Лабораторна робота № 11

ПІДСИЛЮВАЛЬНІ КАСКАДИ НА БІПОЛЯРНИХ ТРАНЗИСТОРАХ (ПБТ)

Мета роботи: дослідити параметри та характеристики підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах, ввімкнених за схемами спільний емітер (СЕ), спільна база (СБ) і спільний колектор (СК).

Опис досліджуваної схеми

До складу лабораторної установки входять: універсальний лабораторний стенд, змінний лабораторний модуль № 11, генератор Л-30 (GFG-8216A), вольтметр В3-38 (В3-13), осцилограф СІ-55, магазин опорів Р33, мультиметр ВР-11.

На рис. 11.1 наведено принципову електричну схему лабораторного модуля, в якому зібрані три окремих підсилювальних каскади. Вибір досліджуваного каскаду здійснюється кнопковим перемикачем, котрий знаходиться на панелі лабораторного стенду. Вхідний сигнал від Л-30 надходить на входи каскадів через перемикач *S*1 *(S*2*;S*3*)* і нормально замкнений *S*5 або підключений до гнізд *XS*1 і *XS*2 магазин опорів Р33 при розімкненому *S*1. Вхідний сигнал контролюється вольтметром *PV*1 або першим каналом підсилення осцилографа СІ-55. Вихідний сигнал через перемикач *S*1б *(S*2б*, S*3б*)* надходить на вихідний вольтметр *PV*2, другий

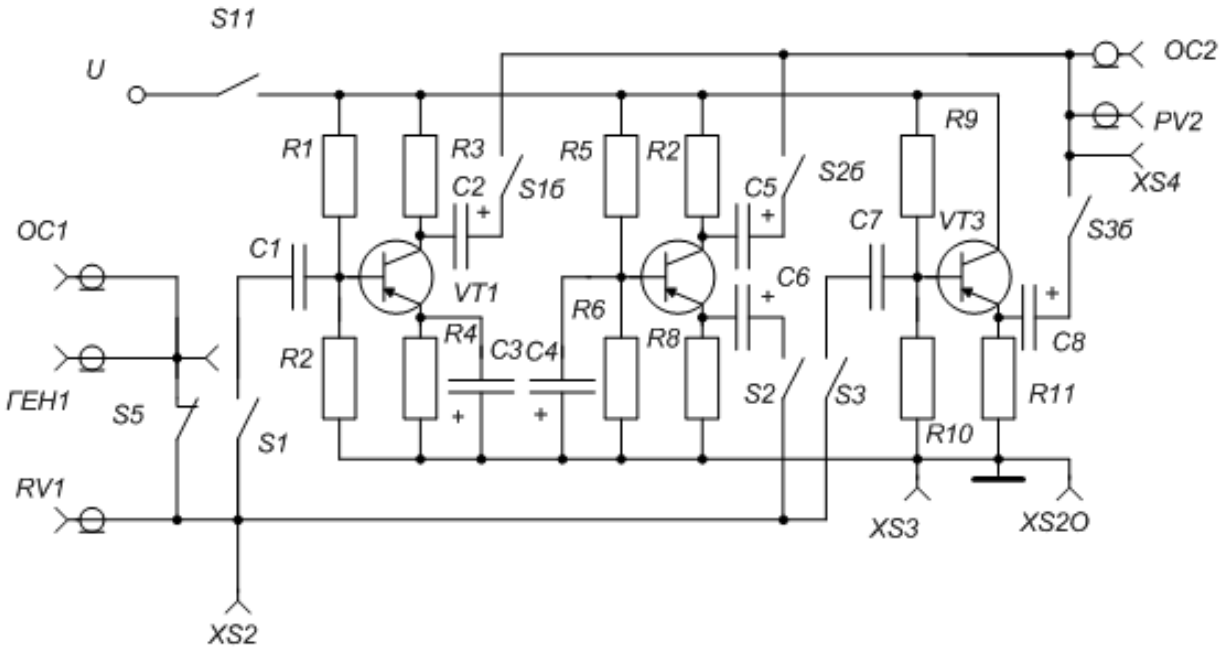


Рис. 11.1

канал підсилювання осцилографа СІ-55 та гнізда *XS*4 і "⊥" *(XS*20*)*, до яких можна також підключити зовнішнє навантаження. Усі каскади живляться від джерела постійної напруги U, котре вмикається натисканням кнопки «*S*11» (ВКЛ).

Домашнє завдання

1. Вивчити схеми ввімкнення біполярних транзисторів у каскадах СЕ, СБ, СК, параметри та характеристики каскадів на низьких, середніх і високих частотах [1; 2; 3; 4; 9].

2. Привести вирази для коефіцієнтів підсилення напруги, струму потужності, вхідного та вихідного опорів каскадів СЕ, СБ, СК; підрахувати їх значення для показаних на рис. 11.1 схем на середній частоті ($f_Г$ =1 кГц, $R_Г$ =0).

Параметр	Каскад		
	СЕ	СБ	СК
$R_{ВИХ}$ ($R_Г$=0)			
$R_{ВХ}$ ($R_Н$=$R_{ВИХ}$)			
K_U ($R_Н$=$R_{ВИХ}$)			
K_I ($R_Н$=$R_{ВИХ}$)			

Робоче завдання

1. Для кожного з досліджуваних підсилювальних каскадів СЕ, СБ, СК виміряти вхідний опір $R_{ВХ}$ на середній частоті: $f_Г$=1000 Гц, $R_Г$=50 Ом, $U_{ВХ}$=10мВ для схем СЕ і СБ, $U_{ВХ}$=100мВ для схеми ЗК, $R_{ВИХ}$= $R_Н$.

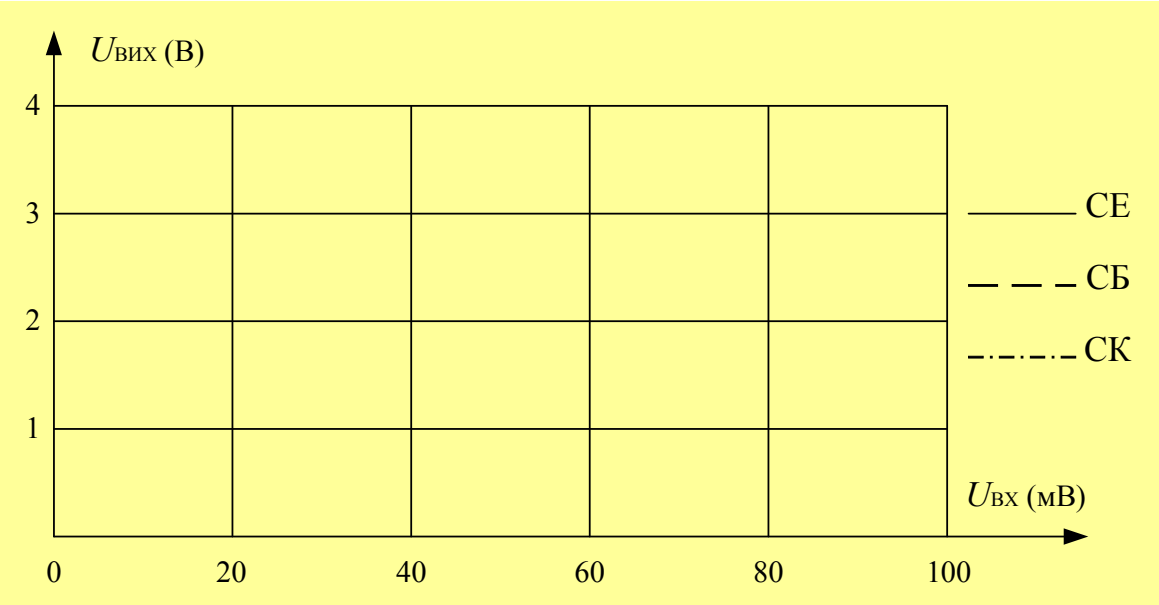
2. Виміряти вихідний опір $R_{ВИХ}$ каскадів СЕ, СБ, СК: $f_Г$=1000 Гц, $R_Г$=50 Ом, $U_{ВИХ\ XX}$ =100 мВ.

Параметр	Каскад		
	СЕ	СБ	СК
$R_{ВХ}$			
$R_{ВИХ}$			

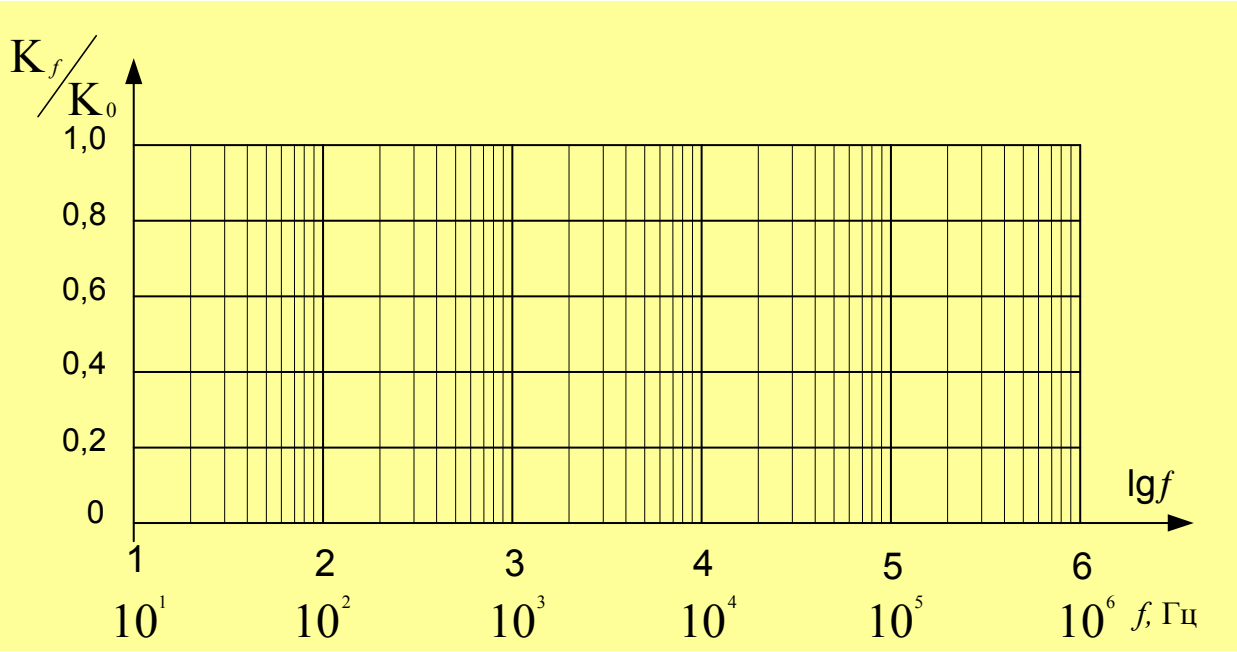
3. Визначити коефіцієнти підсилення каскадів ЗЕ, ЗБ, ЗК за напругою K_U, струмом K_I, потужністю K_P на середній частоті: $f_Г$=1000 Гц, $R_Г$=50 Ом, $R_Н$=$R_{ВИХ}$.

Параметр	Каскад		
	СЕ	СБ	СК
K_U			
K_I			
K_P			

4. Зняти і побудувати для каскадів СЕ, СБ, СК амплітудну характеристику $U_{ВИХ}=F(U_{ВХ})$; : $f_Г$=1000 Гц, $R_Г$=50 Ом, $R_Н$ =$R_{ВИХ}$.



5. Зняти і побудувати у напівлогарифмічному масштабі амплітудно-частотні характеристики /АЧХ/ каскадів СЕ, СБ, СК. Визначити для кожного каскаду граничні частоти і смугу пропускання: $R_Г$=50 Ом, $U_{ВХ}$=10 мВ - ЗЕ і ЗБ, $U_{ВХ}$=100 мВ - ЗК, $R_Н$ =$R_{ВИХ}$.



6. Порівняти результати розрахунків та вимірів, зробити висновки за кожним пунктом робочого завдання.

Методичні вказівки

На рис. 11.1 показано три підсилювальних каскади. Перший каскад зібрано за схемою спільного емітера (СЕ). Основним елементом підсилювального каскаду є транзистор $VT1$ який забезпечує підсилення

електричного сигналу. Резистори *R*1, *R*2 – вхідний дільник напруги, який забезпечує режим роботи базового кола на постійному струмі, іншими словами, вибір положення робочої точки на сім'ях статичних вхідних та вихідних вольт-амперних характеристик (ВАХ). Опір $R3$ є колекторним навантаженням транзистора на постійному струмі. Резистор $R4$ забезпечує від'ємний зворотний зв'язок (ВЗЗ) на постійному струмі і виконує функцію термостабілізації робочої точки транзистора. Конденсатор *C*3 шунтує резистор *R*4 на змінному струмі і відповідно вилучає від'ємний зворотний зв'язок за змінним струмом. Роздільний конденсатор *C*1 розділяє джерело вхідного сигналу і вхід підсилювача на постійному струмі. Оскільки конденсатор перепускає тільки змінний струм, на вхід підсилювача буде передаватись тільки змінна складова вхідного сигналу. Окрім того, постійна напруга з дільника *R*1, *R*2 не буде впливати на режим роботи джерела вхідного сигналу. Призначення конденсатора *C*2 аналогічне. Він розділяє вихід підсилювача і навантаження на постійному струмі. Внаслідок цього до навантаження буде передана тільки змінна складова підсилюваного сигналу.

Принцип роботи транзисторного підсилювача пояснимо за допомогою рисунку 11.2. При невеликому змінюванні вхідного сигналу, прикладеного між базою і емітером, струм бази зміниться на якесь значення $\Delta I_{\text{Б}}$. При цьому струм колектора зміниться на значно більше значення $\Delta I_{\text{К}} = \beta \cdot \Delta I_{\text{Б}}$. Навантаженням транзистора на змінному струмі є резистор *R*3 (або *R*3 та $R_{\text{Н}}$, які на змінному струмі ввімкнуті паралельно), на якому виділяється напруга $U_{R3} = \Delta I_{\text{К}} \cdot R3$.

Режим роботи підсилення і клас підсилення визначаються положенням робочої точки «0» на вхідній та вихідній динамічних характеристиках транзистора.

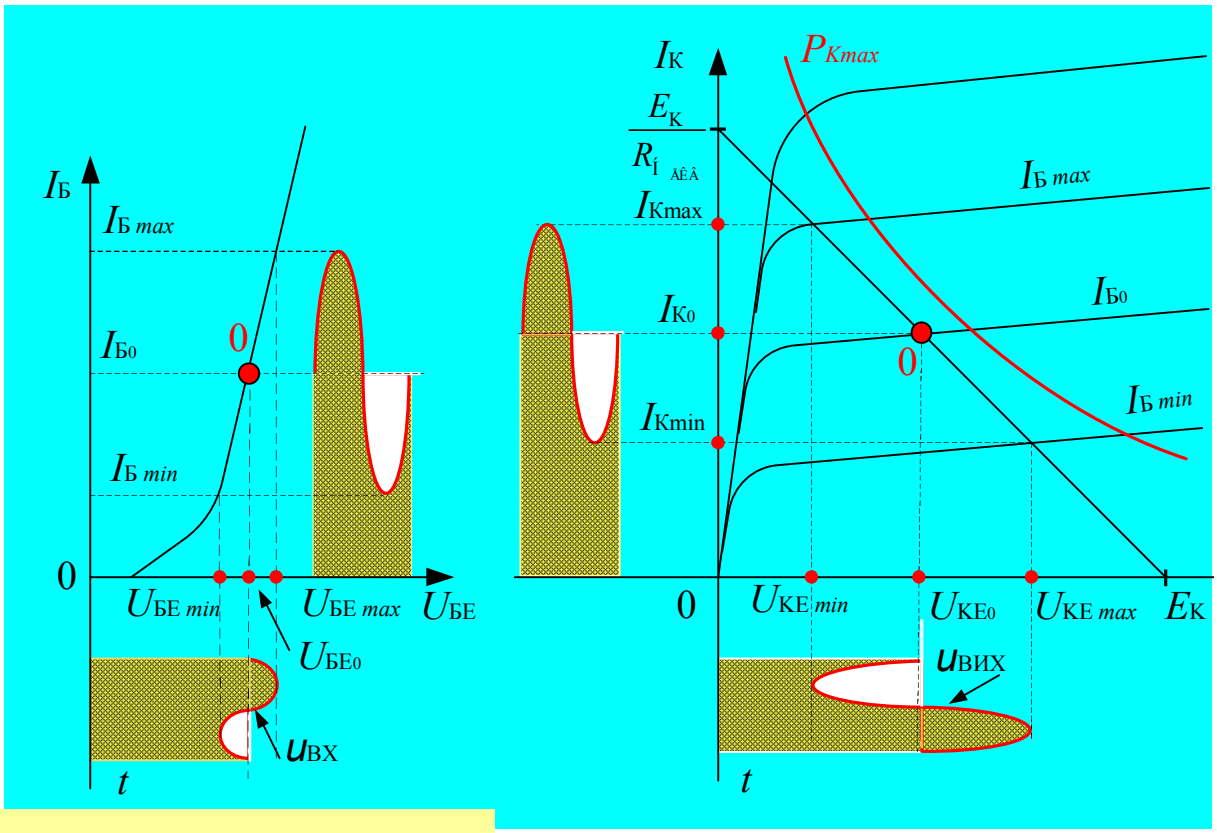
Для одержання максимальної вихідної потужності на навантаженні динамічна навантажувальна характеристика вибирається таким чином, щоб вона знаходилась поблизу смуги гранично-допустимого режиму $P_{\text{К}max}$, але не перетинала її. У режимі підсилення класу *A* робоча точка «0» вибирається приблизно на середині динамічної навантажувальної характеристики. З рисунку 11.2 видно, що підсилювальний каскад, зібраний за схемою спільного емітера, змінює фазу вихідної напруги $U_{\text{КЕ}}$ по відношенню до вхідної $U_{\text{БЕ}}$ на 180 градусів. Побудовані графіки дозволяють також визначити основні параметри підсилювального каскаду:

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВИХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{КЕ}max} - U_{\text{КЕ}0}}{U_{\text{БЕ}max} - U_{\text{БЕ}0}}; \qquad R_{\text{ВИХ}} \approx R_{\text{К}};$$

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{\Delta \text{U}_{\text{ВХ}}}{\Delta \text{I}_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{БЕ}max} - U_{\text{БЕ}0}}{I_{\text{БЕ}max} - I_{\text{БЕ}0}}; \qquad K_{\text{I}} = \frac{\Delta I_{\text{ВИХ}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{К}max} - I_{\text{К}0}}{I_{\text{Б}max} - I_{\text{Б}0}}.$$

Амплітудна характеристика підсилювача - це залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного (рис. 11.3) $U_{ВИХ}=f(U_{ВХ})$.

Для ідеального підсилювача амплітудна характеристика представляє



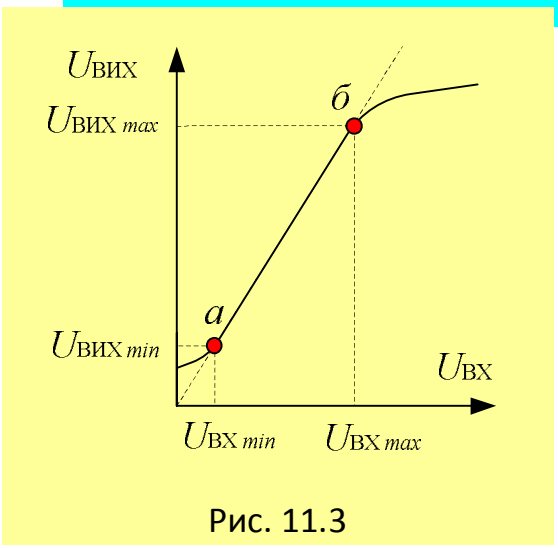


Рис. 11.3

пряму лінію, яка проходить через початок координат. Амплітудна характеристика реального підсилювача збігається з характеристикою ідеального тільки на відрізку [а, б]. При вхідних сигналах $U_{ВХ} > U_{ВХmax}$ вихідна напруга підсилювача не зростає. Це зв'язано з тим, що у режимі великих вхідних сигналів робоча точка транзистора заходить у режим насичення (мають прояв нелінійні властивості транзистора). При цьому вихідний сигнал спотворюється. Це явище має назву нелінійних спотворень.

При малих вхідних сигналах $U_{ВХ} < U_{ВХmin}$ вихідна напруга підсилювача залишається постійною і дорівнює $U_{ВИХmin}$. Напруга $U_{ВИХmin}$ має назву напруги власних шумів підсилювача. Власні шуми підсилювача обумовлені різними перешкодами і наводками, а також непостійністю електричних процесів у часі. За допомогою підсилювача неможливо підсилювати сигнали з амплітудою $U_{ВХ} < U_{ВХ\,min}$, оскільки підсилюваний сигнал не можна визначити у власних шумах підсилювача. Відношення $U_{ВХmax}/U_{ВХmin} = D$ називається динамічним діапазоном підсилювача.

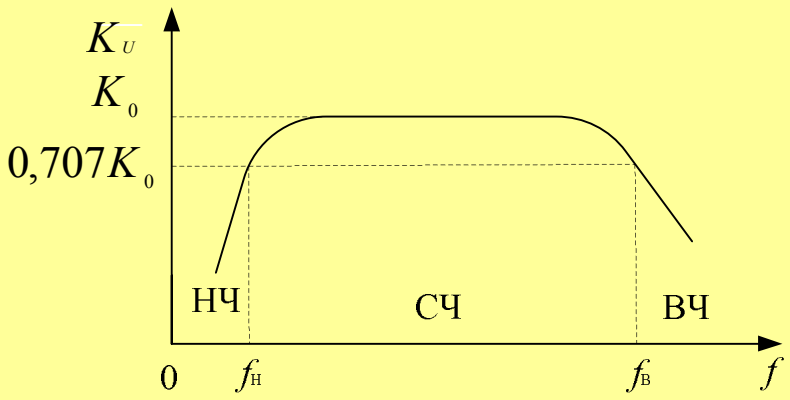


Рис. 11.4

Розглянута схема має амплітудно-частотну характеристику (АЧХ), яка показана на рис. 11,4. Зниження коефіцієнта підсилення на низьких частотах (НЧ) обумовлено наявністю у схемі роздільних конденсаторів *С*1, *С*2. При зниженні частоти *f* опір конденсаторів $X_C = 1/\omega C$ збільшується. Це спричиняє зменшення підсилюваної напруги на навантаженні. В області середніх частот (СЧ) опір конденсаторів *С*1, *С*2, *С*3 стає зневажливо малим і його можна не враховувати. В області високих частот (ВЧ) починають проявлятись частотні властивості транзистора і його коефіцієнт підсилення зменшується. Розглянута схема має широке розповсюдження як складова частина різних транзисторних пристроїв.

Третій каскад (див. рис. 11.1) зібрано за схемою спільного колектора (СК). Інша назва цієї схеми - емітерний повторювач. Призначення основних елементів даної схеми таке, як і у попередньої. Різниця лише в тому, що резистор *R*11 задає робочу точку вихідного кола транзистора і є його навантаженням. Оскільки в транзисторі напруга $U_{БЕ}$ дуже мала, можна вважати, що $U_{ВИХ} \approx U_{ВХ}$. Отже, емітерний повторювач не підсилює напругу ($K_U \le 1$). Однак схема забезпечує підсилення струму $\Delta I_К = (\beta + 1)\Delta I_Б$ і потужності.

У схемі емітерного повторювача відсутній шунтуючий конденсатор у емітерному колі. Отже, вся вихідна напруга виділяється на резисторі *R*11. По відношенню до переходу база-емітер транзистора ця напруга ввімкнута послідовно і зустрічно з вхідною напругою. Таким чином, у схемі діє стовідсотковий послідовний від'ємний зворотний зв'язок за вихідною напругою. У зв'язку з цим емітерний повторювач має великий вхідний і малий вихідний опір. Ці властивості емітерного повторювача визначають області його вживання в якості підсилювача струму як елемент узгодження високоомного джерела вхідного сигналу з низькоомним навантаженням. Оскільки в емітерному повторювачі діє глибокий від'ємний зворотний зв'язок, він впливає на параметри і характеристики підсилювача. Зокрема, розширюється смуга пропускання, зменшуються частотні та нелінійні спотворення.

1. Для вимірів вхідного опору $R_{ВХ}$ використовується магазин каліброваних опорів Р33, який вмикається між джерелом гармонічного сигналу Л-30 та досліджуваним каскадом (рис. 11.5).

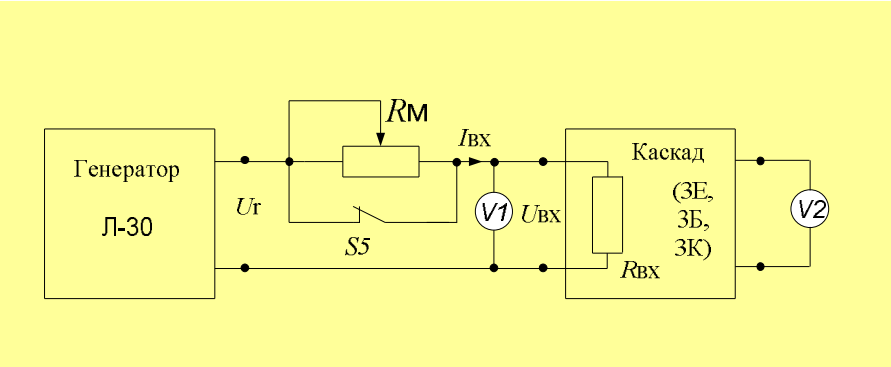


Рис. 11.5

На опорі магазину $R_{\text{М}}$ виділяється частина вхідного сигналу $U_{\text{Г}}$ яка визначається відношенням $R_{\text{М}}$ і $R_{\text{ВХ}}$. Вольтметр *V*1 при замкненому *S*5 показує $U_{\text{г}}$, а при розімкненому *S*5 - значення $U_{\text{ВХ}}$. Вимірювання $R_{\text{ВХ}}$ зводиться до установлення деякого значення $U_{\text{Г}}$ за вольтметром *V*1 і вибору такого значення $R_{\text{М}}$, щоб $U_{\text{ВХ}} = 0{,}5U_{\text{Г}}$. У цьому випадку сигнал генератора $U_{\text{Г}}$ ділиться нарівно між $R_{\text{М}}$ та $R_{\text{ВХ}}$, через те $R_{\text{М}} = R_{\text{ВХ}}$ і значення $R_{\text{ВХ}}$ визначається за шкалами магазину опорів.

2. При вимірюванні вихідного опору $R_{\text{ВИХ}}$ магазин опорів використовується як каліброване навантаження $R_{\text{Н}} = R_{\text{М}}$, яке підключається до гнізда *XS*4 та *XS*20 $(\perp)$ лабораторного стенду (Рис. 11.6). При постійній напрузі $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{Г}}$, яка вимірюється вольтметром *V*1, величина вихідної напруги на навантаженні $R_{\text{і}}$, вимірюваної вольтметром *V*2 визначається співвідношенням величин $R_{\text{ВИХ}}$ і $R_{\text{Н}}$. При $R_{\text{Н}} = \infty$ маємо $U_{\text{ВИХ.Н.Х.}} = U_{\text{Н}}$. Для визначення $R_{\text{ВИХ}}$ необхідно встановити величиною $U_{\text{Г}}$ зручне значення вихідної напруги неробочого ходу $U_{\text{ВИХ.Х.Х.}}$ при відключеному навантаженні. Після цього треба встановити максимальний опір і ввімкнути його до гнізд *XS*4 і *XS*20 $(\perp)$. Після того, як за зменшенням $R_{\text{Н}}$, напруга $U_{\text{Н}}$ зменшується до величини $U_{\text{Н}} = 0{,}5 \cdot U_{\text{ВИХ.Н.Х.}}$, шукану величину $R_{\text{ВИХ}}$ каскаду можна визначити за шкалою Р33.

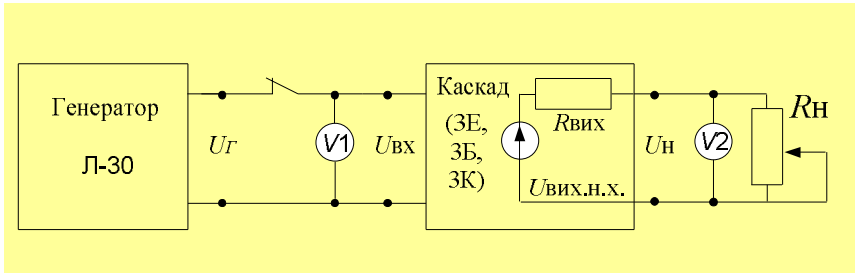


Рис. 11.6

Всі наступні виміри проводяться при оптимальному навантаженні каскадів $R_{\text{і}} = R_{\text{ВИХ}}$, відповідному максимальному підсиленню сигналу за потужністю.

3. Коефіцієнт підсилення каскадів за напругою K_U визначається безпосередньо за показанням вхідного і вихідного вольтметрів. Коефіцієнт підсилення за струмом визначається перерахуванням:

$$K_{\text{I}} = \frac{I_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{Н}}}{R_{\text{Н}}} : \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}} = K \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}}}.$$

Аналогічно, коефіцієнт підсилення за потужністю:

$$K_P = K_U K_I = K_U^2 \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Н}}} = K_{\text{I}}^2 \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}}}.$$

4. При зніманні амплітудної характеристики каскадів потрібно при $U_{\text{Г}}$=0 визначити $U_{\text{ВИХ}min}$, яке є шумовою складовою вихідного сигналу. Вели-чина $U_{\text{ВИХ}max}$ визначається вольтметром *V*2 при появі істотних нелінійних спотворень, які спостерігаються за допомогою осцилографа.

Потрібно пам'ятати, що вольтметри *V*1 і *V*2 показують діюче значення синусоїдальних напруг, отже, максимальний розмах напруг, що визначає динамічний діапазон вхідного і вихідного сигналів, у $\sqrt{2}$ разів більше.

5. При зніманні та побудові нормованих АЧХ $K(f)/K_0$ треба підтримувати $U_{\text{Г}} = U_{\text{ВХ}} = const$.

Тоді

$$\frac{K(f)}{K_0} = \frac{U_{\text{ВИХ}}(f)/U_{\text{ВХ}}(f)}{U_{\text{ВИХ}}(f_0)/U_{\text{ВХ}}(f_0)} = \frac{U_{\text{ВИХ}}(f)}{U_{\text{ВИХ}}(f_0)}\Bigg|_{U_{\text{ВХ}}(f) = U_{\text{ВХ}}(f_0)},$$

де f_0 - частота діапазону, для якого $K(f) = const$ верхня $f_{\text{В.ГР}}$ та нижня $f_{\text{Н.ГР}}$ граничні частоти визначаються за зменшенням підсилення, за потужністю удвічі. При $Z_{\text{ВХ}} = const$ і $Z_{\text{Н}} = const$ у всьому частотному діапазоні це означає зменшення K_U і $K_{\text{Г}}$ на граничних частотах в $\sqrt{2}$ разів. Тому визначення АЧХ належить починати із знаходження частот $f_{\text{В.ГР}} > f_0$ і $f_{\text{Н.ГР}} < f_0$, на яких $Kj(t)/Kj(f_0) = 0.707$. Інші ординати АЧХ треба визначити для частот $f_{\text{Н.ГР}} < f_0 < f_{\text{В.ГР}}$, у відповідності з їх рівномірним розподілом, на графіку з логарифмічним масштабом частоти.

УВАГА! Усі виміри, які проводяться за допомогою вольтметрів *V*1 і *V*2, слід виконувати двопроменевим осцилографом СІ-55, використовуючи його перший канал вертикального відхилення як вольтметр *V*1, а другий канал - як вольтметр *V*2

Контрольні запитання

1. Визначіть за принциповою схемою каскаду спосіб ввімкнення транзистора.

2. Порівняйте каскади СЕ, СБ, СК за коефіцієнтами підсилення.

3. У якому каскаді реалізовано підсилення за струмом і потужністю?

4. Який каскад забезпечує підсилення за потужністю та чому?

5. У якому каскаді реалізовано підсилення за напругою та потужністю?

6. Порівняйте підсилювальні каскади СЕ, СБ, СК за величинами $R_{\text{ВХ}}$ і $R_{\text{ВИХ}}$. Чим вони відрізняються?

7. Порівняйте частотні властивості каскадів СЕ, СБ, СК і поясніть причини відмінностей.

8. Поясніть призначення кожного компоненту схем каскадів.

9. Як залежить $R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВИХ}}$, K_U, K_I, K_P каскадів СЕ, СБ, СК від значень електричних параметрів компонентів?

10. Коли, треба використовувати підсилювальні каскади СЕ, СБ, СК?

11. Назвіть основні способи завдання режиму роботи біполярного транзистора у підсилювальних каскадах СЕ, СБ, СК?

12. Як побудувати навантажувальну лінію на постійному та змінному струмі?

13. Поясніть вплив температури на режим роботи підсилювальних каскадів.

14. Які вам відомі способи температурної стабілізації режиму роботи каскадів? Поясніть особливості їх застосування.