

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсової роботи
«Аналіз режиму роботи електронного кола
графоаналітичним методом»
(для студентів напрямків 6.050802 «Електронні пристрої
та системи», 6.051003 «Приладобудування»)

Розглянуто
на засіданні кафедри «Електронна техніка»
протокол № 8 від 24. 11. 2008 р.

Затверджено
на засіданні навчально-видавничої
ради ДонНТУ
протокол № 6 від 15.12.2008 р.

ДОНЕЦЬК ДонНТУ 2008

УДК 621.373

Методичні вказівки до курсової роботи «Аналіз режиму роботи електронного кола графоаналітичним методом» (для студентів напрямків 6.050802 «Електронні прилади та системи» і 6.051003 «Приладобудування» всіх форм навчання) /Сост. В.Д.Коренєв – Донецьк: ДонНТУ, 2008 – 34с.

Містять опис основних положень теорії аналізу режиму електронного кола графоаналітичним методом, приклади виконання розрахунків за визначенням характеристик підсилювальних каскадів, варіанти завдань на курсову роботу, вимоги до змісту і оформлення пояснювальної записки. Призначені для надання допомоги студентам у вивченні методів аналізу і розрахунку електронних схем, при виконанні курсової роботи, індивідуальних завдань і дипломних проектів. Розраховані на студентів напрямів підготовки 6.050802 «Електронні прилади та системи» і 6.051003 «Приладобудування», що вивчають дисципліни «Аналіз електронних схем» та «Методи розрахунку електронних схем».

У підготовці і оформленні „Методичних вказівок...” приймали участь магістри кафедри Електронна техніка” Лазаренко Д.В. (НАП – 07м) і Тимошенко І.М. (ЕлС – 07м).

Укладач: В.Д. Коренєв, доц.

ВСТУП

При аналізі роботи і розрахунках підсилювальних каскадів широко застосовують їх робочі характеристики. Вони зв'язують між собою миттєві значення напруг і струмів в гілках підсилювального елемента (біполярного або польового транзистора, вакуумного триода і т.п.) за наявності навантаження (опору) в його вхідному або вихідному колі. Опір вхідного або (і) вихідного кола підсилювального каскаду для постійного і змінного струмів в загальному випадку (тобто коли в схемі є активні і реактивні елементи) неоднаковий. Тому розрізняють 2 види робочих характеристик: для постійного струму (тобто при дуже повільних змінах вхідного сигналу) і для змінного струму (при зміні вхідного сигналу по гармонійному закону з деякою частотою).

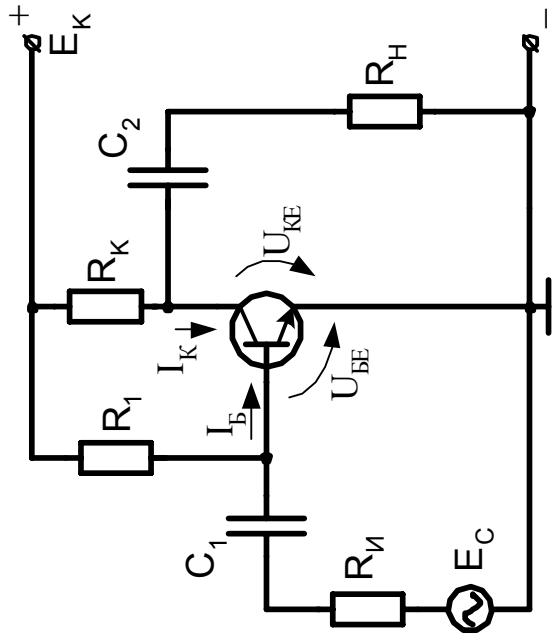
1 РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО КАСКАДУ

1.1 Робочі характеристики для постійного струму

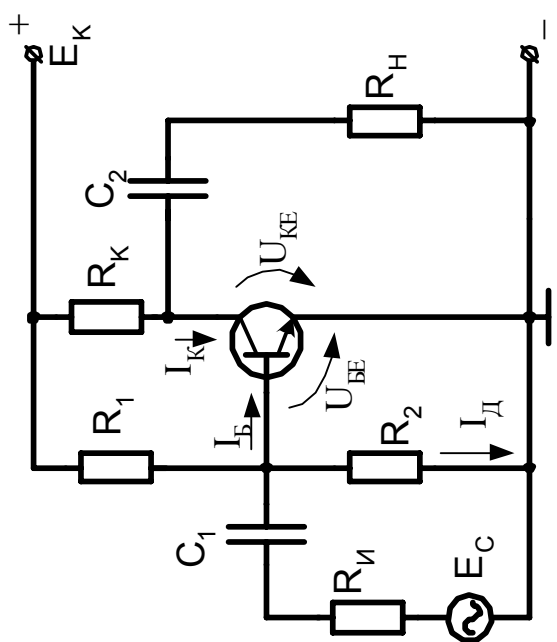
1.1.1. Перехід від статичних вольт-амперних характеристик (в.а.х.) підсилювального елемента до робочих характеристик підсилювального каскаду розглянемо на прикладі підсилювача на біполярному транзисторі, виконаного за схемою із спільним емітером (СЕ) – рис. 1а або рис. 1б. Для підсилювального каскаду на польовому транзисторі або вакуумному триоді цей перехід виконується у подібний спосіб.

Колекторне коло транзистора при деякому незмінному значенні струму бази ($I_B = \text{const}$) можна розглядати як послідовне з'єднання лінійного опору R_K і нелінійного опору R_{HE} , що підключається до джерела живлення E_K - рис. 2а. В.а.х. послідовного з'єднання R_K і R_{HE} при $I_B = \text{const}$ і є робочою вихідною характеристикою підсилювального каскаду для постійного струму при $I_B = \text{const}$. Побудова цієї в.а.х. здійснюється у відомий спосіб – шляхом алгебраїчного складання падінь напруги на R_K і R_{HE} при однакових значеннях колекторного струму I_K . На рис. 3 в системі координат (I_K, U_{KE}) показані: в.а.х. лінійного опору R_K – 1, сімейство статичних вихідних в.а.х. біполярного транзистора – 2, сімейство робочих вихідних характеристик підсилювального каскаду (результат побудови) – 3. Точки перетину вертикальної лінії 5, що відповідає значенню е.р.с. джерела живлення E_K , з отриманими робочими характеристиками підсилювального каскаду 3 дозволяють побудувати робочу перехідну характеристику підсилювача – залежність $I_K = f(I_B)$ при постійних значеннях E_K і R_K (лінія 4 на рис. 3).

1.1.2. Наведені на рис. 3 робочі характеристики 3 рідко застосовуються на практиці через громіздкість їх побудови і необхідності перестроювання для кожного нового значення R_K . Зазвичай на сімействі статичних вихідних в.а.х. транзистора будують лінію навантаження для постійному струму (лінія 1 на рис. 4), рівняння якої має вигляд:

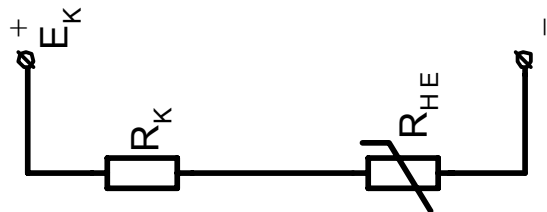


а)

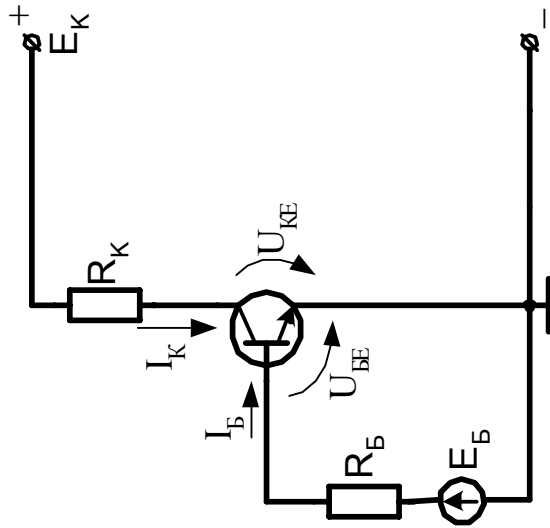


б)

Рисунок 1 – Схеми підсилювальних каскадів на біполярному транзисторі



а)



б)

Рисунок 2 – Еквівалентні схеми транзисторних каскадів

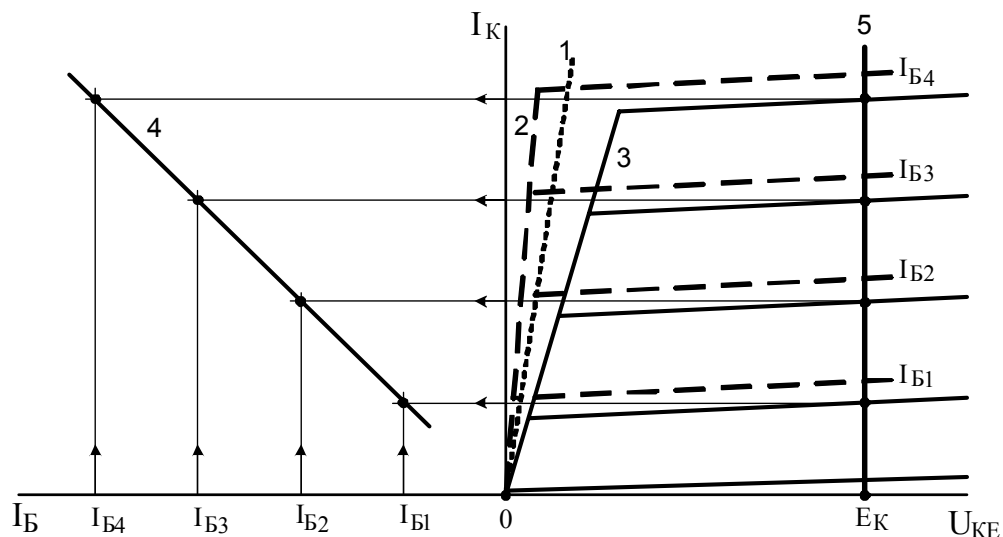


Рисунок 3 – Робочі характеристики транзисторного підсилювального каскаду для постійного струму

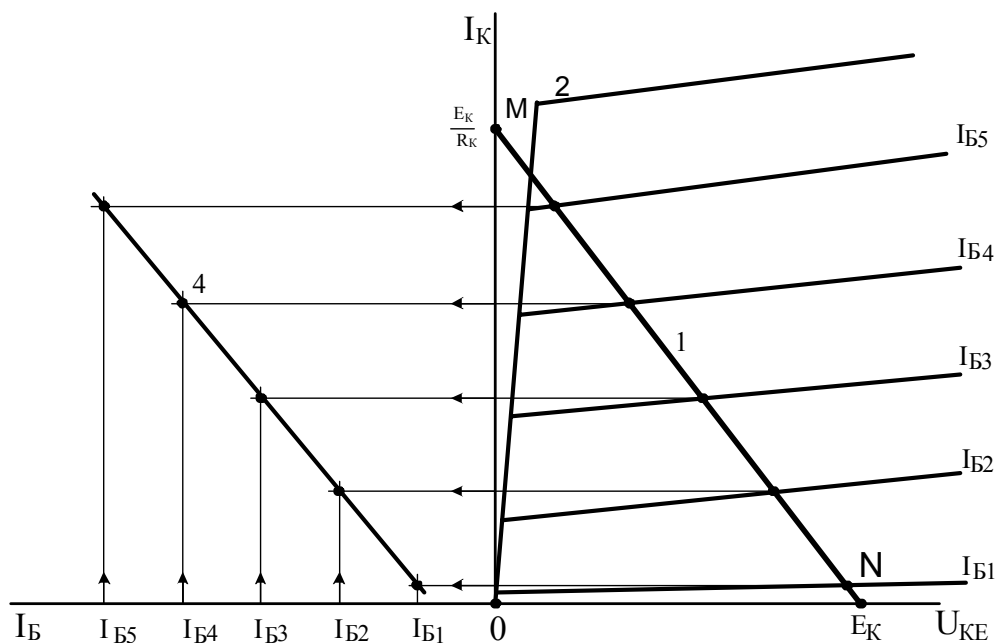


Рисунок 4 – Побудова лінії навантаження і перехідної характеристики транзисторного підсилювального каскаду для постійного струму

$$I_K = -U_{KE}/R_K + E_K/R_K. \quad (1.1)$$

Рівняння (1) записано для схем, наведених на рис.1, на підставі другого закону Кирхгофа для колекторного кола транзистора. Це рівняння прямої лінії. Найчастіше лінія навантаження будується по двох точках, що їй належать: ($I_K=0$; $U_{KE}=E_K$) і ($I_K=E_K/R_K$; $U_{KE}=0$) – лінія 1 на рис. 4. Нахил прямої 1 визначає опір R_K : при збільшенні опорі R_K лінія навантаження стає більш пологою, а при зменшенні – проходить крутіше; при $R_K=0$ лінія навантаження вертикальна. На цьому ж рисунку показано побудову перехідної характеристики підсилувача 4 при $E_K=\text{const}$ і $R_K=\text{const}$.

За допомогою лінії навантаження 1 і перехідної характеристики 4 можна графічно визначити напругу, що діє між колектором і емітером транзистора, напругу на опорі R_K , колекторний струм і струм бази транзистора і т.д.

1.1.3. При аналізі роботи транзисторних підсилювальних каскадів широко застосовується робоча вхідна характеристика. Вона встановлює зв'язок між напругою, що діє у вхідному колі, і вхідним струмом підсилювального елемента з урахуванням повних опорів вхідної і вихідної гілок. Для каскаду, де транзистор працює у включенні зі спільним емітером (СЕ), ця характеристика є залежністю $I_B(U_{BE}; U_{KE})$ при $E_K=\text{const}$ і $R_K=\text{const}$. Для підсилювальних каскадів на польових транзисторах або вакуумних тріодах, що працюють без струмів в колі затвору або управляючої сітки, вхідна робоча характеристика не використовується. При розрахунку таких схем частіше застосовують прохідну характеристику, що є залежністю $I_C=f(U_{ЗВ})$ при $E_C=\text{const}$ і $R_C=\text{const}$ (для підсилювальних каскадів на польових транзисторах в схемі із спільним витоком) або $I_a=f(U_{СК})$ при $E_a=\text{const}$ і $R_a=\text{const}$ (для підсилювальних каскадів на вакуумних тріодах в схемі із загальним катодом).

Відомо, що статична вхідна характеристика біполярного транзистора залежить від напруги U_{KE} . Напруга U_{KE} не залишається постійною ($E_K=\text{const}$) при зміні струму I_B , якщо в коло колектора транзистора включений опір R_K . Оскільки напруга U_{KE} залежить не тільки від струму I_B при $E_K=\text{const}$, але і від опорі навантаження R_K , то вхідна характеристика теж залежить від R_K . Значить, вхідна робоча характеристика транзисторного каскаду відрізнятиметься від статичної вхідної в.а.х. транзистора навіть за відсутності зовнішніх опорів у вхідному колі. Побудова робочої вхідної характеристики з використанням сімейства вхідних $[I_B(U_{BE}; U_{KE})]$ і вихідних $[I_K(U_{KE}; I_B)]$ статичних характеристик транзистора для включення СЕ показана на рис. 5. Порядок побудови наступний:

а) на множині (сімействі) статичних вихідних характеристик транзистора будується лінія навантаження для постійному струму (п.1.1.2) при заданих E_K і R_K ;

б) для точок перетину лінії навантаження MN і кожної i-ої статичної вихідної в.а.х. транзистора записуються відповідні значення струму бази I_{Bi} і напруги U_{KEi} ;

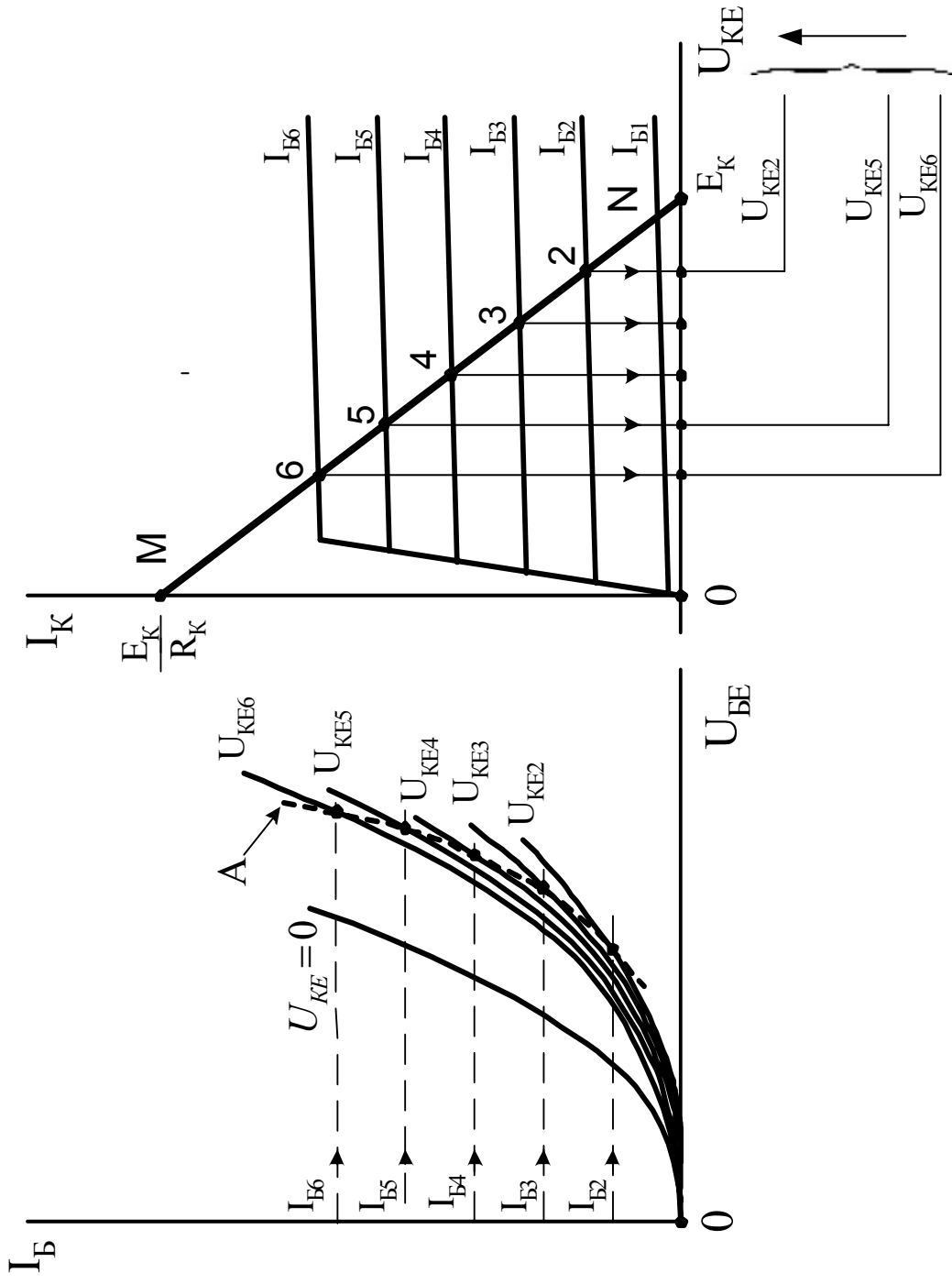


Рисунок 5 – Побудова робочої вхідної характеристики транзисторного підсилювального каскада

в) на сімействі статичних вхідних в.а.х. транзистора будується точка перетину статичної в.а.х. транзистора, що відповідає напрузі U_{KEi} , з горизонтальною лінією, для якої $I_B = \text{const} = I_{Bi}$; одержана точка перетину є i -ою точкою шуканої робочої вхідної характеристики. У такий же спосіб одержують інші точки робочої вхідної характеристики. З'єднавши їх, одержують робочу вхідну характеристику каскаду (пунктирна лінія А на рис. 5).

Слід зазначити, що досить часто частина робочої вхідної характеристики каскаду практично співпадає із статичною вхідною в.а.х. транзистора для $U_{KE} = U_{KEi} \neq 0$. Це спостерігається, якщо вхідні статичні в.а.х. транзистора при $|U_{KE}| \geq |U_{KEi}|$ майже співпадають.

1.2 Режим спокою електронних схем. Точка спокою

1.2.1. Лінія навантаження для постійному струму, що побудована на множині статичних вихідних в.а.х. транзистора або вакуумного тріода, є геометричним місцем всіх можливих значень вихідного струму і напруги підсилювального елемента електронного кола при заданих значеннях напруги джерела живлення і опору навантаження для постійного струму. Координати однієї точки лінії навантаження відрізняються від координат іншої такої напругою на управляючій сітці (для вакуумного тріода) або затворі (для польового транзистора) або вхідним струмом для біполярного транзистора. Точку перетину лінії навантаження із статичною в.а.х. лампи або транзистора, яка відповідає вибраному значенню напруги або струму електроду, що керує, підсилювального елемента схеми за відсутності вхідного сигналу каскаду, прийнято називати точкою спокою.

Координати точки спокою (будемо позначати її „т. П”) однозначно визначають початковий статичний режим підсилювального елемента схеми. Якщо відомі або обрані координати т.П, можна розрахувати параметри елементів схеми, які визначають її режим роботи на постійному струмі, і забезпечити потрібний режим роботи електронного кола. Вибір положення т.П залежить від призначення схеми, режиму її роботи, типу зв'язку каскаду з навантаженням, температурних умов, рівня нелінійних спотворень, що припускаються, к.к.д. і т.д. Так, наприклад, коли вхідний сигнал схеми симетричний, то т.П обирається приблизно посередині тієї частини лінії навантаження, що використовується; якщо на вході передбачається однополярний сигнал, то т.П обирається на нижній або верхній частині лінії навантаження.

1.2.2. Задача, що передбачає вибір координат т.П відповідно до деяких умов і розрахунок параметрів елементів схеми для забезпечення потрібного режиму роботи електронного кола, вважається прямою. Часто в статичному аналізі електронних схем доводиться вирішувати зворотну задачу: по заданій схемі підсилювального каскаду і відомим значенням параметрів всіх елементів схеми необхідно визначити напруги і струми, що задають початковий статичний режим роботи підсилювального елемента схеми, тобто визначити координати т.П. Зазвичай ця нелінійна задача (бо в.а.х. підсилювальних елеме-

нтів електронних кіл істотно нелінійні) найпростіше розв'язується графоаналітичним методом.

Приклад 1. Визначити координати т.П ($U_{KEП}$, $U_{BEП}$, $I_{KП}$, $I_{БП}$) для схеми підсилювача на біполярному транзисторі, наведеної на рис.1б; статичні вхідні і вихідні в.а.х. транзистора відомі і надані на рис. 6; $E_K=4,5$ В; $R_K=820$ Ом; $R_1=160$ кОм.

Розв'язання.

Для визначення чотирьох невідомих необхідно мати систему чотирьох рівнянь, до яких увійшли б ці невідомі. На підставі другого закону Кирхгофа для колекторного і базового кіл схеми рис. 1б можна записати два рівняння для цих невідомих:

$$E_K = U_{KE} + I_K \cdot R_K; \quad (1.2)$$

$$E_K = U_{BE} + I_B \cdot R_1. \quad (1.3)$$

До них слід додати рівняння для сімейств статичних вхідних і вихідних в.а.х. транзистора, що записані у символічній формі:

$$I_B = f(U_{BE}, U_{KE}); \quad (1.4)$$

$$I_K = \varphi(U_{KE}, I_B). \quad (1.5)$$

В результаті отримана система чотирьох рівнянь з чотирма невідомими, яка може бути розв'язана. Причому, останні два рівняння задані у графічному вигляді, як статичні вхідні і вихідні в.а.х. транзистора, включеного за схемою із спільним емітером. Рішення системи графоаналітичним методом надано на рис. 6. Порядок рішення наступний:

а) на сімействі статичних вихідних в.а.х. транзистора побудовано лінію навантаження для постійного струму 1 відповідно до рівнянням (1.2) системи; (пряму лінію побудовано по двох точках - п.1.1.2). Шукана т.П повинна обов'язково лежати на лінії навантаження 1, оскільки її координати є сумісним рішенням рівнянь (1.2)...(1.5) системи;

б) на сімействі статичних вхідних в.а.х. транзистора побудована робоча вхідна характеристика каскада 2 по точках перетину лінії навантаження 1 із статичними вихідними в.а.х. транзистора (п.1.1.3). Робоча вхідна характеристика каскада є сумісним рішенням рівнянь (1.2), (1.4) і (1.5);

в) на сімействі статичних вхідних в.а.х. транзистора побудована лінія навантаження вхідного кола транзистора для постійного струму 3 відповідно до рівняння (1.3) системи. Лінію (пряму) побудовано по двох точках: одна з них відповідає режиму короткого замикання і має координати [$I_B=(E_K/R_1)=(4,5 \text{ В}/160 \text{ кОм})=28 \text{ мкА}$; $U_{BE}=0 \text{ В}$]; координати другої допоміжної точки, що належить цій прямій, визначені із застосуванням рівняння (1.3): [$I_B=(E_K-U_{BE})/R_1= ((4,5 \text{ В}-0,5 \text{ В})/160 \text{ кОм})=25 \text{ мкА}$; $U_{BE}=0,5 \text{ В}$].

Точка перетину лінії 3 з характеристикою 2 є шуканою т. П на сімействі вхідних в.а.х. транзистора і дає значення $I_{БП}=27 \text{ мкА}$ і $U_{BEП}=0,38 \text{ В}$;

г) т. П перенесена на лінію навантаження 1 на сімействі вихідних в.а.х. транзистора на перетини цієї прямої із статичною в.а.х. транзистора, що відповідає струму $I_B=27$ мкА. На сімействі вихідних в.а.х. транзистора визначимо $I_{КП}=3$ мА, $U_{КЕП}=2,1$ В.

Приклад 2. Визначити координати т. П ($U_{КЕП}$, $U_{БЕП}$, $I_{КП}$, $I_{БП}$) для схеми підсилювача на біполярному транзисторі, що наведена на рис.1а; статичні вхідні і вихідні в.а.х. транзистора відомі і наведені на рис. 7; параметри всіх елементів схеми відомі: $E_K=4,5$ В; $R_K=820$ Ом; $R_1=130$ кОм; $R_2=62$ кОм.

Розв'язання.

У схемі на рис. 1а окрім чотирьох невідомих $U_{КЕП}$, $U_{БЕП}$, $I_{КП}$, $I_{БП}$, що визначають координати т. П, невідомий також струм в резисторі R_2 – струм I_D (тобто для визначення п'яти невідомих слід скласти і розв'язувати систему з п'яти рівнянь). Для того, щоб при розрахунках позбавитись струму I_D (відповідно зменшити кількість невідомих в схемі і кількість рівнянь в системі), є сенс застосувати теорему про еквівалентний генератор до частини схеми на рис. 1а, що задає базовий струм транзистора I_B (джерело живлення E_K і резистивний дільник напруги на R_1 , R_2). В результаті застосування теореми приходимо до робочої (розрахункової) схеми, наведеної на рис. 2б, яка відповідно до режиму роботи транзистору на постійному струму еквівалентна схемі на рис. 1а (в якій тільки чотири невідомих: $U_{КЕП}$, $U_{БЕП}$, $I_{КП}$, $I_{БП}$). Згідно теореми про еквівалентний генератор в схемі на рис. 2 $E_B=[E_K \cdot R_2 / (R_1 + R_2)] = 1,4$ В, $R_B = [R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)] = 43$ кОм.

Для робочої схеми на рис. 2б, як і в попередньому „Прикладі 1”, записано систему чотирьох рівнянь з чотирма невідомими:

$$E_K = U_{КЭ} + I_K \cdot R_K;$$

$$E_B = U_{БЕ} + I_B \cdot R_B;$$

$$I_K = \varphi(U_{КЕ}; I_B);$$

$$I_B = f(U_{БЕ}; U_{КЭ}).$$

Ця система подібна системі рівнянь (2)...(5) із попереднього приклада; розв'язання системи раціонально виконувати графоаналітичним методом (див. рис. 7). Порядок розв'язання такий же, як і в „Прикладі 1”.

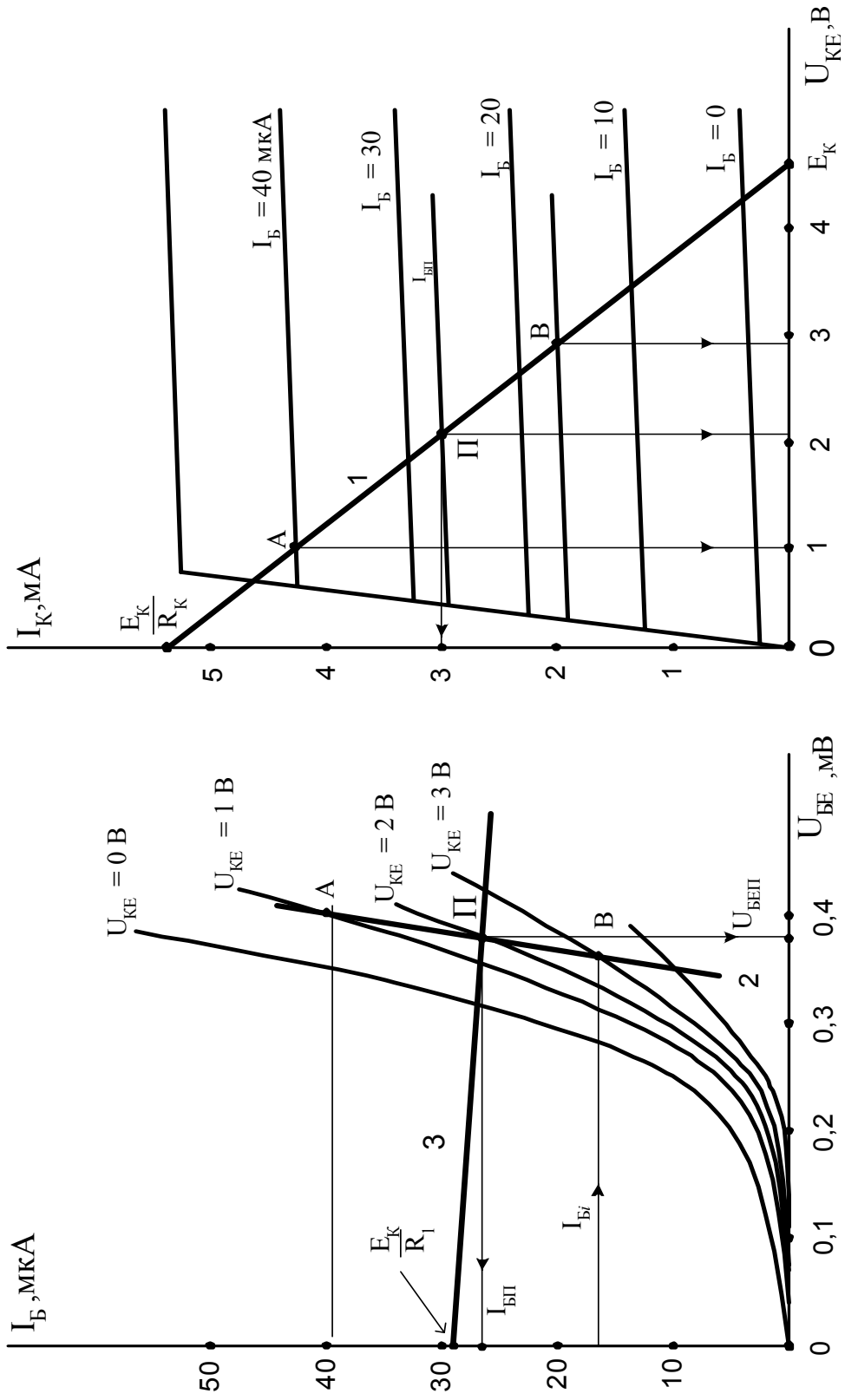


Рисунок 6 – До визначення точки спокою транзисторного підсилювального каскаду (приклад 1)

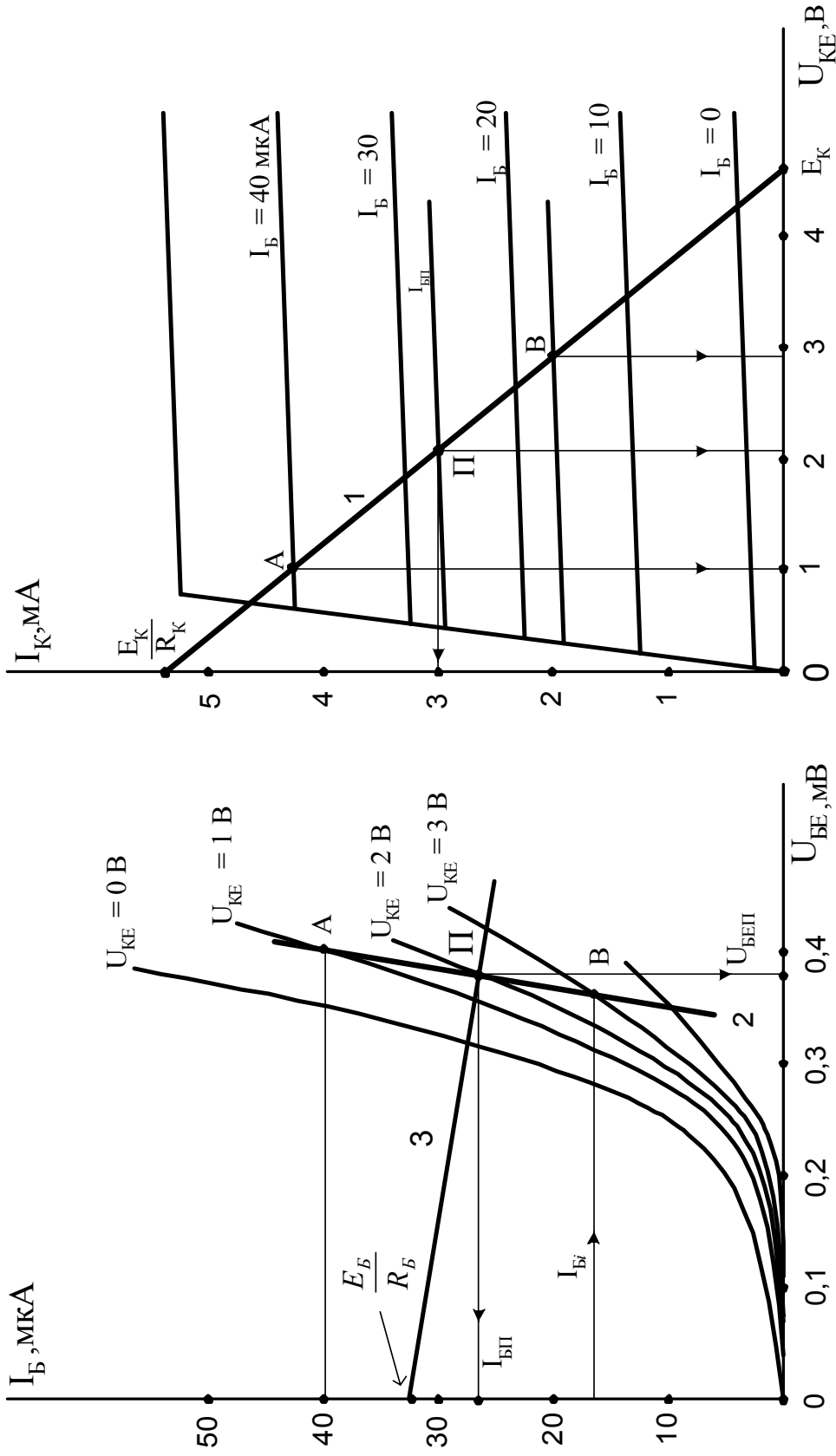


Рисунок 7 - До визначення точки спокою транзисторного підсилювального каскаду (приклад 2)

Приклад 3. Визначити координати т. П (U_{CB} , U_{3B} , I_C) в схемі підсилювача на польовому транзисторі (рис. 8); параметри всіх елементів схеми відомі: $E_C=12,6$ В; $R_C=1,3$ кОм; $R_B=470$ Ом; $R_3=2$ МОм; в.а.х. польового транзистора надані на рис. 9.

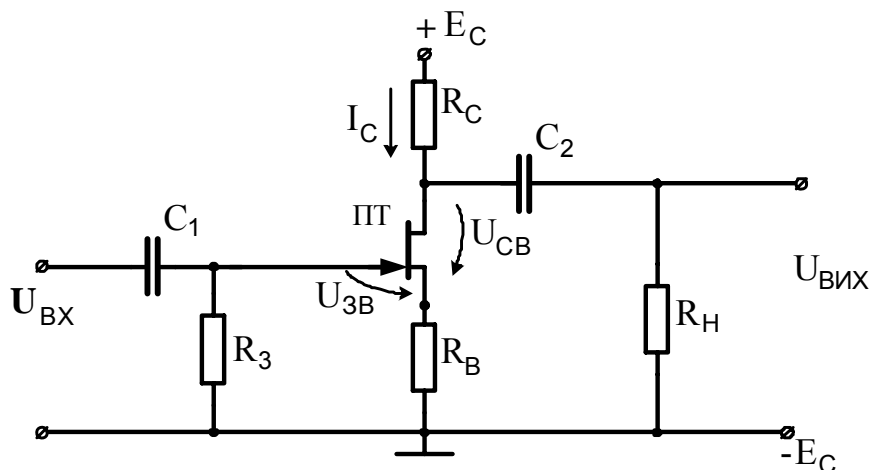


Рисунок 8 – Схема підсилювального каскаду на польовому транзисторі

Розв'язання.

Для визначення координат т. П записана система рівнянь для режиму роботи схеми за постійним струмом:

$$\begin{aligned} I_C(R_C+R_B)+U_{CB}&=E_C; \\ U_{3B}&=-I_C R_B; \\ I_C &=f(U_{CB}, U_{3B}). \end{aligned}$$

Перші два рівняння системи складені відповідно до другого закону Кирхгофа: перше - для контура в колі каналу транзистора (ПТ), друге – для контура в колі затвора. При складанні другого рівняння враховано, що затвор ПТ має негативний потенціал щодо витоків за рахунок падіння напруги на R_B від струму I_C (струм затвора $I_3=0$, падіння напруги $I_3 \cdot R_3 = 0$, $U_{3B} < 0$). Обидва рівняння – рівняння прямих ліній у відповідних системах координат. Третє рівняння є записом в символічному виді сімейства статичних вихідних в.а.х. ПТ.

Рішення системи графоаналітичним методом наведено на рис. 9. Порядок розв'язання наступний:

а) на сімействі статичних вихідних в.а.х. ПТ побудована лінія навантаження транзистора для постійного струму 1. Це пряма лінія, яку описує перше рівняння системи. Лінія побудована по двох крапках (див. п.1.1.2): ($I_C=0$; $U_{CB}=E_C=12,6$ В) і ($I_C=[E_C/(R_C+R_B)]=7,1$ мА; $U_{CB}=0$).

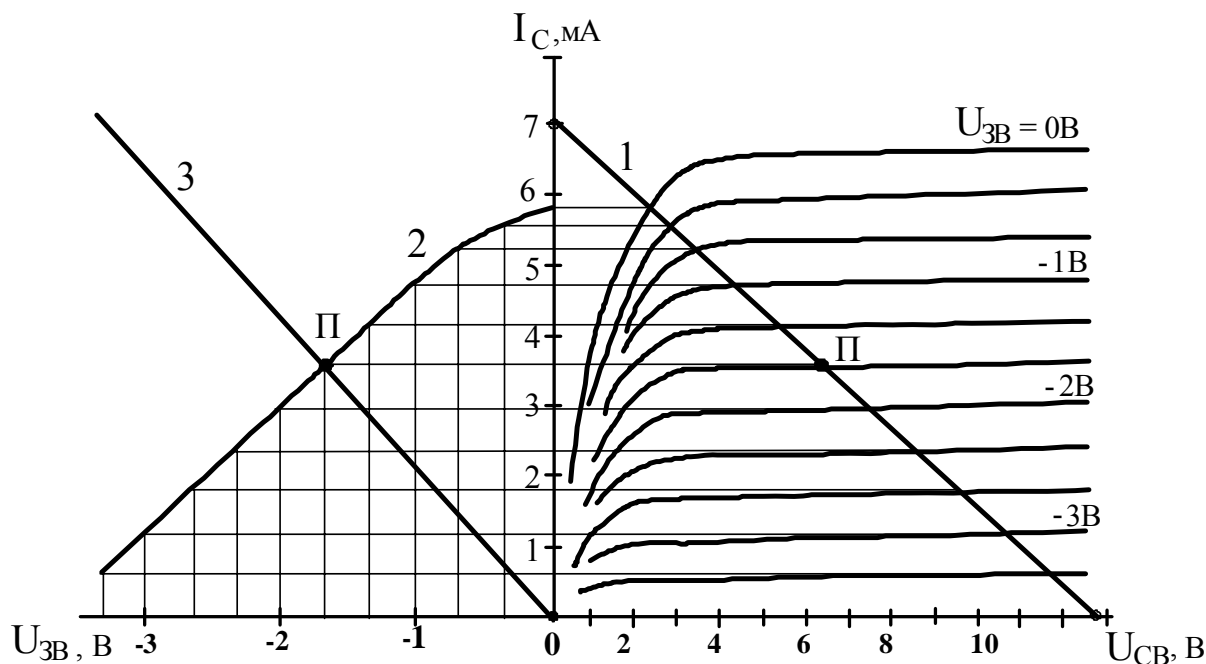


Рисунок 9 – До визначення координат т.П підсилювача на польовому транзисторі (приклад 3)

Шукана т. П повинна обов'язково лежати на лінії навантаження 1, оскільки її координати є сумісним рішенням всіх рівнянь системи;

б) в системі координат (I_C ; $U_{ЗВ}$) побудована прохідна характеристика 2 підсилювача – залежність струму I_C від напруги $U_{ЗВ}$ при заданих $E_C = \text{const}$ і $(R_C + R_B) = \text{const}$; для її побудови використані точки перетину лінії навантаження 1 із статичними вихідними в.а.х. транзистора;

в) в системі координат прохідної характеристики 2 із застосуванням другого рівняння системи побудована лінія (пряма) навантаження 3 вхідного кола ПТ по двох точках [координати однієї точки ($I_C = 0$, $U_{ЗВ} = 0$); координати другої слід вибрати з використанням другого рівняння системи при довільному значенні струму I_C (або напруги $U_{ЗВ}$) ПТ]. Точка перетину прохідної характеристики 2 і прямої навантаження 3 дає координати т. П: $U_{ЗВП} = -1,67$ В і $I_{СП} = 3,6$ мА;

г) т. П перенесена на вихідні в.а.х. транзистора на перетині прямої 1 із статичною в.а.х. ПТ, що відповідає $U_{ЗВП} = -1,67$ В; в цій точці $U_{СВП} = 6,3$ В.

1.3 Робочі характеристики для змінного струму

Лінії навантаження за постійним і змінним струмом навіть при активному опорі навантаження підсилювального каскаду можуть відрізнятися одна від одної через різний опір вихідного (або вхідного) кола для постійного і змінного струмів.

На рис. 10 наведено схему транзисторного підсилювача, у якого опір навантаження R_n підключений до виходу із застосуванням розділового кон-

денсатора C , а джерело вхідного сигналу $e_c(t)$ підключено до входу через узгоджуючий трансформатор Tr . За постійним струмом у вихідне коло транзистора включений опір R_K (вважаємо, що внутрішній опір джерела живлення E_K значно менше R_K), який визначає нахил лінії навантаження за постійним струмом. Опір колекторного кола транзистора для змінного струму визначається опори R_K , R_H і конденсатор C ; в загальному випадку цей опір є комплексним. При проектуванні підсилювача ємність розділового конденсатора C може бути вибрана достатньо великою, у всьому спектрі сигналу, що підсилюється, її опір змінному струму дорівнюватиметься 0 і впливом ємності C можна нехтувати. Тому опір колекторного кола для змінного струму буде дорівнювати $R_{K\sim} = R_K \cdot R_H / (R_K + R_H)$.

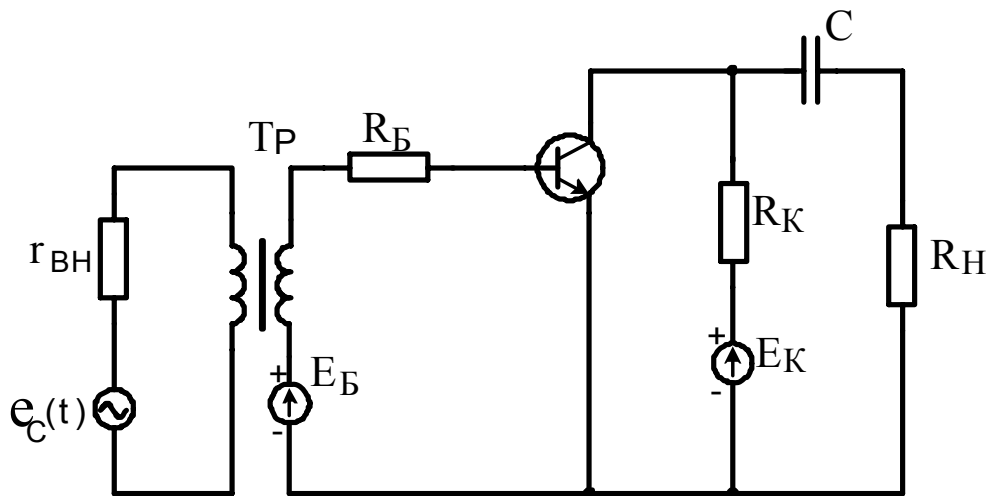


Рисунок 10 – Схема підсилювача для аналізу характеристик на змінному струмі

Таким чином, у аналізованій схемі опір колекторного кола транзистора для постійного струму більше, ніж опір для змінного струму, тобто $R_K > R_{K\sim}$.

У вхідному колі навпаки; опір для постійного струму дорівнює:

$$R_{BX} = R_B + r_2,$$

де r_2 – опір вторинної обмотки трансформатора Tr для постійного струму. Опір же для змінного струму у області середніх частот підсилюваного сигналу дорівнює:

$$R_{BX\sim} = R_B + r_2 + r'_{BH},$$

де $r'_{BH} = (r_{BH} + r_1) \cdot n_2$ – приведений до вторинної обмотки Tr опір первинного кола трансформатора; r_1 – опір первинної обмотки трансформатора; $n = w_2/w_1$ – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Таким чином, опір для змінного струму у вхідному колі перевищує опір для постійного струму: $R_{BX\sim} > R_{BX}$. Отже, залежно від схеми підсилювального каскаду опір кола змінному струму може бути більше, менше або дорівнювати опорю постійному струму.

Якщо вхідний сигнал схеми відсутній [$e_c(t)=0$], то в схемі течуть струми спокою: $I_{БП}$ і $I_{КП}$ в гілка транзистора. Їх можна визначити за характеристиками навантаження каскаду для постійного струму (розділ 1.2). Після подачі на вхід підсилювача змінного сигналу $e_c(t)$ в колекторному струмі і напрузі з'являться змінні складові, миттєві значення яких можна записати:

$$i_K(t) = I_{КП} + \Delta I_K(t); \quad u_{КЕ}(t) = U_{КЕП} + \Delta U_{КЕ}(t); \quad \Delta U_{КЕ}(t) = -\Delta I_K(t) \cdot R_{K\sim}.$$

Знак мінус в останньому рівнянні записано тому, що при зростанні струму I_K напруга $U_{КЕ}$ в даній схемі зменшується і навпаки. Таким чином, на підставі наведеного можна записати рівняння лінії навантаження вихідного кола транзистора для змінного струму:

$$\Delta I_K = -\Delta U_{КЕ}/R_{K\sim} \quad \text{або} \quad i_K - I_{КП} = (-1/R_{K\sim}) \cdot (u_{КЕ} - U_{КЕП}). \quad (1.6)$$

Графічно рівняння (1.6) на сімействі статичних вихідних в.а.х. транзистора відображається прямою лінією, що проходить через т. П з координатами $(I_{КП}; U_{КЕП})$; нахил цієї прямої визначається опором $R_{K\sim}$. По точках перетину лінії навантаження для змінного струму із статичними вихідними характеристиками транзистора можна побудувати перехідну характеристику підсилювача для змінного струму (аналогічно побудові характеристики для постійного струму на рис. 4). Відповідно описаної вище побудові робочої вхідної характеристики для постійного струму (рис. 5) можна побудувати робочу вхідну характеристику підсилювача для змінного струму, використовуючи для цього лінію навантаження колекторного кола транзистора для змінного струму.

Лінія навантаження для змінного струму для вхідного кола транзистора в схемі рис. 10 є прямою лінією, що проходить через т. П з координатами $(I_{БП}; U_{БЕП})$ на сімействі вхідних характеристик транзистора; її нахил визначає опір $R_{BX\sim}$. Оскільки в аналізованій схемі $R_{BX\sim} > R_{BX}$, то лінія навантаження для змінного струму пройде пологіше, ніж лінія навантаження для постійного струму.

2 ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧОГО РЕЖИМУ

Аналіз і розрахунок підсилювальних каскадів ведеться по вихідній, перехідній і вхідній робочих характеристиках. Вид характеристик для транзисторних і лампових схем схожий. Відмінність полягає у тому, що для схем на польових транзисторах і вакуумних приладах робоча вхідна характеристика не будується, оскільки в більшості випадків вони працюють в режимі відсутності струму електроду, що керує.

2.1 Вибір точки спокою підсилювального каскаду

При роботі підсилювального каскаду в режимі „класу А” т. П зазвичай обирається приблизно на середині ділянки лінії навантаження для змінного струму, що використовується. Струм вихідного електроду підсилювального (активного) елемента електронного кола протікає протягом всього періоду зміни вхідного сигналу. Причому, т. П обирається так, щоб приріст струму вихідного електроду (ΔI) і приріст напруги на ньому були лінійно пов'язані із змінами вхідного сигналу, що керує. При виборі т. П слід пам'ятати, що використовується область вихідних характеристик підсилювального (активного) елемента обмежена, з одного боку, значеннями струмів, напруг і потужності розсіювання вихідного електроду, що припускаються, і з другого боку – тими малими значеннями струмів і напруг, де характеристики стають істотно нелінійними.

На рис. 11 на сімействі вихідних (колекторних) в.а.х. біполярного транзистора побудована лінія навантаження для постійного струму (лінія 1), обрана робоча точка (т. П), через яку проведена лінія навантаження для змінного струму (пряма 2). На ній визначена використовувана область вихідних характеристик транзистора при роботі схеми в режимі „класу А”, що обмежена максимальними (U_{KEmax} і I_{Kmax}) і мінімальними (U_{KEmin} і I_{Kmin}) значеннями вихідної напруги і струму.

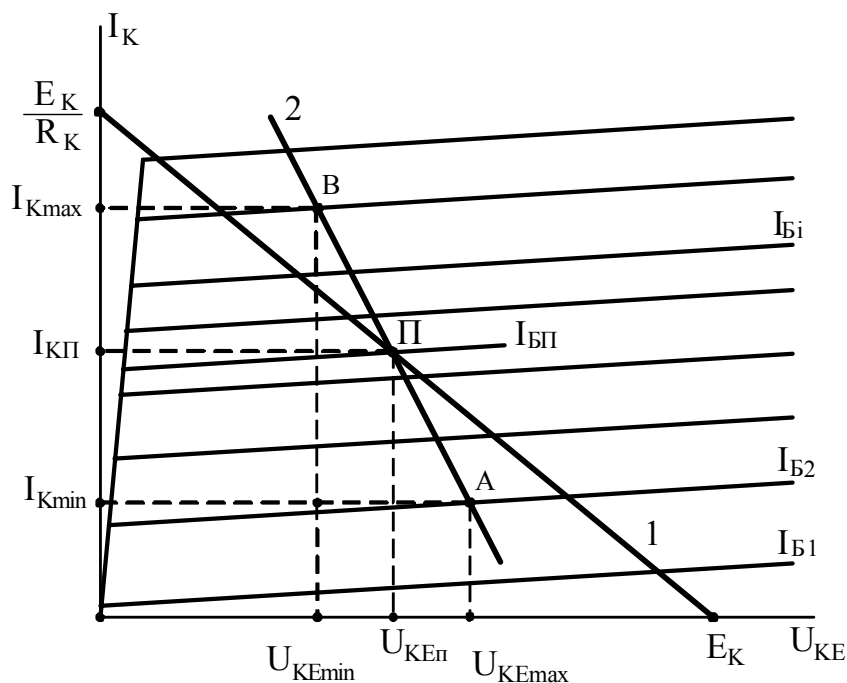


Рисунок 11 – До вибору точки спокою підсилювального каскада

2.2 Визначення вихідного опору підсилювального каскаду

Підсилювальний каскад щодо опору навантаження R_H може розглядатися як активний двополюсник. Його вихідний опір в наближенні змінної складової сигналу при будь-якій схемі включення підсилювального елемента (біполярного або польового транзистора, вакуумного триода, ...) може бути визначений:

$$R_{ВИХ} = (R_{ВИХ}^I \cdot R_E) / (R_{ВИХ}^I + R_E), \quad (2.1)$$

де R_E – опір резистора, що включений в коло вихідного електроду підсилювального (активного) елемента схеми (без урахування опору навантаження підсилювального каскаду R_H); $R_{ВИХ}^I$ – вихідний опір активного елемента в схемі підсилювального каскада (див. далі приклади 4 і 5).

Відомий спосіб визначення вихідного опору двополюсника в робочій точці по приростах його вихідної напруги і струму. Суть способу зводиться до наступного: задається прийнятний приріст вихідної напруги двополюсника ΔU щодо координати точки спокою; визначається (розраховується або вимірюється) відповідний приріст вихідного струму ΔI ; визначається вихідний опір двополюсника в робочій точці:

$$R_{ВИХ} = \Delta U / \Delta I. \quad (2.2)$$

Вихідний опір $R_{ВИХ}'$ доцільно визначати у графоаналітичний спосіб на сімействі статичних в.а.х. підсилювального елемента схеми. Задаючи на сімействі вихідних в.а.х. приріст вихідної напруга підсилювального елемента ΔU щодо координати точки спокою, шляхом графічних побудов визначають приріст (щодо координати точки спокою) вихідного струму ΔI підсилювального елемента схеми; $R_{ВИХ}'$ розраховують, використовуючи вираз (2.2).

За відсутності зворотного зв'язку в схемі приріст вихідного струму ΔI визначається по точках вихідної статичної в.а.х. підсилювального елемента схеми, що відповідає режиму спокою (тобто $I_{БП}$, або $U_{ЗВП}$, або $U_{СКП}$). При цьому опір $R_{ВИХ}'$ співпадає із значенням внутрішнього (динамічного) опору підсилювального елемента (R_i або $1/h_{22}$), який визначає нахил відповідної статичної в.а.х. елемента. Це має місце в каскадах, де координати т.П встановлюються за допомогою схеми (джерела) з дуже великим внутрішнім опором, яка забезпечує $I_{Б} = \text{const}$, або $U_{ЗВ} = \text{const}$, або $U_{СК} = \text{const}$.

У загальному випадку, коли зворотний зв'язок в схемі є (наприклад, внутрішній, що властивий самому біполярному транзистору, або зовнішній, що, наприклад, вводиться включенням резистора в коло емітера, виток або котода) і внутрішній опір схеми (джерела), що підключається до вхідної гілки підсилювального елемента і забезпечує обраний режим спокою, скінче-

ний, то $R'_{ВІХ}$ не дорівнює R_i або $1/h_{22}$. За наявності в схемі зворотного зв'язку приріст вихідного струму ΔI в робочій точці слід визначати по двох статичних вихідних в.а.х. підсилювального елемента, одна з яких відповідає режиму спокою, а друга - обраному приросту вихідної напруги ΔU (див. приклади 4 і 5).

Приклад 4. Визначити $R'_{ВІХ}$ і $R_{ВІХ}$ транзисторного підсилювача, схема якого наведена на рис. 1а. Режим спокою визначений і характеризується наступними значеннями: $U_{КЕП}=6$ В; $I_{КП}=9,4$ мА; $I_{БП}=150$ мкА (див. рис. 13). Відомі $E_K=12$ В; $R_1=47$ кОм; $R_2=11$ кОм; $R_K=600$ Ом; $R_{И}=1$ кОм.

Розв'язання:

а) робоча (розрахункова) схема для визначення $R'_{ВІХ}$ і $R_{ВІХ}$ транзисторного підсилювального каскад наведена на рис. 12. Тут вихідний опір транзистора, включеного в схему підсилювального каскада, позначено як $R'_{ВІХ}$; резистор R_K визначає резистор R_E в формулі (2.1). Опір розділового конденсатора C_1 на частоті інформаційного сигналу прийнятий таким, що дорівнює нулю (це можна забезпечити вибором конденсатора C_1 відповідної ємності);

б) на сімействі статичних вихідних в.а.х. транзистора (рис. 13) побудована лінія навантаження для постійного струму (пряма MN) і на ній вказана т.П. Точка спокою перенесена на статичні вхідні в.а.х. транзистора і через неї проведена лінія навантаження вхідного кола для змінного струму (пряма ab).

Якщо інформаційний сигнал до входу підсилювача подається від джерела струму з нескінченим внутрішнім опором ($R_{И} \rightarrow \infty$), то нахил лінії навантаження визначає опір $R_B = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2) = 8,9$ кОм. В досліджуваній схемі до входу підсилювача підключено джерело сигналу з кінцевим внутрішнім опором $R_{И}=1$ кОм; тому нахил лінії навантаження „ab” (тобто кут γ на рис. 13) визначає еквівалентний опір $R'_B = R_B \cdot R_{И} / (R_B + R_{И}) = 0,9$ кОм;

в) на статичних вихідних в.а.х. транзистора обраний приріст вихідної напруги транзистора від $U_{КЕП}=6$ В у сторону менших значень (до $U_{КЕ}=2$ В); тобто $\Delta U = \Delta U_{КЕ} = (6 - 2)$ В = 4 В. По точках перетину лінії навантаження „ab” із статичними вхідними в.а.х. транзистора для $U_{КЕ}=6$ В і $U_{КЕ}=2$ В визначено, що струм бази при цьому зростає від $I_{БП}=150$ мкА до $I_{Б1}=160$ мкА (точка 1).

Точка 1 перенесена на вихідні статичні в.а.х. транзистора (на перетині вертикальної лінії $U_{КЕ}=2$ В із статичною в.а.х., що відповідає $I_{Б1}=160$ мкА) і за координатами т. П і т. 1 визначено приріст вихідного струму транзистора: $\Delta I_K = \Delta I = I_{КП} - I_{К1} = (9,4 - 8,5)$ мА = +0,9 мА при $\Delta U_{КЕ} = +4$ В. Таким чином, вихідний опір $R'_{ВІХ}$ дорівнює: $R'_{ВІХ} = \Delta U / \Delta I = \Delta U_{КЕ} / \Delta I_K = 4$ В / 0,9 ма = 4,4 кОм;

г) повний вихідний опір підсилювача з урахуванням $R_K=600$ Ом складе:

$$R_{ВІХ} = (R'_{ВІХ} \cdot R_K) / (R'_{ВІХ} + R_K) = 0,53 \text{ кОм при } R_{И}=1 \text{ кОм};$$

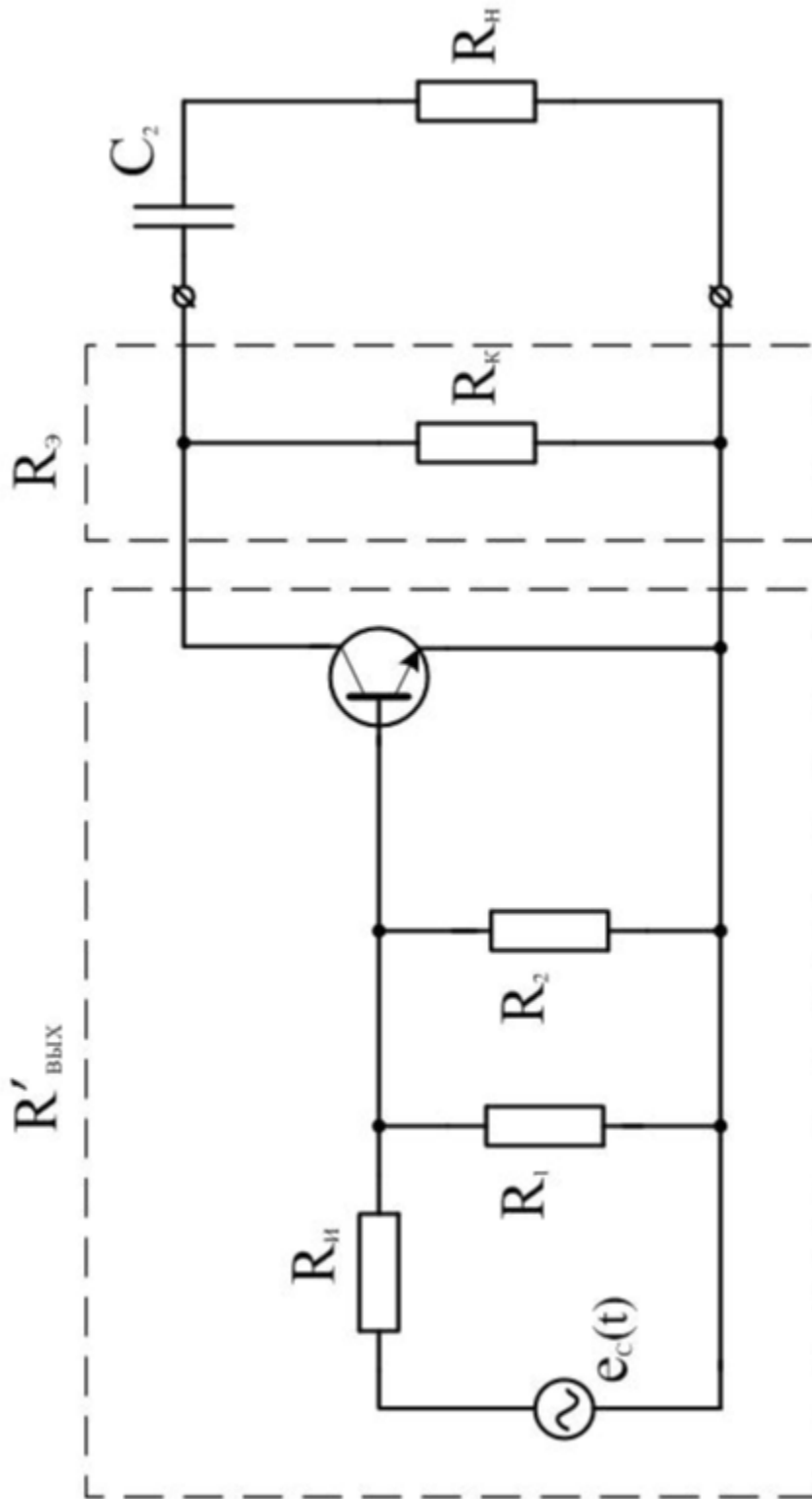


Рисунок 12 – Робоча (розрахункова) схема для визначення вихідного опору транзисторного підсилювального каскада (приклад 4)

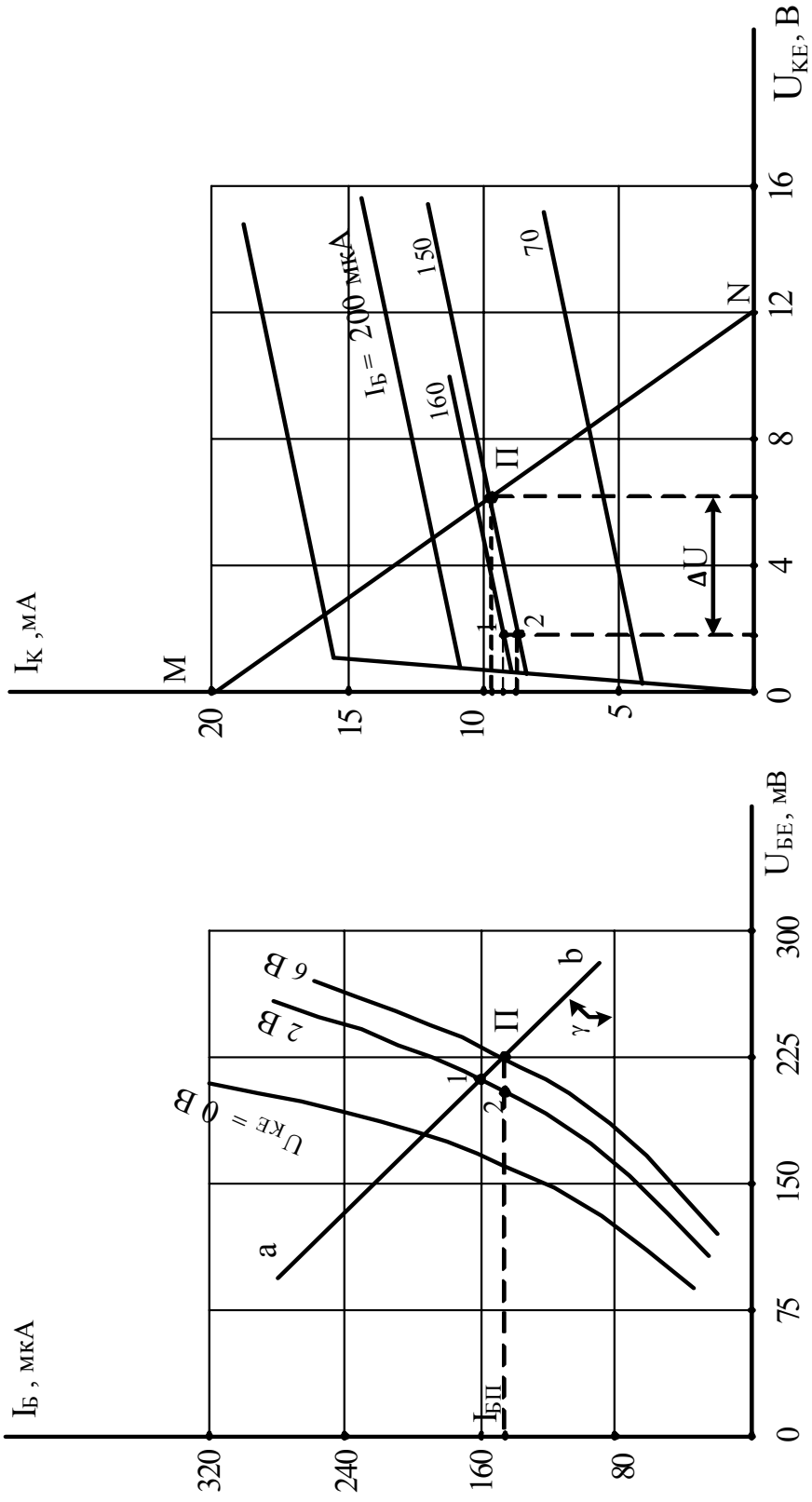


Рисунок 13 – До визначення вихідного опору транзисторного підсилювача (приклад 4: $I_{КП} = 9,4$ mA; $I_{К1} = 8,5$ mA; $I_{К2} = 7,8$ mA)

д) зазначимо, що при $R'_B \rightarrow \infty$ лінія навантаження вхідного кола транзистора буде паралельна вісі U_{BE} ; при виборі приросту $\Delta U = \Delta U_{KE} = (6-2) \text{ В} = 4 \text{ В}$ робоча точка на сімействі вхідних в.а.х. переміститься по цій лінії навантаження з т. П в т. 2, забезпечивши при цьому $\Delta I_B = 0$. Координати т. 2 на вихідних в.а.х. будуть: $I_{B2} = I_{BP} = 150 \text{ мкА}$, $U_{KE2} = 2 \text{ В}$, $I_{K2} = 7,8 \text{ мА}$. При цьому:

$$\Delta I = \Delta I_K = I_{KP} - I_{K2} = (9,4 - 7,8) \text{ мА} = 1,6 \text{ мА};$$

$$R'_{ВИХ} = \Delta U_{KE} / \Delta I_K = 4 \text{ В} / 1,6 \text{ мА} = 2,5 \text{ кОм};$$

$$R_{ВИХ} = (R'_{ВИХ} \cdot R_K) / (R'_{ВИХ} + R_K) = 0,48 \text{ кОм}.$$

Приклад 5. Визначити вихідний опір підсилювального каскаду на вакуумному тріоді з негативним зворотним зв'язком за струмом (рис.14) в точці спокою. Відомі: тип (в.а.х.) тріода; $E_a = 300 \text{ В}$; $R_a = 15 \text{ кОм}$; $R_K = 330 \text{ Ом}$.

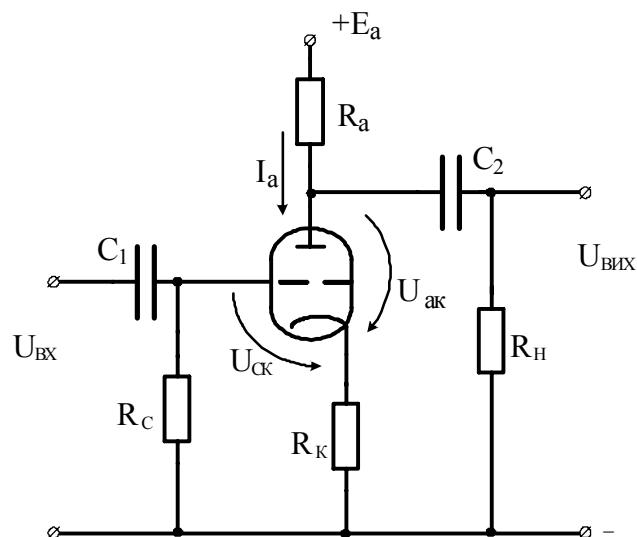


Рисунок 14 – Схема підсилювального каскаду на вакуумному тріоді з негативним зворотним зв'язком

Розв'язання.

Спочатку визначені координати т. П, потім - вихідний опір підсилювального каскаду.

а) Для визначення координат т. П ($I_{aП}$, $U_{акП}$, $U_{скП}$) записана система трьох рівнянь, що містить шукані невідомі (струм сітки тріода $I_C = 0$):

$$E_a = I_a \cdot (R_a + R_K) + U_{ак},$$

$$U_{ак} = f(I_a, U_{ск}),$$

$$U_{ск} = - I_a \cdot R_K.$$

Друге рівняння системи представлено графічно на рис. 15 у вигляді статичних в.а.х. вакуумного триода. Рішення системи виконано у графоаналітичний спосіб. Для цього:

- на сімействі статичних вихідних в.а.х. триода побудована лінія навантаження для постійного струму – лінія MN;
- по точках перетину лінії MN з в.а.х. триода побудована прохідна характеристика схеми (лінія «А» на рис. 15) – залежність $I_a=f(U_{СК})$ для $E_a=300$ В, $R_a=15$ кОм, $R_k=330$ Ом;
- в системі координат прохідної характеристики схеми, використовуючи третє рівняння системи, побудована лінія навантаження вхідного кола триода – пряма «В» на рис. 15;
- точка перетину лінії навантаження «В» з прохідною характеристикою «А» є т. П з координатами $U_{СК}=-2$ В; $I_{ап}=6$ мА; $U_{акп}=210$ В.

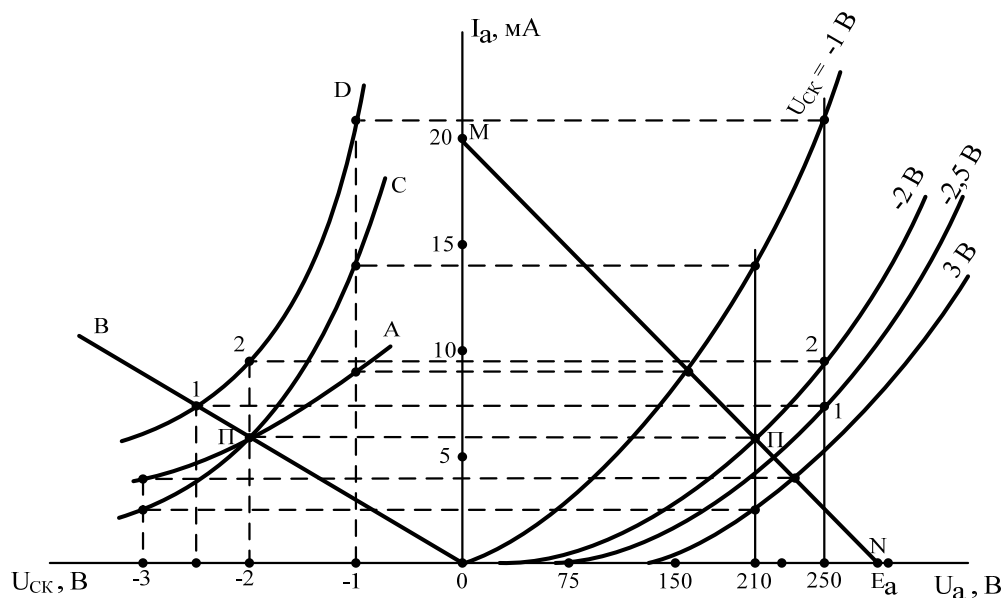


Рисунок 15 – До визначення координат т. П і вихідного опору підсилювача на вакуумному триоді
(Приклад 5: $I_{ап} = 6$ мА; $I_{a1} = 7,4$ мА; $I_{a2} = 9,4$ мА)

б) Вихідний опір схеми визначено за формулою (2.1):

$$R_{ВИХ} = (R'_{ВИХ} \cdot R_a) / (R'_{ВИХ} + R_a), \text{ де } R_E = R_a.$$

$R'_{ВИХ}$ визначено у описаний вище спосіб по приростах напруги $\Delta U_{ак}$ і струму ΔI_a в т. П. Для цього:

- побудована характеристика $I_a=f(U_{CK})$ при $U_{акп}=210$ В і $R_a=0$ – лінія «С» на рис. 15;
- прийнято приріст вихідної напруги тріода $\Delta U_{ак}=+40$ В відносно $U_{акп}=210$ В і побудована характеристика $I_a=f(U_{CK})$ при $U_{ак}=(210+40)$ В=250 В і $R_a=0$ – лінія «D» на рис. 15;
- по точках перетину лінії навантаження «В» з лініями «С» (т. П) і «D» (т. 1) визначений приріст анодного струму тріода $\Delta I_a=I_{a1}-I_{ап}=(7,4-6)$ мА=1,4 мА, що відповідає приросту $\Delta U_{ак}=+40$ В щодо режиму спокою;
- визначено $R'_{ВІХ}=40$ В/1,4 мА=28,6 кОм, $R_{ВІХ}=28,6 \cdot 15 / (28,6+15)=9,8$ (кОм).

За відсутності в схемі зворотного зв'язку, коли $R_k=0$, а напруга $U_{CK}=-2$ В=const створюється якимсь допоміжним джерелом, підключеним в коло сітки, при визначенні опору $R'_{ВІХ}$ не треба будувати лінії «С» і «D»; можна одразу по статичній в.а.х. тріода для $U_{CK}=-2$ В визначити, що приросту анодної напруги від $U_{акп}=210$ В до $U_{ак}=250$ В ($\Delta U_{ак}=+40$ В) відповідає приріст анодного струму $\Delta I_a=(I_{a2}-I_{ап})=(9,4-6)$ мА=3,4 мА; при цьому $R'_{ВІХ}=40$ В/3,4 мА=11,8 кОм, т.е. менше, ніж за наявності зворотного зв'язку.

2.3 Визначення коефіцієнтів передачі, вхідного опору

2.3.1. Для визначення коефіцієнтів передачі схеми за напругою або струмом необхідно виразити вхідну напругу (U_{CK} , $U_{ЗВ}$) або вхідний струм (I_B), що керують, через е.р.с. джерела вхідного сигналу $e_c(t)$. Для підсилювальних каскадів на польових транзисторах і вакуумних тріодах зручно визначити коефіцієнт передачі з напруги, оскільки напруга U_{CK} чи $U_{ЗВ}$, що керує, або співпадає з вхідною напругою, або може бути легко виражена через е.р.с. джерела вхідного сигналу. Зміні напруги, що керує, відповідає переміщення робочої точки уздовж лінії навантаження вихідного кола для змінного струму. Задавши приріст вхідного сигналу $\Delta U_{ВХ}$ або Δe_c , можна знайти відповідний приріст вихідної напруги ΔU і визначити коефіцієнт передачі з напруги:

$$K_U = \Delta U / \Delta U_{ВХ} \quad \text{або} \quad K_E = \Delta U / \Delta e_c.$$

Для транзисторних схем зручніше визначити коефіцієнт передачі зі струму K_I , оскільки саме вхідний струм є параметром на сімействі вихідних в.а.х. транзистора. Для визначення K_I слід задати приріст вхідного струму $\Delta I_{ВХ}$, визначити по характеристиках відповідний приріст вихідного струму ΔI і обчислити

$$K_I = \Delta I / \Delta I_{ВХ}.$$

При цьому слід розрізняти:

а) коефіцієнт передачі зі струму транзистора в схемі підсилювача

$$K_{I,TP} = \Delta I_K / \Delta I_{BX,TP},$$

б) коефіцієнт передачі зі струму підсилювача

$$K_I = \Delta I_H / \Delta I_{BX}.$$

Різницю між коефіцієнтами K_I і $K_{I,TP}$ розглянемо на прикладі схеми підсилювача на рис. 16, де транзистор працює у включенні зі спільним емітером.

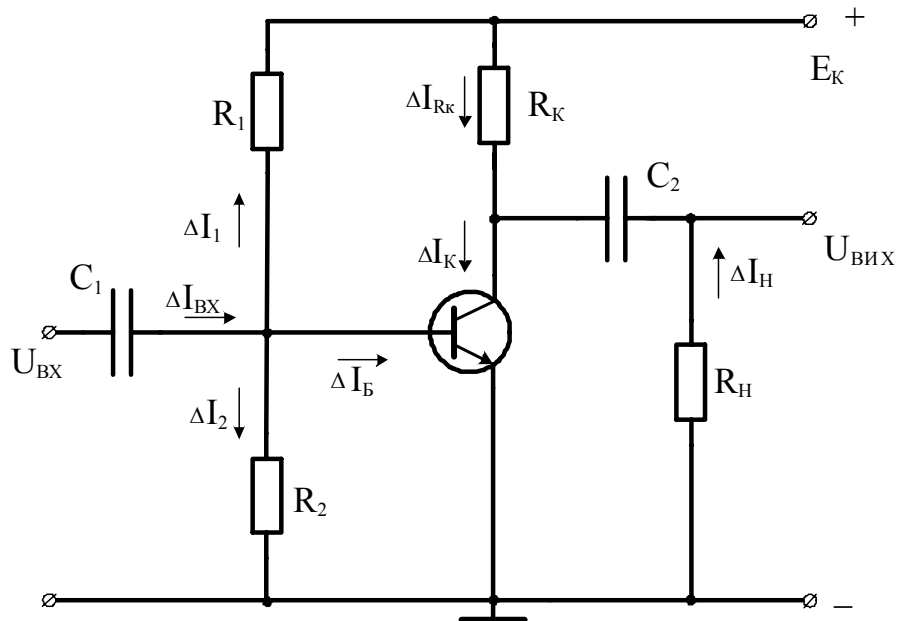


Рисунок 16 – До визначення вхідного опору і коефіцієнтів посилення транзисторного підсилювача за схемою із СЕ

Для вхідного кола схеми можна записати, що:

$$\Delta I_{BX} = \Delta I_B + \Delta I_1 + \Delta I_2 = \Delta I_B + \Delta U_{BE}/R_1 + \Delta U_{BE}/R_2, \text{ тобто } \Delta I_{BX} \neq \Delta I_{BX,TP} = \Delta I_B$$

Для вихідного кола:

$$\Delta I_H = \Delta U_{KE}/R_H = \Delta I_K \cdot R_{EK} / R_H, \text{ де } R_{EK} = R_K \cdot R_H / (R_K + R_H), \text{ тобто } \Delta I_K \neq \Delta I_H.$$

2.3.2. Для визначення вхідного опору підсилювача слід задати приріст ΔU_{BX} вхідній напрузі, визначити відповідний приріст вхідного струму ΔI_{BX} і розрахувати вхідний опір $R_{BX} = \Delta U_{BX} / \Delta I_{BX}$.

2.3.3. У загальному випадку визначення K_I , K_U і R_{BX} транзисторного підсилювального каскаду в лінійному (малосигнальному) режимі в т. П може бути ускладнено нелінійністю його робочої вхідної характеристики. Трудно-

щі, що виникають в наслідок цього, можна легко подолати шляхом лінеаризації робочої характеристики: треба провести дотичну до неї в т. П, як це зроблено на рис. 17.

Приклад 6. Визначити коефіцієнти передачі K_I , K_U , K_E і вхідний опір транзисторного підсилювача, схема якого наведена на рис. 16. Для підсилювача в системі координат статичних вихідних в.а.х. транзистора побудована лінія навантаження MN для змінного струму (рис. 17), яка проходить через т. П з координатами $I_{БП}=40$ мкА, $I_{КП}=3$ мА, $U_{КЕП}=6,2$ В ($R_1=68$ кОм, $R_2=1$ кОм, $R_K=3,9$ кОм, $R_H=13$ кОм). Також, в системі координат статичних вхідних в.а.х. транзистора побудована робоча вхідна характеристика (лінія 1) з використанням лінії навантаження MN.

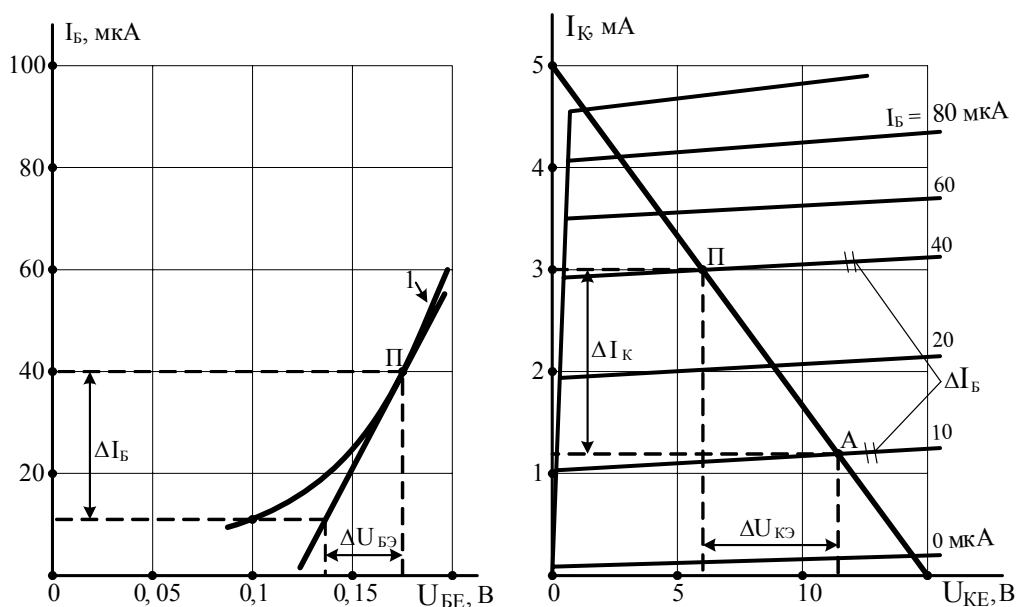


Рисунок 17 – До розрахунку характеристик підсилювача на БПТ (Приклад 6)

Розв'язання:

а) хай вхідний струм підсилювача $I_{ВХ}$ одержав приріст $\Delta I_{ВХ}$ і робоча точка відповідно до цього перемістилася по лінії навантаження MN із т. П ($I_{БП}=40$ мкА, $I_{КП}=3$ мА, $U_{КЕП}=6,2$ В) в т. А ($I_{БА}=10$ мкА, $I_{КА}=1,2$ мА, $U_{КЕА}=11,4$ В). Таким чином, приросту вхідного струму транзистора $\Delta I_B = I_{БП} - I_{БА} = (40 - 10)$ мкА = +30 мкА відповідає приріст струму колектора $\Delta I_K = I_{КП} - I_{КА} = (3 - 1,2)$ мА = +1,8 мА. Тобто $K_{I,TP} = \Delta I_K / \Delta I_B = 1,8$ мА / 30 мкА = 60;

б) т. П перенесена на вхідні в.а.х. транзистора (на робочу вхідну характеристику 1); через т. П проведена дотична до робочої характеристики 1, визначено приріст напруги $\Delta U_{BE} = U_{BEП} - U_{BEА} = (0,175 - 0,138)$ В = 0,037 В, що відповідає приросту струму $\Delta I_B = +30$ мкА, розраховано вхідний опір транзистора в схемі підсилювача:

$$R_{ВХ,TP} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B = 0,037 \text{ В} / 0,03 \text{ мА} = 1,2 \text{ кОм.}$$

Вхідний опір підсилювача в малосигнальному режимі для схеми на рис. 16 визначається паралельним включенням опорів $R_{\text{ВХ.ТР}}$, R_1 і R_2 :

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ.ТР}} \parallel R_1 \parallel R_2.$$

в) відповідно до прийнятого приросту $\Delta I_{\text{Б}} = 30 \text{ мкА}$ і визначеного приросту $\Delta U_{\text{БЕ}} = 0,037 \text{ В}$, розраховано:

- приріст вхідного струму підсилювача: $\Delta I_{\text{ВХ}} = \Delta I_{\text{Б}} + \Delta I_1 + \Delta I_2 =$
 $= \Delta I_{\text{Б}} + \Delta U_{\text{БЕ}}/R_1 + \Delta U_{\text{БЕ}}/R_2 = 30 \text{ мкА} + 0,037 \text{ В}/68 \text{ кОм} + 0,037 \text{ В}/1 \text{ кОм} = 67,5 \text{ мкА}$,
 де $\Delta I_{\text{Б}} = \Delta I_{\text{ВХ.ТР}}$;

- приріст струму в опорі навантаження підсилювача: $\Delta I_{\text{Н}} = \Delta U_{\text{КЕ}}/R_{\text{Н}} =$
 $= U_{\text{КЕП}} - U_{\text{КЕА}} = (6,2 \text{ В} - 11,4 \text{ В})/13 \text{ кОм} = -5,2 \text{ В}/13 \text{ кОм} = -0,4 \text{ мА}$;

- коефіцієнт передачі каскаду зі струму:

$$K_{\text{I}} = \Delta I_{\text{Н}}/\Delta I_{\text{ВХ}} = -0,4 \text{ мА}/67,5 \text{ мкА} = -5,9;$$

г) відповідно визначених приростів $\Delta U_{\text{БЕ}} = 0,037 \text{ В}$ і $\Delta U_{\text{КЕ}} = -5,2 \text{ В}$, розраховано коефіцієнт передачі каскаду з напруги щодо його вхідних зажимів:

$$K_{\text{U}} = \Delta U_{\text{КЕ}}/\Delta U_{\text{БЕ}} = -5,2 \text{ В}/0,037 \text{ В} = -140,5;$$

д) коефіцієнт передачі підсилювача $K_{\text{Е}}$ відносно е.р.с. джерела вхідного сигналу з урахуванням внутрішнього опору $R_{\text{И}}$ джерела сигналу можна визначити, скориставшись еквівалентною схемою вхідного кола підсилювача для змінних складових струму (рис. 18):

$$K_{\text{Е}} = K_{\text{ВХ}} \cdot K_{\text{U}}, \quad \text{де } K_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}}/(R_{\text{ВХ}} + R_{\text{И}}).$$

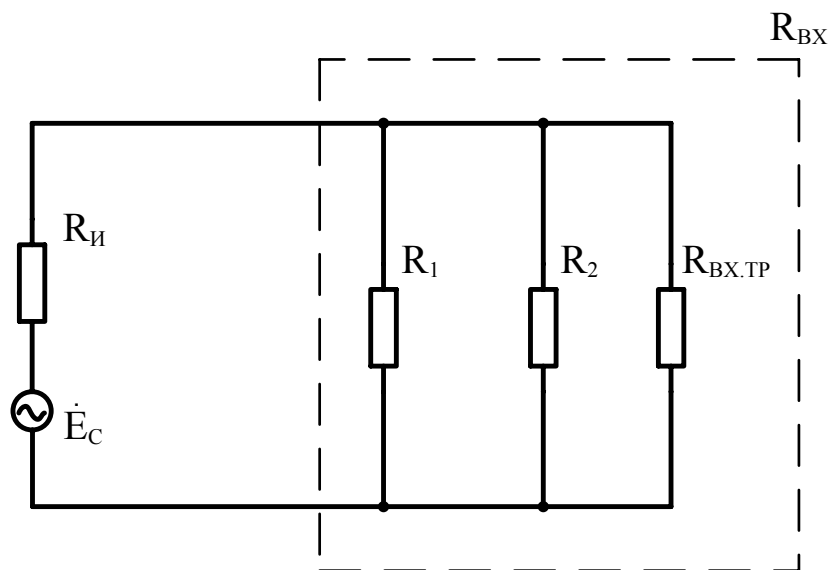


Рисунок 18 – Еквівалентна схема вхідного кола підсилювача

ВИСНОВКИ

1 Підсилювач, що працює в лінійному режимі, на основі результатів аналізу може бути представлений у області середніх частот стандартним чотириполюсником (рис. 19). Тут: K_X – коефіцієнт передачі підсилювача з напруги в режимі холостого ходу (тобто при $R_H \rightarrow \infty$); $R_{ВХ}$ і $R_{ВІХ}$ – вхідний і вихідний опори підсилювача, відповідно.

Примітка: при визначенні коефіцієнта K_X лінія навантаження для змінного струму в системі координат статичних вихідних в.а.х. транзистора будуватиметься (розділ 1.3) за умови $R_H \rightarrow \infty$.

2 Після визначення K_X можна розрахувати (уточнити) вихідний опір підсилювального каскаду:

$$R_{ВІХ} = (U_X - U_{ВІХ}) / I_H = (U_{ВХ} \cdot K_X - U_{ВХ} \cdot K_U) / (U_{ВХ} \cdot K_U) / R_H,$$

$$R_{ВІХ} = R_H \cdot (K_X - K_U) / K_U,$$

де U_X і $U_{ВІХ}$ – вихідна напруга ненавантаженого і навантаженого підсилювача при $U_{ВХ} = \text{const}$.

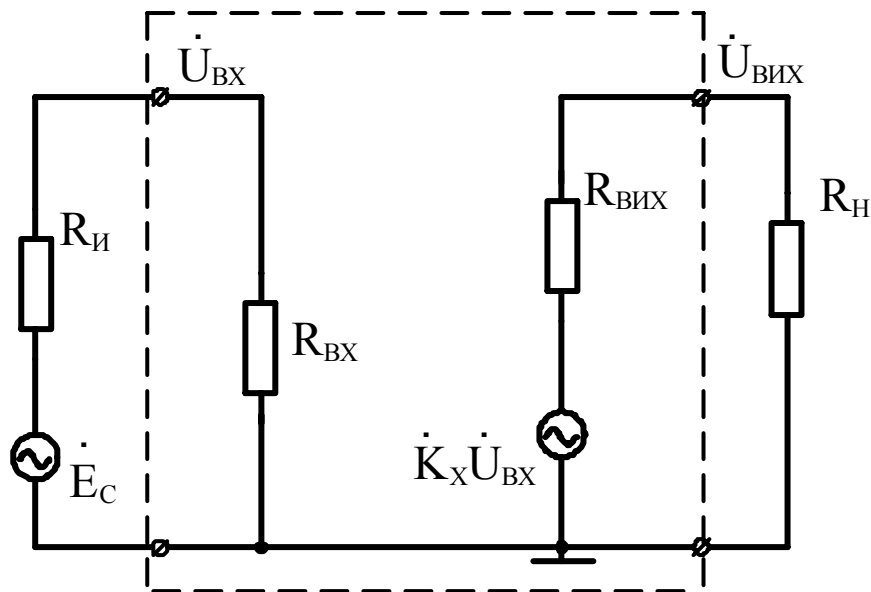


Рисунок 19 – Представлення підсилювального каскаду стандартним чотириполюсником

ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ

1 У курсовій роботі необхідно виконати:

1.1 Вибрати режим роботи за постійним струмом підсилювального каскаду (схема на рис. 1а) - т. П; розрахувати параметри елементів схеми, що визначають режим роботи за постійним струмом; провести уточнення координат т. П; визначити h-параметри транзистора у обраній точці спокою.

1.2 Визначити графоаналітичним методом вихідні опори каскаду ($R'_{вих}$ і $R_{вих}$).

1.3 Визначити графоаналітичним методом вторинні вихідних параметрів підсилювального каскаду: $K_{I,TP}$, K_I , K_U , K_X , K_E , $R_{BX,TP}$, R_{BX} , $R_{вих}$ (використовуючи K_U і K_X ; порівняти з результатами р.2.2). Представити підсилювач стандартним чотиріполюсником із вказівкою його параметрів.

1.4 Скласти матрицю електричного опору схеми на основі лінійної моделі транзистора в h-параметрах (прийняти $h_{12E}=0$); визначити вторинні вихідні параметри підсилювача K_I , K_U , K_X , R_{BX} , $R_{вих}$, $E_{ЕКВ}$ шляхом використання матриці опору.

1.5 Представити схему підсилювача стандартним чотиріполюсником з виділенням в ній простих чотиріполюсників; визначити матриці параметрів простих чотиріполюсників, що входять до складу еквівалентного; визначити матрицю параметрів еквівалентного чотиріполюсника на основі матриць параметрів простих чотиріполюсників; визначити вторинні вихідні параметри підсилювача: K_I , K_U , K_X , R_{BX} , $R_{вих}$ шляхом використання матриці параметрів еквівалентного чотиріполюсника (порівняти результати для 2-х варіантів розрахунку: $h_{12E}=0$ і $h_{12E}\neq 0$).

1.6 Побудувати сигнальний граф підсилювача (при складанні рівнянь схеми для побудови графа використати систему рівнянь транзистора в h-параметрах). Скласти матрицю графа і визначити коефіцієнти передачі K_U і K_X з використанням матриці графа (для 2-х варіантів розрахунку: $h_{12E}=0$ і $h_{12E}\neq 0$).

1.7 Представити висновки по розрахунках у вигляді зведеної таблиці і відповідні пояснення до неї (при необхідності).

1.8 Дати перелік використаних джерел.

Примітка: при виконанні п. 1.4, 1.5 і 1.6 надати особливу увагу визначенню розмірностей шуканих параметрів схеми.

2. Графічна частина пояснювальної записки роботи повинна містити:

Рисунок 1 – схему підсилювача.

Рисунок 2 – розрахунок режиму роботи схеми на постійному струмі; визначення h-параметрів біполярного транзистора в т. П.

Рисунок 3 – результати уточнення координат т. П.

Рисунок 4 – побудови з визначення графоаналітичним методом вихідного опору підсилювача $R'_{ВИХ}$.

Рисунок 5 – побудови з визначення графоаналітичним методом $K_{I,TP}$, K_I , K_U , K_X , $R_{ВХ,TP}$, $R_{ВХ}$.

Рисунок 6 – представлення підсилювача стандартним чотирьополісником із вказівкою його параметрів.

Рисунок 7 – лінійну модель підсилювача в h-параметрах.

Рисунок 8 – схему підсилювача для режиму змінних складових сигналу з виділенням в ній простих чотирьополісників.

Рисунок 9 – робочу (розрахункову) схему підсилювача для побудови сигнального графу з вказівкою необхідних струмів і напруг.

Рисунок 10 – граф підсилювача.

3. Номер варіанту курсової роботи студент визначає по двох останніх цифрах номера свого студентського квитка; вихідні дані варіанту (вихідний опір джерела вхідного сигналу підсилювача $R_{И}$, масштаби вісів координат статичних в.а.х. біполярного транзистора, значення струму і напруги транзистора, що припускаються) вибирає в приведених нижче таблицях по передостанній (Ω) і останній (Ψ) цифрам номера студентського квитка. В роботі використовуються узагальнені статичні в.а.х. біполярного транзистора, що приведені на рис. 20.

Ω	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m[U_{KE}]$, В/дел	4	5	6	4	5	6	4	5	6	5
$U_{KEдоп}$, В	15	20	25	15	20	25	15	20	25	20
$R_{И}$, кОм	2	3	2	2,5	5	2,5	3	2	3	2,5

Ψ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M[I_K]$, мА/дел	4	6	8	10	8	6	4	6	8	10
I_{Kmax} , мА	20	25	35	40	35	25	20	25	25	40
$M[U_{BE}]$, В/дел	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,25	0,25	0,2	0,25

$m[U]$ – масштаб вісі напруг на в.а.х. транзистора;

$m[I]$ – масштаб вісі струмів на в.а.х. транзистора.

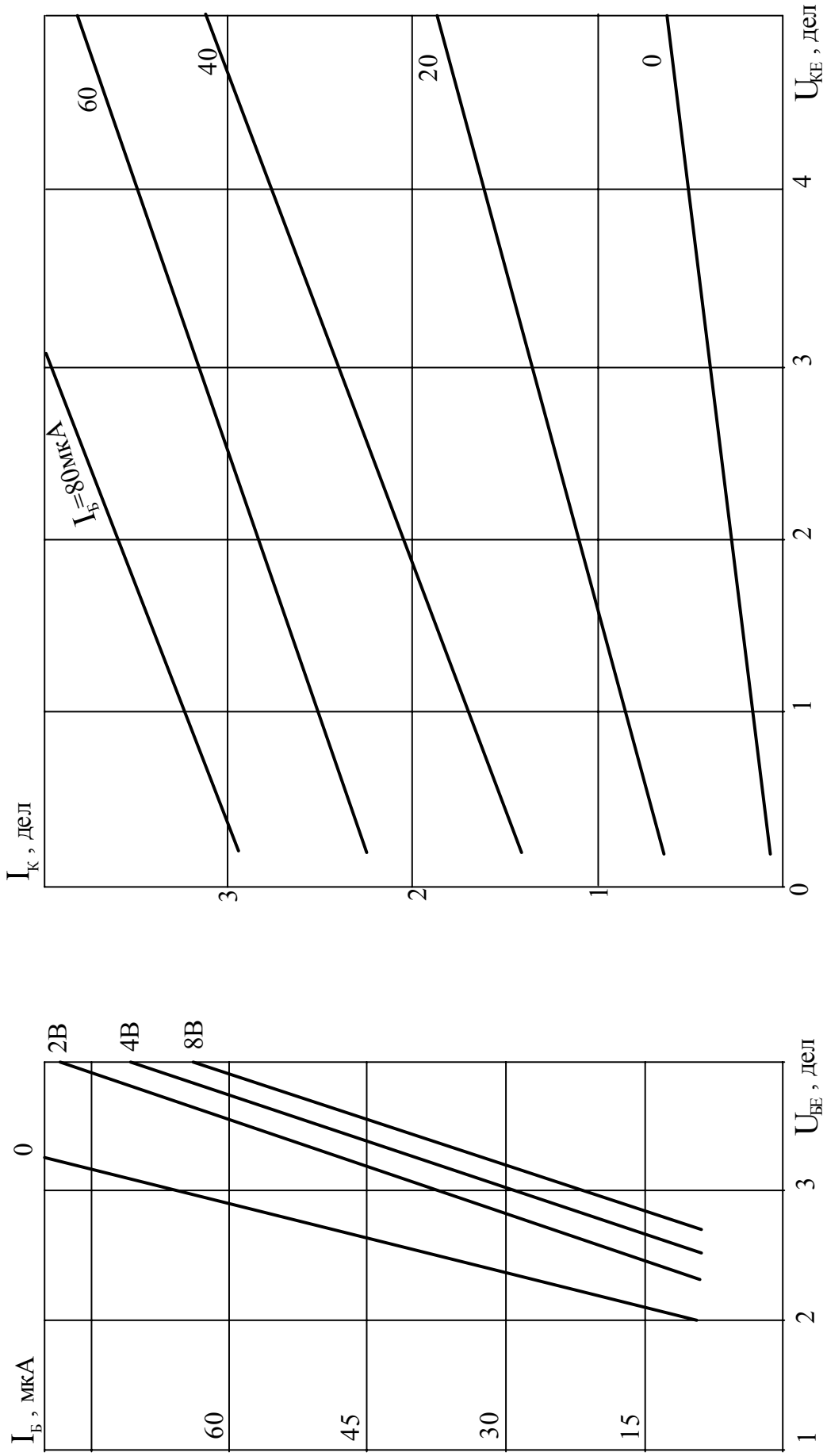


Рисунок 20 - Узагальнені в. а. х. транзистора

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Сигорский В.П., Петренко А.И. Основы теории электронных схем.– Киев.: Техника, 1971.-612 с.
2. Основи теорії електричних кіл : У 3-х кн.. Кн. 1. Аналіз лінійних електричних кіл. Часова область :Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак. За ред. М.Б. Гумена.-К.: Вища школа, 2003.-399с.
3. Основи теорії електричних кіл : У 3-х кн.. Кн. 2. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область :Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак. За ред. М.Б. Гумена.-К.: Вища школа, 2004.-358с.
4. Основи теорії електричних кіл: У 3-х кн.. Кн. 3. Аналіз нелінійних електричних кіл : Підручник / М.Б. Гумен, А.М. Гуржій, В.М. Співак, Ю.Г. Савченко. За ред. М.Б. Гумена.- К.: Вища школа, 2004.-391с.

Зміст

ВСТУП	3
1 РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДСИЛЮВАЛЬНОГО КАСКАДУ	3
1.1 Робочі характеристики для постійного струму.....	3
1.2 Режим спокою електронних схем. Точка спокою	9
1.3 Робочі характеристики для змінного струму.....	15
2 ГРАФОАНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ РОБОЧОГО РЕЖИМУ	17
2.1 Вибір точки спокою підсилювального каскаду	18
2.2 Визначення вихідного опору підсилювального каскаду	19
2.3 Визначення коефіцієнтів передачі, вхідного опору.....	25
ВИСНОВКИ	29
ЗАВДАННЯ НА КУРСОВУ РОБОТУ	31
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА	34