

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА

ЧЕБОТАРЬОВ В.І., ДУМІН О.М., ЛЯХОВСЬКИЙ А.Ф.

АНАЛІЗ РЕЖИМУ СПОКОЮ
В ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КОЛАХ

Навчально-методичний посібник
із схемотехніки радіоелектронних пристроїв
для студентів фізичних спеціальностей

Харків – 2004

УДК 261.375
ББК 32 846.я73
Че34

Чеботарьов В.І., Думін О.М., Ляховський А.Ф. Аналіз режиму спокою в підсилювальних колах: Навчально-методичний посібник /Під ред. В.І. Чеботарьова. –Х.: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2004.– 19 с.

У посібнику розглянуто метод визначення постійних складових напруг і струмів в підсилювальних колах. Для різновидів підсилювальних каскадів у загальному вигляді записані системи рівнянь режиму спокою і показана методика пошуку розв'язків цих рівнянь графічним способом. Сформульовані завдання для самостійної роботи.

Посібник призначається для студентів фізичних спеціальностей і використовується при вивченні курсу «Основи радіоелектроніки».

В пособии рассмотрен метод определения постоянных составляющих напряжений и токов в усилительных цепях. Для различных разновидностей усилительных каскадов в общем виде записаны системы уравнений режима покоя и показана методика отыскания решений этих уравнений графическим способом. Сформулированы задания для самостоятельной работы.

Пособие предназначено для студентов физических специальностей и используется при изучении курса «Основы радиоэлектроники».

The method of the determination of voltage and current constant components in amplifiers is considered in the school-book. The sets of quiescent condition equations are written in general form, and the principles of finding of their graphical solutions are shown for basic varieties of amplifying cascades. Tasks for studying on one's own are formulated.

The school-book is intended for students of physical professions and used for the studying of course “Basics of radioelectronics”.

Рецензенти:

ст. наук. співробітник ІРЕ НАН України ім. О.Я. Усикова, докт. фіз.-мат. наук, проф. О.О. Булгаков
завідувач відділу космічної радіофізики РІ НАН України, докт. фіз.-мат. наук, проф. А.О. Мінаков

Рекомендовано вченою радою радіофізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

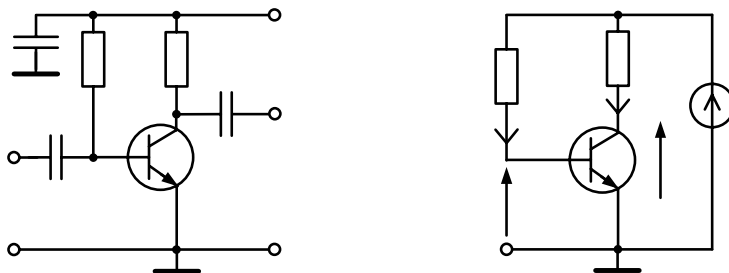
(Протокол № 5 від 21.05.04)

Аналіз режиму спокою

Важливу роль в підсилювачі відіграє його режим спокою, який визначається за відсутності дії вхідного сигналу, коли в колах схеми діють лише постійні складові напруг і струмів. Для аналізу режиму спокою підсилювальному каскаду співвідносять еквівалентну схему, в якій індуктивності замінюють провідниками, а ємності - розривами кола. Складена таким чином схема є R-колом, в якому електронний прилад (ЕП) – нелінійний триполосник. Для еквівалентної схеми записують систему рівнянь, в якій ЕП моделюється двома статичними вольт-амперними характеристиками (ВАХ) – вхідною $I_K = F_1(U_{KE}, U_{KE})$ та вихідною $I_3 = F_2(U_{KE}, U_{3E})$, де I_K – струм керувального електрода, I_3 – струм збирального електрода, U_{KE} – напруга між керувальним та емітувальним електродами, U_{3E} – напруга між збиральним та емітувальним електродами ЕП. Систему з цих двох рівнянь доповнюють двома рівняннями, що отримують на основі другого закону Кірхгофа для вхідного та вихідного кіл еквівалентної схеми. Отримана таким чином система з чотирьох рівнянь може бути розв’язана чисельними методами. Для наочності її, як правило, розв’язують графо-аналітично.

1. Аналіз підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, точка спокою якого задається за рахунок фіксованого струму бази

На мал. 1а наведено принципову схему найбільш простого підсилювального каскаду на біполярному транзисторі. Еквівалентна схема, що відповідає його режиму спокою показана на мал. 1б. На ній вказана система відліку напруг та струмів: U_B , I_B , U_K , I_K , а реальне джерело живлення з напругою $U_{Ж}$ замінене на ідеальне джерело постійної напруги $E_{Ж}$.



Мал. 1. Схеми каскаду: а) принципова, б) еквівалентна.

Для визначення величин цих напруг і струмів в режимі спокою складаємо систему рівнянь. З урахуванням того, що $U_E=0$, $\Rightarrow U_{BE}=U_B$, $U_{KE}=U_K$ маємо:

$$I_B = F_1(U_B, U_K), \quad (1)$$

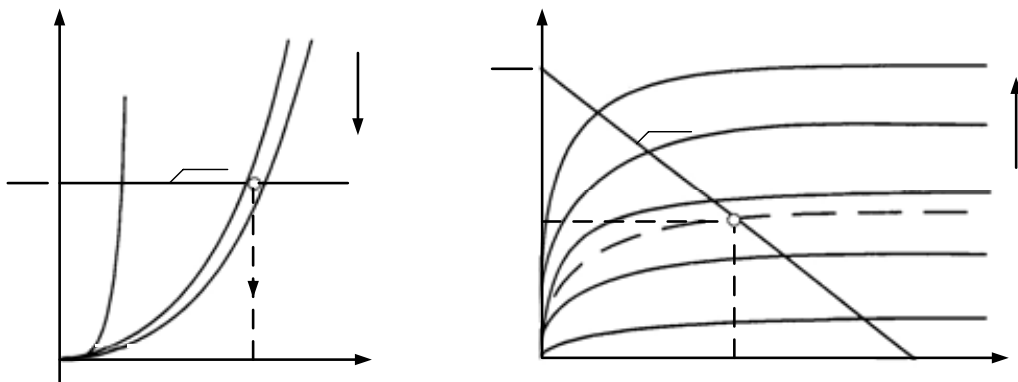
$$I_K = F_2(U_B, U_K), \quad (2)$$

$$U_B = E_{Ж} - R_B I_B, \quad (3)$$

$$U_K = E_{Ж} - R_K I_K. \quad (4)$$

Розв'язок цієї системи рівнянь графічним способом показано на мал. 2. Тут на графіках вхідної ВАХ транзистора (мал. 2а) та його вихідної ВАХ – (мал. 2б) побудовано *навантажувальні лінії режиму спокою*, які відповідають рівнянням (3) і (4), і знайдено *точки спокою*, за допомогою яких визначаються величини постійних напруг і струмів U_{B0} , I_{B0} , U_{K0} , I_{K0} .

Вказівка. Розв'язок цієї нелінійної задачі слід починати з побудови *навантажувальної лінії режиму спокою* на вихідній ВАХ (рівняння (2)) – мал. 2б. *Вихідна навантажувальна лінія режиму спокою* є пряма (рівняння (4)), що проходить через точки $U_K = E_{Ж}$, при $I_K = 0$ та $I_K = E_{Ж}/R_K$, при $U_K = 0$. Наступним кроком є побудова *навантажувальної лінії режиму спокою* на вхідній ВАХ (рівняння (1)) – мал. 2а. *Вхідна навантажувальна лінія* – це пряма (рівняння (3)), яка проходить через точку $I_B = E_{Ж}/R_B$, майже паралельно вісі абсцис, оскільки $U_B \ll E_{Ж}$. Її перетин з кривою вхідної ВАХ, що відповідає значенню $U_K \approx E_{Ж}/2$ наближено визначає *точку спокою* і дозволяє знайти наближені значення величин $I_{B0} = E_{Ж}/R_B$ і U_{B0} .



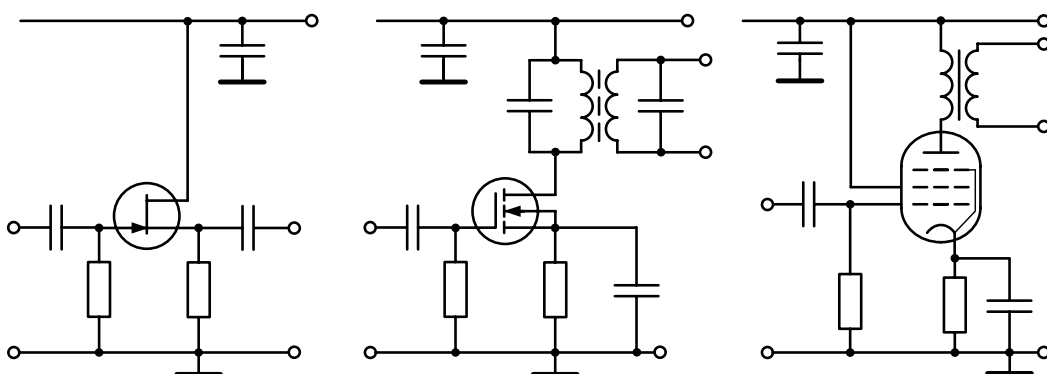
Мал. 2. Ілюстрація графічного способу розв'язку системи рівнянь.

Потім на вихідній ВАХ – мал. 2б знаходять криву, яка відповідає знайденій величині U_{B0} . Якщо відповідна крива відсутня, її будують за

допомогою лінійної інтерполяції, як це показано на мал. 2б штриховою лінією. Точка перетину цієї кривої з вихідною *навантажувальною лінією* і є *точкою спокою*. Її проекція на вісі абсцис та ординат дає інші дві величини $U_{к0}, I_{к0}$, що характеризують режим спокою.

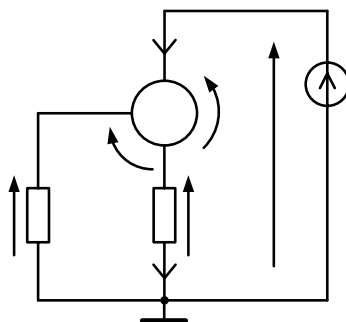
2. Аналіз підсилювальних каскадів з еквівалентною схемою режиму спокою повторювача на польовому транзисторі

Низка підсилювальних каскадів на польових транзисторах і електронних лампах, зразки яких представлені схемами на мал. 3, в режимі спокою замінюються однаковою еквівалентною схемою, яка наведена на мал. 4. На ній вказана система відліку напруг і струмів каскаду.



Мал. 3. Схеми підсилювачів:

- повторювач на n -каналному польовому транзисторі з керуючим p - n переходом;
- підсилювач зі спільним витіком на n -каналному польовому транзисторі з ізолюваним засліном та індукованим каналом;
- підсилювач зі спільним катодом на пентоді



Мал. 4. Еквівалентна схема для режиму спокою підсилювачів, схеми яких представлені на мал. 3.

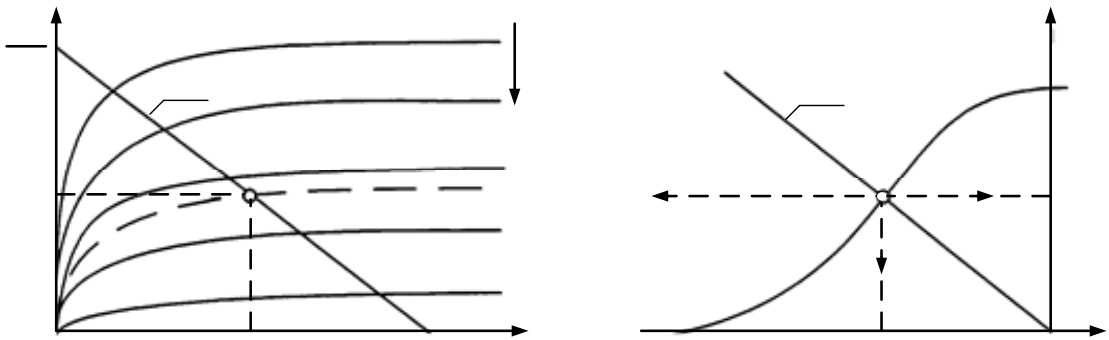
Для цих електронних приладів $I_K=0$, і тому $I_E=I_3$, а в режимі спокою $U_K=0$. Далі маємо $U_3=E_{Ж}$, $U_E=R_E I_E=R_E I_3$. Для інших величин, що підлягають визначенню складаємо систему рівнянь:

$$I_3 = F(U_{KE}, U_{3E}), \quad (5)$$

$$U_{3E} = E_{Ж} - R_E I_3, \quad (6)$$

$$U_{KE} = -R_E I_3. \quad (7)$$

На мал. 5 показано розв'язок цієї системи рівнянь графічним способом. Тут на графіку вихідної ВАХ ЕП (5) (мал. 5а) проведена *вихідна навантажувальна лінія режиму спокою*, яка відповідає рівнянню (6). Графік прохідної ВАХ (мал. 5б), як залежність I_3 від U_{KE} отримана з визначенням I_3 в точках перетину вихідної ВАХ (5) з лінією навантаження (6) (мал. 5а) для різних U_{KE} . Точка перетину прохідної ВАХ з прямою (7) є точкою спокою, яка визначає шукані величини I_{30} і U_{KE0} .



Мал. 5. Ілюстрація графічного способу розв'язку системи рівнянь (5)–(7)

$$E_{\text{Ж}} \quad I_3 \quad (5)$$

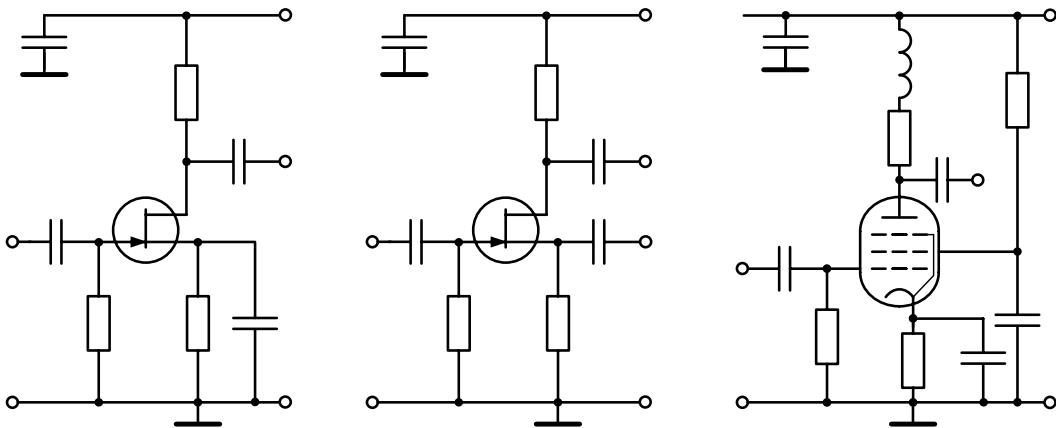
$$R_E \quad (6)_7$$

3. Аналіз підсилювальних каскадів з еквівалентною схемою підсилювача на польовому транзисторі, зібраного за схемою зі спільним витоком

Підсилювальні каскади на польових транзисторах і електронних лампах, приклади яких подані на мал. 6, в режимі спокою приводяться до еквівалентної схеми представленої на мал. 7. На ній указана система відліків напруг і струмів каскаду. Знову для електронних приладів, що використовуються $I_K=0$, тому $I_E=I_3$, а $U_K=0$ за визначенням режиму спокою. Далі маємо:

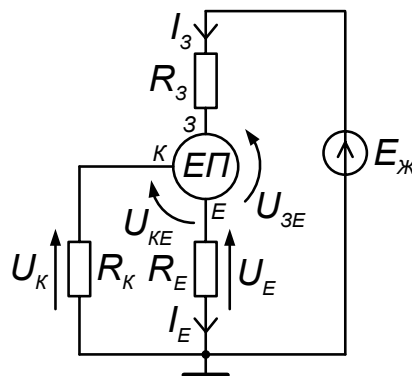
$$U_3 = E_{\text{ж}} - R_3 I_3,$$

$$U_E = R_E I_E = R_E I_3.$$



Мал. 6. Схеми підсилювачів:

- а) зі спільним витоком на n -каналному польовому транзисторі з керуючим p - n переходом;
- б) розділеним навантаженням на n -каналному польовому транзисторі з керуючим p - n переходом;
- в) зі спільним катодом на пентоді



Мал. 7. Еквівалентна схема режиму спокою для принципів схем каскадів, що представлені на мал. 6.

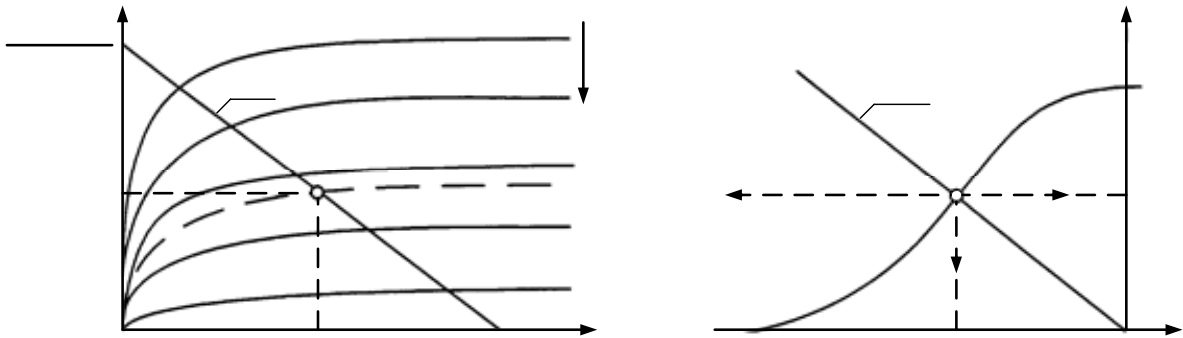
Для інших величин, які ще треба знайти складаємо систему рівнянь:

$$I_3 = F(U_{KE}, U_{3E}), \quad (8)$$

$$U_{3E} = E_{Ж} - (R_3 + R_E) I_3, \quad (9)$$

$$U_{KE} = -R_E I_3. \quad (10)$$

На мал. 8 показано розв'язок цієї системи рівнянь графічним способом. Тут на графіку вихідної ВАХ ЕП (8) (мал. 8а) побудована навантажувальна лінія, яка відповідає рівнянню (9). З використанням графічних зображень співвідношень (8) и (9) побудовано графік прохідної ВАХ (мал. 8б), на якому також проведена лінія, відповідно виразу (10). Точка перетину на цьому графіку визначає величини: I_{30} , U_{30} режиму спокою, а за знайденою величиною I_{30} – напругу спокою на збиральному електроді $U_{30} = E_{Ж} - R_3 I_{30}$.



Мал. 8. Ілюстрація графічного способу розв'язку системи рівнянь (8)–(10).

4. Аналіз підсилювальних каскадів з еквівалентною схемою повторювача на біполярному транзисторі

Підсилювальні каскади на біполярних транзисторах і польових транзисторах з індукованим каналом, приклади яких представлені схемами на мал. 9, аналогічні каскадам, що розглянуті у прикладі 2 (мал. 3). Їх відрізняє лише наявність подільників напруги в колах керувальних електродів бази або заслону, що фіксують на них початкові напруги спокою. Ця відмінність є і на еквівалентній схемі для режиму спокою, яка наведена на мал. 10 для каскадів на біполярних транзисторах. Тут також вказана система відліків напруг і струмів каскаду. Для спрощення аналізу припустимо, що струми в колі подільника напруги I_{Π} і в колі колектора I_K значно перевершують за величиною струм в колі бази транзистора I_B . Тоді маємо:

$$U_{B0} = E_{Ж} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2}), \quad (11)$$

$$U_K = E_{Ж} = U_{K0}, \quad (12)$$

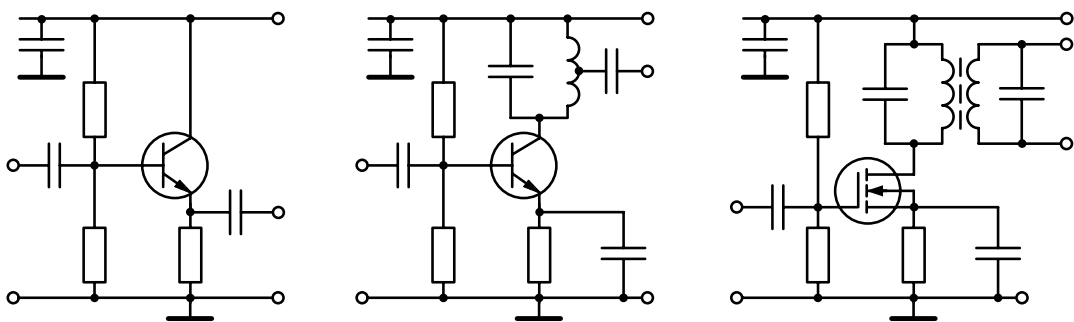
$$U_E = I_E R_E = I_K R_E, \quad (13)$$

$$I_B = F_1(U_{BE}, U_{KE}), \quad (14)$$

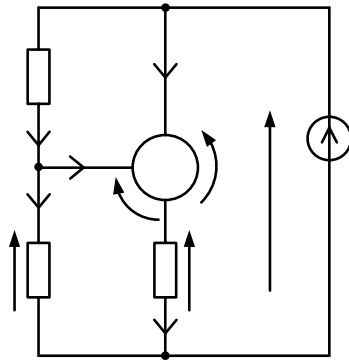
$$I_K = F_2(U_{BE}, U_{KE}), \quad (15)$$

$$U_{KE} = E_{Ж} - I_K R_E, \quad (16)$$

$$U_{BE} = U_{B0} - U_E = U_{B0} - I_K R_E, \quad (17)$$

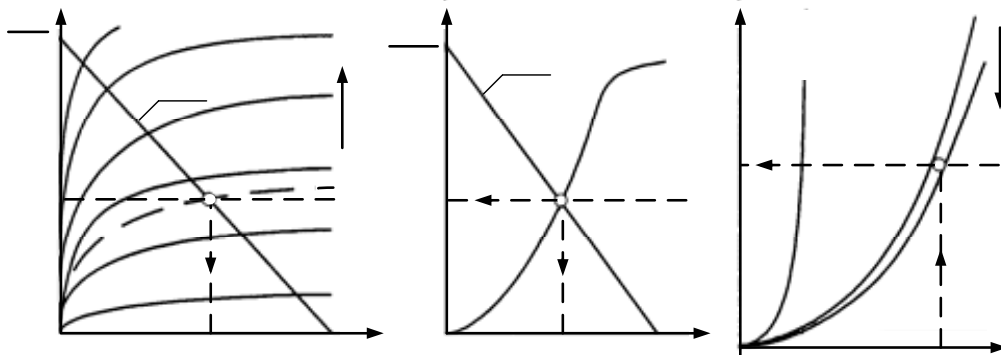


Мал. 9. Схеми підсилювальних каскадів, що ілюструють четвертий приклад:
 а) повторювач на біполярному транзисторі;
 б) резонансний каскад зі спільним емітером на біполярному транзисторі;
 в) резонансний каскад зі спільним витіком на польовому транзисторі з індукованим каналом



Мал. 10. Еквівалентна схема для режиму спокою, що узагальнює схеми каскадів, що представлені на мал.3.9.

На мал. 11 показано розв'язок цієї системи рівнянь графічним способом. Тут на графіку вихідної ВАХ ЕП (15) (мал. 11а) побудована навантажувальна лінія, яка відповідає виразу (16). Використовуючи графіки (15) і (16) побудовано графік прохідної ВАХ (мал. 11б), на якому зображена лінія, що відповідає виразу (17). Знайдене на цьому графіку положення точки спокою визначає шукані величини I_{K0} , $U_{E0} = I_{K0} R_E$ і U_{BE0} . Використовуючи графіки мал. 11а знаходимо U_{KE0} , а з вхідної ВАХ ЕП (14) знаходимо наближене значення I_{B0} . Для підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах розглянутий розрахунок дає наближені значення напруг і струмів, а для польових транзисторів точно, бо для них $I_3=0$.



Мал. 11. Ілюстрація графічного способу розв'язку системи рівнянь (11)–(17)

5. Аналіз каскадів з еквівалентною схемою підсилювача, зібраного за схемою зі СЕ на біполярному транзисторі

У цьому прикладі, як і в попередньому випадку, розглядаються підсилювальні каскади на біполярних і польових транзисторах з індукованим каналом, що представлені схемами на мал. 12, які є аналогами каскадів, розглянутих вже в третьому прикладі (мал. 6). Їх відрізняє тільки наявність подільників напруги в колах керуючих електродів – бази або засліна, що фіксують на них початкові напруги спокою. Ця відмінність є і на наведеній на мал. 13 еквівалентній схемі для режиму спокою для каскадів на біполярних транзисторах. Тут також вказана система відліків напруг і струмів каскаду. Знову для спрощення аналізу припустимо, що струми в колі подільника напруги I_{Π} і в колі колектора I_K значно перевершують за величиною струм в колі бази транзистора I_B . Тоді маємо:

$$U_{B0} = E_{Ж} R_{B2} / (R_{B1} + R_{B2}), \quad (18)$$

$$U_K = E_{Ж} - I_K R_K, \quad (19)$$

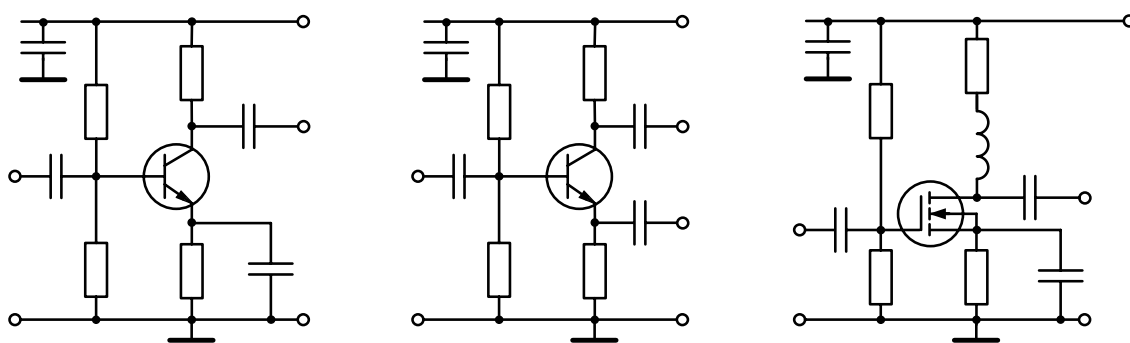
$$U_E = I_E R_E = I_K R_E, \quad (20)$$

$$I_B = F_1(U_{BE}, U_{KE}), \quad (21)$$

$$I_K = F_2(U_{BE}, U_{KE}), \quad (22)$$

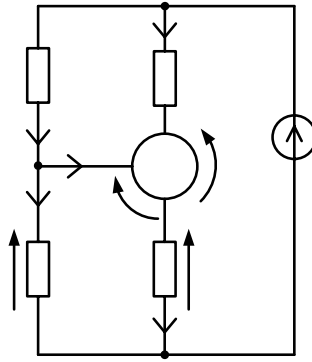
$$U_{KE} = E_{Ж} - I_K (R_K + R_E), \quad (23)$$

$$U_{BE} = U_{B0} - U_E = U_{B0} - I_K R_E. \quad (24)$$



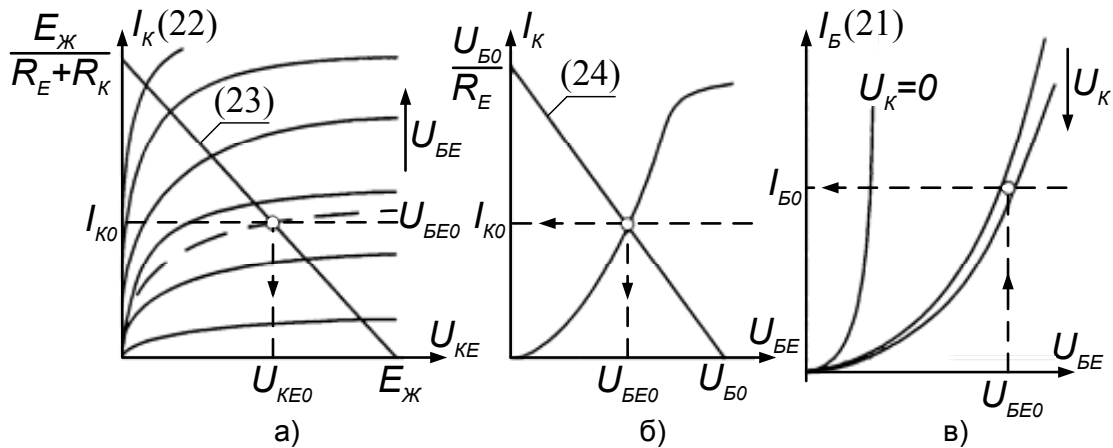
Мал. 12. Схеми підсилювальних каскадів, які ілюструють п'ятий приклад:

- а) аперіодичний підсилювач зі спільним емітером на біполярному транзисторі;
- б) підсилювач із розділеним навантаженням на біполярному транзисторі;
- в) підсилювач зі спільним витоком на польовому транзисторі з ізольованим засліном та індукованим каналом



Мал. 13. Еквівалентна схема для режиму спокою, що узагальнює схеми каскадів на біполярних транзисторах, що представлені на мал. 12.

На мал. 14 показано розв'язок цієї системи рівнянь графічним способом. Тут на графіку вихідної ВАХ ЕП (22) (мал. 14а) побудована *вихідна навантажувальна лінія*, яка відповідає виразу (23). Використовуючи графіки (22) і (23), побудовано графік *прохідної ВАХ* (мал. 14б), на якому зображена *вхідна навантажувальна лінія*, яка відповідає виразу (24). Їх перетин і дає положення точки спокою, яка визначає шукані величини I_{K0} , $U_{E0} = I_{K0} R_E$ і U_{BE0} . Використовуючи графіки мал. 14а знаходимо U_{KE0} і $U_{K0} = E_{\Pi} - I_{K0} R_K$, а з вхідної ВАХ ЕП (3.21) (мал. 14в) отримуємо наближене значення I_{B0} . Для підсилювальних каскадів на біполярних транзисторах розглянутий розрахунок дає наближені значення напруг і струмів, а для польових транзисторів – точно, оскільки $I_3 = 0$.



Мал. 14. Ілюстрація графічного способу розв'язку системи рівнянь (18)–(24).

Завдання для самостійної роботи

1. Засвоїти методику аналізу режиму спокою, що розглянута в прикладі 31. Виконайте аналіз режиму спокою резисторного підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (мал. 1), використовуючи ВАХ транзистора, наведені на мал. 15 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці:

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	15 В	10 В	15 В	10 В
$R_{б}$	95 кОм	95 кОм	100 кОм	70 кОм
$R_{к}$	1,5 кОм	1 кОм	2,5 кОм	2 кОм

2. За методикою, розглянутою в прикладі 2, виконати аналіз режиму спокою повторювача на польовому транзисторі (мал. 3 і мал. 4), використовуючи ВАХ транзистора, наведену на мал. 16 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці:

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	20 В	20 В	15 В	10 В
R_{e}	1 кОм	750 Ом	500 Ом	500 Ом

3. За методикою, розглянутою в прикладі 3, виконати аналіз режиму спокою резисторного підсилювального каскаду на польовому транзисторі (мал. 6а і мал. 7), використовуючи ВАХ транзистора, наведену на мал. 16 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці:

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	20 В	15 В	15 В	10 В
$R_{e} = R_{c}$	500 Ом	400 Ом	430 Ом	250 Ом
R_{e}	150 Ом	100 Ом	70 Ом	100 Ом

4. За методикою, розглянутою в прикладі 3.3, виконати аналіз режиму спокою підсилювального каскаду з розділеним навантаженням на польовому транзисторі (мал. 6б і мал. 7), використовуючи ВАХ транзистора, наведену на мал. 16 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці.

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	20 В	20 В	15 В	15 В
$R_{e} = R_{c}$	350 Ом	500 Ом	250 Ом	375 Ом

5. За методикою, розглянутою в прикладі 4, виконати аналіз режиму спокою повторювача на біполярному транзисторі (мал. 9а і мал. 10), використовуючи ВАХ транзистора, наведені на мал. 15 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці:

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	10 В	10 В	10 В	20 В
R_e	1 кОм	1,5 кОм	1,2 кОм	2 кОм
$R_{б1}$	2 кОм	3 кОм	10 кОм	20 кОм
$R_{б2}$	2 кОм	3 кОм	2 кОм	20 кОм

6. За методикою, розглянутою в прикладі 4, виконати аналіз режиму спокою резонансного підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (мал. 9б і мал. 10), використовуючи ВАХ транзистора, наведені на мал. 15 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці:

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	15 В	15 В	20 В	15 В
R_e	1,5 кОм	2 кОм	2 кОм	2 кОм
$R_{б1}$	10 кОм	10 кОм	10 кОм	20 кОм
$R_{б2}$	5 кОм	5 кОм	2 кОм	5 кОм

7. За методикою, розглянутою в прикладі 5, виконати аналіз режиму спокою резисторного підсилювального каскаду на біполярному транзисторі (мал. 12а і мал. 13), використовуючи ВАХ транзистора, наведені на мал. 15 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці.

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	15 В	15 В	15 В	20 В
$R_{к}$	1 кОм	1,5 кОм	1,5 кОм	2 кОм
$R_{б1}$	50 кОм	20 кОм	10 кОм	5 кОм
$R_{б2}$	50 кОм	10 кОм	5 кОм	2 кОм
R_e	500 Ом	100 Ом	200 Ом	200 Ом

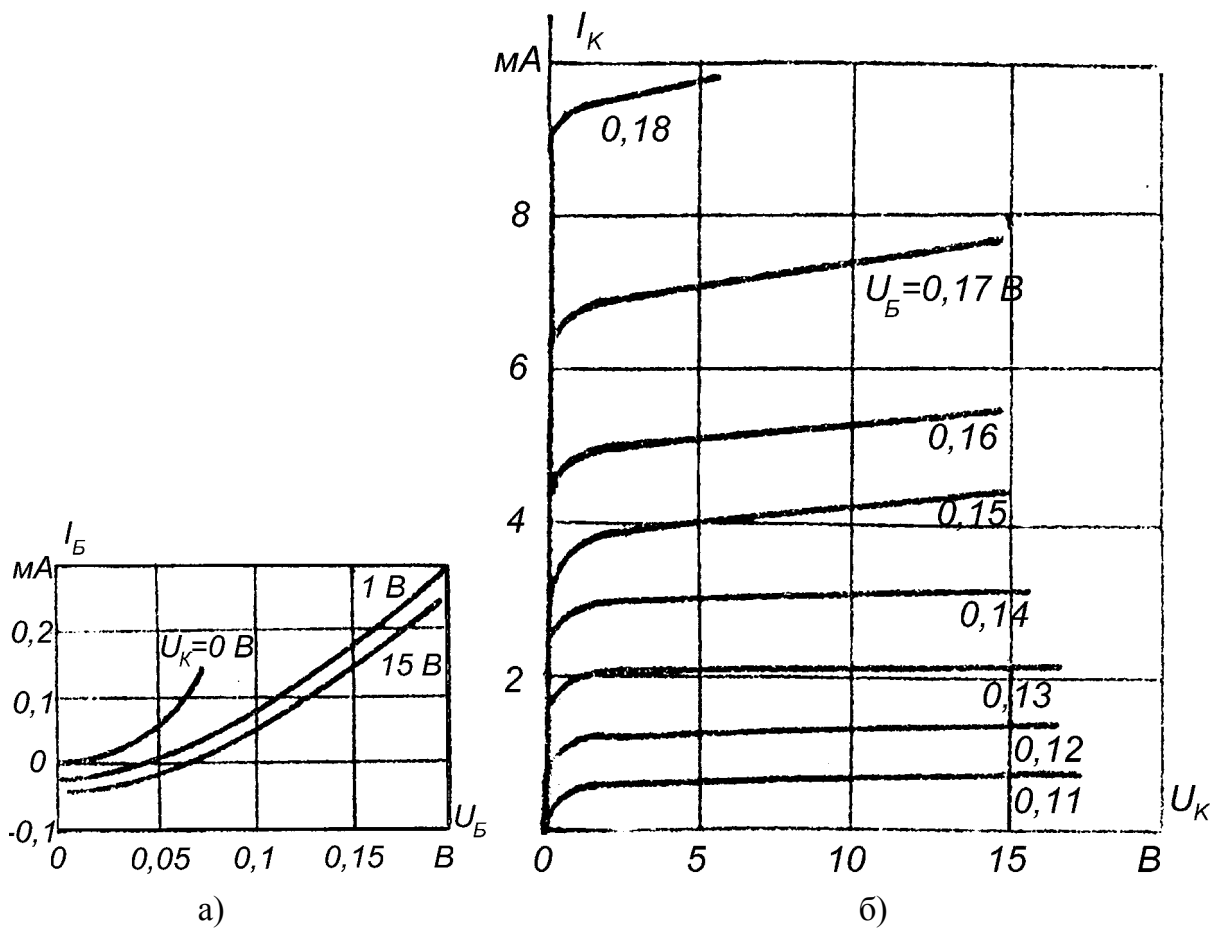
8. За методикою, розглянутою в прикладі 5, виконати аналіз режиму спокою підсилювального каскаду з розділеним навантаженням на біполярному транзисторі (мал. 12б і мал. 13), використовуючи ВАХ транзистора, наведені на мал. 15 і значення параметрів схеми для вказаного

варіанту з таблиці:

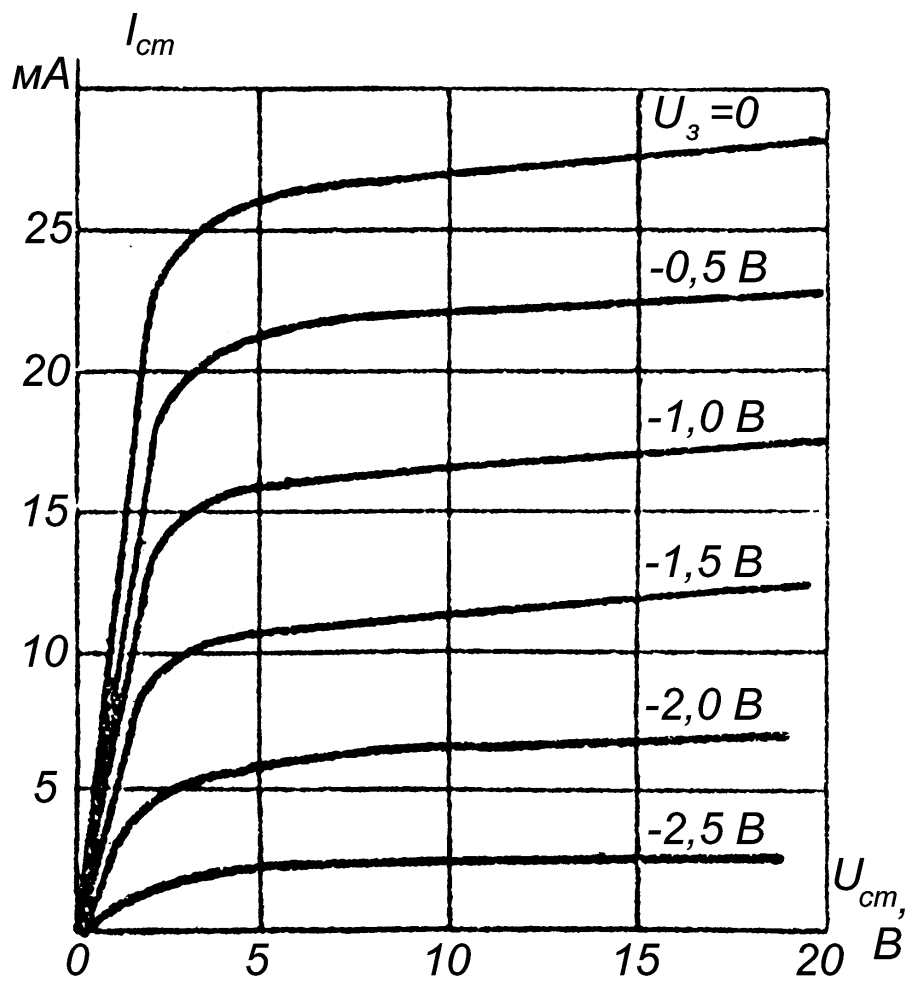
Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	15 В	15 В	15 В	20 В
$R_k = R_e$	1 кОм	1,5 кОм	2 кОм	1 кОм
$R_{б1}$	50 кОм	10 кОм	10 кОм	5 кОм
$R_{б2}$	30 кОм	10 кОм	5 кОм	3 кОм

9. За методикою, розглянутою в прикладі 5, виконати аналіз режиму спокою підсилювального каскаду з ВЧ корекцією на польовому транзисторі (мал. 12в і мал. 13), використовуючи ВАХ транзистора, наведені на мал. 16 і значення параметрів схеми для вказаного варіанту з таблиці.

Варіант	1	2	3	4
$E_{ж}$	20 В	15 В	15 В	20 В
R_k	500 Ом	450 Ом	400 Ом	500 Ом
$R_{б1}$	200 кОм	100 кОм	100 кОм	100 кОм
$R_{б2}$	100 кОм	50 кОм	50 кОм	100 кОм
$R_k = R_e$	500 Ом	50 Ом	100 Ом	200 Ом



Мал. 15. Вхідна (а) і вихідна (б) ВАХ біполярного транзистора.



Мал.16. Вихідна ВАХ n-канального польового транзистора з керувальним p - n переходом.

Список літератури

1. Чеботарев В. И., Думин А.Н., Ляховский А.Ф. Схемотехника усилительных каскадов: Учебно-методическое пособие. – Х.: ХНУ, 2004. – 32 с.
2. Чеботарев В. И. Теоретические основы радиотехники. Часть 1: Учебное пособие. – Харьков: ХГУ, 1989. – 100 с.
3. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: Навч. посібник / За ред. Ю. Л. Мазора, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.
4. Булычев А.Л., Лямин П.М., Тулинов Е.С. Электронные приборы. – М.: Лайт Лтд, 2000. – 416 с.

Зміст

	стор.
Аналіз режиму спокою	3
1. Аналіз підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, точка спокою якого задається за рахунок фіксованого струму бази....	3
2. Аналіз підсилювальних каскадів з еквівалентною схемою режиму спокою повторювача на польовому транзисторі	6
3. Аналіз підсилювальних каскадів з еквівалентною схемою підсилювача на польовому транзисторі, зібраного за схемою зі спільним витіком.....	8
4. Аналіз підсилювальних каскадів з еквівалентною схемою повторювача на біполярному транзисторі.....	10
5. Аналіз каскадів з еквівалентною схемою підсилювача, зібраного за схемою зі СЕ на біполярному транзисторі.....	12
Завдання для самостійної роботи.....	14
Список літератури.....	19

Навчально-методичний посібник

Вадим Іванович Чеботарьов
Олександр Миколайович Думін
Анатолій Федорович Ляховський

АНАЛІЗ РЕЖИМУ СПОКОЮ
В ПІДСИЛЮВАЛЬНИХ КОЛАХ