки щодо роботи підсилювача.

4.3.6 Дослідження інтегратора

Складіть схему активного інтегратора (рис.4.8).

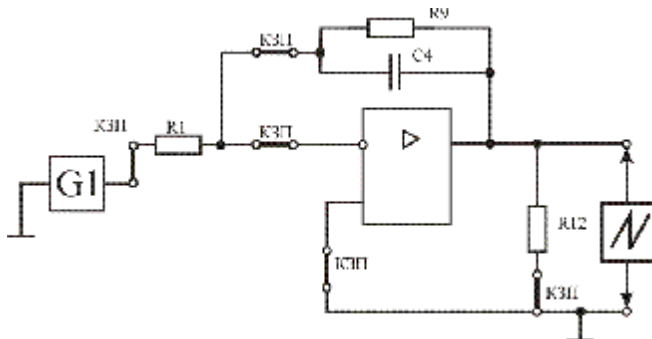


Рисунок 4.8 - Схема інтегратора

Ввімкніть установку і зробіть балансування ОП. Подайте на його вхід прямокутні імпульси з джерела G1. Ця схема чутлива до малих змін постійної складової входного сигналу (коефіцієнт підсилення при постійному струмі у цієї схеми дорівнює 100). Яка роль опору R9? Що відбудеться, якщо його прибрати? Подивитесь при цьому на осцилограми входних і вихідних сигналів. Зміряйте амплітуди входних і вихідних імпульсів. Вихідна напруга для даної схеми розраховується за формулою

$$U_{\text{вих}} = (1/(R1C4)) \int U_{\text{вх}} dt + const .$$

Порівняйте її з вимірним значенням.

Змініть $R1$ на $R2$. Як зміниться форма вихідних імпульсів? До чого приведе зміна амплітуди вхідних імпульсів? Проведіть експерименти і зробіть висновок.

Відімкніть установку.

4.3.7 Дослідження диференціатора

Складіть схему активного диференціатора (рис.4.9).

Подайте на вхід диференціатора прямокутні імпульси. Роздивитесь осцилограми вхідних і вихідних імпульсів, виміряйте їх амплітуди.

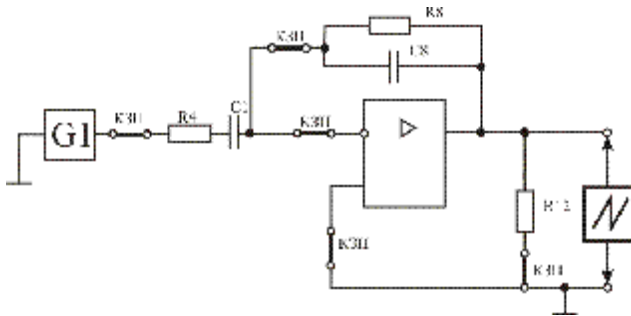


Рисунок 4.9 - Схема диференціатора

Вихідна напруга диференціатора визначається за формулою

$$U_{\text{вих}} = -R8 \cdot C1 \left(\frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \right).$$

Порівняйте її з вимірним значенням.

Змініть амплітуду вхідних імпульсів. Як зміниться форма вихідних імпульсів? Відімкніть установку. Зробіть висновок.

4.4 Порядок оформлення звіту

Звіт повинен містити:

- схеми досліджень (рис. 4.5 - 4.9);
- передавальні характеристики інвертувального і неінвертувального підсилювачів;

- формули і результати розрахунків коефіцієнтів підсилення інвертувального, неінвертувального підсилювачів і повторювача напруги;
- значень швидкості наростання вихідної напруги інвертувального підсилювача та повторювача напруги;
- значень вихідної напруги інтегратора і диференціатора;
- висновки за результатами виконання кожного пункту завдання.

4.5 Контрольні запитання

- 1 Охарактеризуйте призначення ОП.
- 2 Які параметри ОП є найбільш важливими?
- 3 Дайте порівняльну характеристику відносно коефіцієнта підсилення інвертувальної і неінвертувальної схеми ввімкнення ОП.
- 4 Як здійснюється і для чого призначена корекція частотних характеристик ОП?
- 5 Яке призначення повторювача напруги?
- 6 Чому ОП має двополярне живлення?
- 7 Чому при проектуванні ОП прагнуть збільшити коефіцієнт підсилення за напругою і вхідний опір?
- 8 Яке призначення опору R_9 у схемі інтегратора (рис. 4.8)?
- 9 Може інтегратор служити для перетворення вхідних сигналів з великим рівнем постійної складової?
- 10 Для чого використовуються виводи з мітками FC на допоміжному полі умовного графічного позначення ОП?
- 11 Чому ОП називають підсилювачем постійного струму?
- 12 Може чи ні коефіцієнт підсилення за напругою повторювача напруги дорівнювати 10?
- 13 З якою метою використовуються виводи з мітками $+U_{ж}$, $-U_{ж}$ на допоміжному полі графічного позначення ОП?
- 14 З якою метою використовуються виводи з мітками NC на допоміжному полі графічного позначення ОП?
- 15 Які схеми розробляються на основі ОП?
- 16 Який параметр називається частотою одиничного підсилення?
- 17 Зробіть порівняльний аналіз вхідних струмів за величиною у ОП на біполярних структурах і у ОП на МОП структурах.
- 18 Як розраховується швидкість наростання вихідної напруги ОП?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- 1 **Колонтаєвський, Ю.П.** Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум [Текст] / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков – К.: Каравела, 2003.– 368 с.
- 2 **Волович, Г.И.** Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств [Текст] / Г.И. Волович – М.: Издательский дом "Додека-XXI", 2005. – 528 с.
- 3 **Алексенко, А.Г.** Микросхемотехника [Текст] / А.Г. Алексенко, И.И. Шагурин – М.: Радио и связь, 1990. – 496 с.
- 4 **Руденко, В.С.** Промислова електроніка [Текст] / В.С. Руденко, В.Я. Ромашко, В.В. Трифонюк. – К.: Либідь, 1993. – 432 с.

Додаток А
Правила роботи з осцилографом С1-73

А.1 Підготовка до проведення вимірювань з використанням осцилографа

А.1.1 Установіть тумблери на передній панелі у наступні положення:

- ручку "↑" у середнє;
- перемикач " $\sim \perp \sim$ " - у " $\perp$ ";
- ручку "РІВЕНЬ" - у крайнє праве;
- перемикач "СИНХР" - у " $\sim +$ ";
- перемикач "мс/ДЕЛ, мкс/ДЕЛ" - у "1 мс/ДЕЛ";
- ручку "ПОВІЛЬНО" - у крайнє праве;
- ручку "СТАБ" - у крайнє праве;
- ручку " $\leftrightarrow$ " - у середнє.

А. 1.2 Ввімкніть тумблер "ЖИВЛЕННЯ" на передній панелі осцилографа. При цьому повинна засвітитися сигнальна лампа. Дайте осцилографу прогрітися протягом 2 - 3 хвилин.

А.1.3 Ручкою "ЯРКІСТЬ" установіть зручну для спостереження яскравість зображення.

А. 1.4 Ручкою "↑" сумістіть лінію розгортки з центром екрана електронно-випромінювальної трубки.

А. 1.5 Ручкою "ФОКУС" установіть однакову чіткість по всій лінії променя.

А.2 Проведення вимірювань

А.2.1 Для проведення вимірювань змінної напруги виконайте перелічені нижче операції.

А.2.1.1 Подайте досліджуваний сигнал до гнізда підсилювача "Y".

А.2.1.2 Установіть перемикач "В/ДЕЛ" таким чином, щоб досліджуваний сигнал на екрані електронно-випромінювальної трубки (ЕВТ) займав близько п'яти поділок.

А.2.1.3 Установіть перемикач " $\sim \pm \sim$ " у положення " $\sim$ " (для низько-частотних сигналів з частотою нижче 50 Гц використовуйте положення " $\sim$ ").

A.2.1.4 Установіть стале зображення за допомогою ручки "PI-ВЕНЬ".

A.2.1.5 Перемикач "мс/ДЕЛ, мкс/ДЕЛ" установіть таким чином, щоб на екрані спостерігалось декілька періодів досліджуваного сигналу.

A.2.1.6 Ручками " $\leftrightarrow$ " і " $\updownarrow$ " зручно розташуйте сигнал на екрані ЕВТ.

A.2.1.7 Виміряйте відстань по вертикалі у поділках; при цьому ручка "ПІДСИЛЕННЯ" повинна бути у крайньому лівому положенні; помножте цю величину на коефіцієнт відхилення; розділіть результат на два - це і буде амплітуда сигналу.

A.2.2 Для вимірювання тривалості сигналу виконайте перелічені нижче операції.

A.2.2.1 Виконайте операції A.2.1.1 – A.2.1.6 з підрозділу A.2.1.

A.2.2.2 Виміряйте горизонтальну відстань між вимірюваними точками, помножте на коефіцієнт розгортки, при цьому ручка "ПОВІЛЬНО" повинна бути установлена у крайнє ліве положення.

A.3 Параметри осцилографа С1-73

Діапазон вимірювальних напруг - 20 мВ ... 350 В.

Діапазон вимірювальних інтервалів часу - 0,4 мкс ... 0,5 с.

Смуга пропускання – 0...5 МГц.

Похибка вимірювання амплітуди сигналу: не більше 15 %.

Похибка вимірювання інтервалів часу: не більше 10 %.

Напруга мережі живлення: 220 В, 50 Гц; 115 В, 400 Гц.

Параметри каналу Y:

- чутливість каналу: 10 мВ/под – 20 В/под.;
- вхідний опір каналу: 1 МОм;
- вхідна ємність каналу: 35 пФ.

Параметри каналу X:

- тривалість розгортки мінімальна: 0,1 мкс/под.;
- тривалість розгортки максимальна: 0,05 с/под.