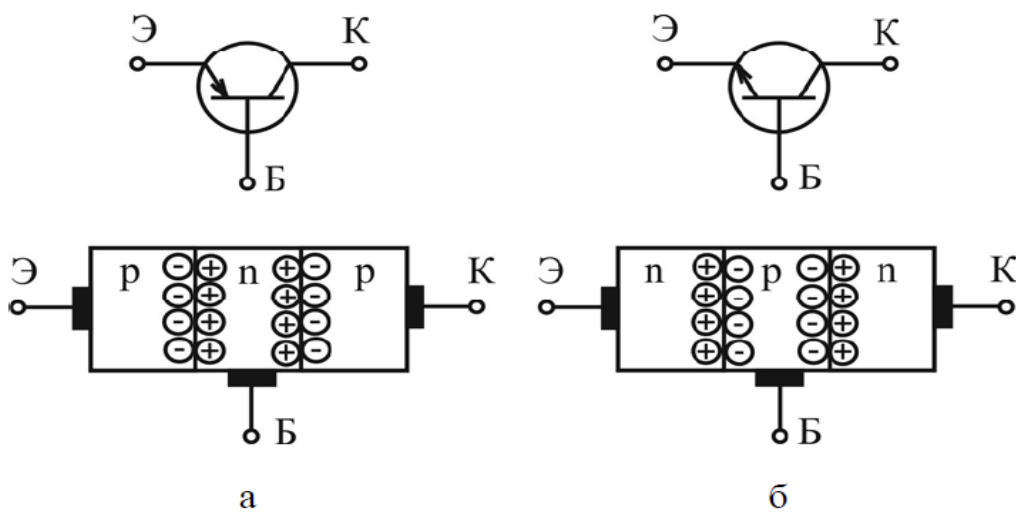


Биполярлық транзистор

Биполярлы транзистор – екі әсерлесуші р-п-ауысуы және үш немесе одан да көп шығысы бар жартылайөткізгішті құрал, күшейіткіш қасиеті шартты түрде тасушы зарядтардың инжекция мен экстракция құбылыстарына байланысты.

Жартылайөткізгішті құрылымдарда екі әсерлесуші электронды-кемтіктік өткел болады. Олар өткізгіштігі ауыспалы болатын жартылайөткізгіштің үш аумағын қамтиды. Сурет- 6.15 а, б құрылғы мен р-п-р және п-р-п-типті БТ-дың ШГБ-сі көрсетілген. Олардың жұмыс істеу принципі бірдей, айырмашылығы тек сыртқы кернеу көзінің қосылу полярлығында және электродтар арқылы өтетін токтың бағытында.



Сурет-6.15. р-п-р және п-р-п-типті БТ-дың ШГБ-сі

Транзистор құрылымының ең шеткі аумақтарының бірін көбірек легірлеп, әдетте оны инжекция режимінде қолданады және оны эмиттер деп атайды. Аралық аумақты база деп, келесі шеткі аумақты коллектор деп атайды. Коллекторлы аумақ инжекцияланған тасушы зарядтардың базаға қарай экстракциялау үшін арналған. Эмиттер мен база аумақтарының арасындағы электронды-кемтіктік өткелді эмиттерлік деп, ал коллектор мен база арасын – коллекторлы деп атайды. Транзистор өткелдерінің әсерлесуі үшін, базаның негізгі емес тасушыларының диффузиондық ұзындығынан базаның ені бірнеше есе кіші болуы қажет. Коллектордағы тасушылар экстракциясының тиімділігін жоғарылату үшін, коллектор өткелінің көлденең қимасының ауданы эмиттерлік өткелдің көлденең қимасының ауданынан көп есе үлкен болуы қажет.

БТ-дың жұмыс істеу режимдері оның екі өткелінің қосылуымен анықталады және оның кез-келгені ашық немесе жабық болуы мүмкін. Сондықтан транзистордың жұмыс істеу режимдерін келесідей қарастырамыз.

Активті режимде эмиттерлік өткел тура қосулы (ашық), коллекторлық – кері (жабық). Бұл режим негізгі болып саналады, себебі БТ-дың аумақтары

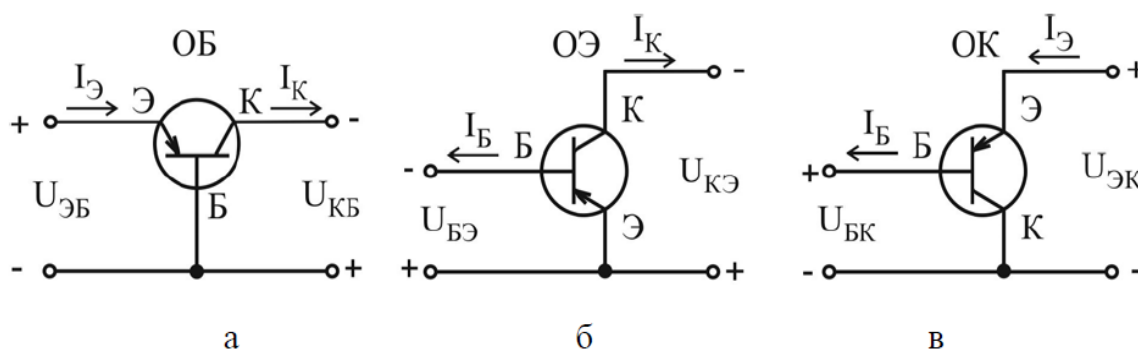
өзіндік функцияларды орындайды. Осы режимдегі транзисторлар күшейткіш құрылғыларда жұмыс атқарады.

Кесілу(отсечка) режимінде БТ-дың екі өткелі де кері қосулы болады, ал олардың кедергілері үлкен, токтары кіші және олардағы кернеу сыртқы қорек көзімен анықталады.

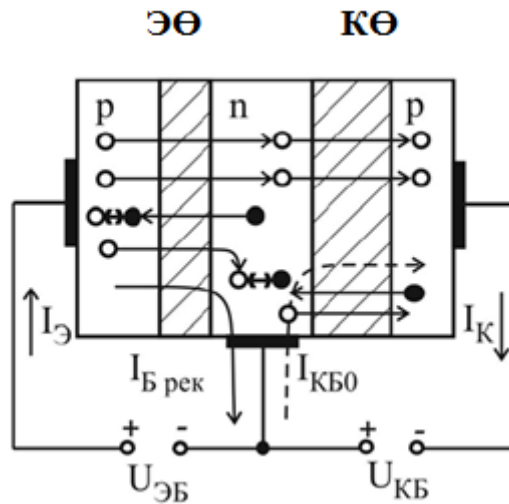
Қанығу режимінде БТ-дың екі өткелі де тура қосулы, ал олардың кедергілері кіші, токтары үлкен және кернеуі кіші мәнде болады. Импульсті құрылғыларда кіріс сигналдың әсерінен БТ кесілу(отсечка) режимінен қанығу режиміне және кері өте тез ауысады.

Инверсті режимде коллекторлық өткел тура қосулы, ал эмиттерлік – кері болады. Бұл кезде коллектор эмиттердің функциясын, ал эмиттер коллектордың функциясын атқарады. БТ-дың құрылымы көп жағдайда толық симметриялы болмағандықтан, бұл режимдегі жұмыстың тиімділігі активті режимге қарағанда төмен болады. Сондықтан бұл режим тәжірибеде қолданылмайды.

Транзистор шығысының қайсысы кіріс және шығыс тізбекке ортақ болатынын үш қосылу схемасымен анықтайды: ортақ база(ОБ), ортақ эмиттер(ОЭ), ортақ коллектор(ОК). Сурет-6.16 сыртқы қорек көздерінің қосылу полярлығы мен активті режимдегі үш түрлі қосылу схемаларындағы токтардың өту бағыты көрсетілген.



Сурет-6.16. Сыртқы қорек көздерінің қосылу полярлығы мен активті режимдегі үш түрлі қосылу схемаларындағы токтардың өту бағыты



Сурет-6.17. ОБ қосылу кезіндегі р-п-р типті БТ-дың активті режимі

ОБ қосылу кезіндегі р-п-р типті БТ-дың активті режимін қарастырайық (сурет-6.17). Тура кернеуді $U_{ЭБ}$ жоғарылатса, эмиттерлік өткелдің потенциалдық барьері төмендеп, эмиттерден базаға өтетін кемтіктердің және базадан эмиттерге өтетін электрондардың инжекциясын өсіреді. Себебі, эмиттердегі қоспаның концентрациясы базадағы қоспаның концентрациясынан өте үлкен. Эмиттерлік өткел арқылы екі түрлі инжекция тогы өтеді: кемтіктік $I_{Эр}$ және электронды $I_{Эн}$. Инжекция процесі инжекция коэффициентімен сипатталады (эмиттерлік өткелдің тиімділігімен): $\gamma = I_{Эр} / (I_{Эр} + I_{Эн})$.

Эмиттерден базаға қарай өтетін кемтіктердің инжекция нәтижесінде, эмиттерлік өткелде кемтіктердің концентрациясы өседі. Кемтіктер базадан коллекторлық өткелге диффузионды түрде қозғалады. Базаның ені кемтіктердің диффузиондық ұзындығынан әлденеше кіші болады, сол себепті олардың біраз бөлігі базаның тасушылары – электрондармен рекомбинирленеді, нәтижесінде базаның рекомбинацияланған тогы $I_{Б рек}$ пайда болады. Базадағы негізгі емес тасушылардың тасу процесі тасу коэффициентімен сипатталады: $\epsilon = I_{Кр} / I_{Эр}$, мұндағы $I_{Кр}$ - кемтіктер әсерінен пайда болған ток.

Кері қосылған коллекторлық өткелге жеткен кемтіктер, оның жылдамдататын өрісіне түседі және басқарылатын коллектор тогын туғызады $I_{Кбас}$.

Кемтіктердің экстракциясы жартылайөткізгіш атомдарының ионизация соққысымен және коллектор өткеліндегі заряд тасушылардың лавиндік көбеюімен қатар жүруі мүмкін. Бұл процесс лавиндік көбею коэффициентімен бағаланады: $M = I_{Кбас} / I_{Кр}$. Лавиндік транзисторларда $M > 1$, ал қалыпта $M = 1$.

Эмиттерден базаға қарай өтетін негізгі тасушылардың инжекциясынан пайда болатын коллектор тогын басқарылатын коллектор тогы деп атайды: $I_{Кбас} = \gamma \epsilon M I_{Э}$. $\alpha = \gamma \epsilon M < 1$ шамасын ОБ схемасындағы ток бойынша статикалық

өткізу коэффициенті деп атайды (эмиттердің статикалық ток өткізу коэффициенті). Әдетте α орнына h_{21B} белгіленуін қолданады. α шамасының параметрі 0,95...0,999 диапазоны аралығында жатыр.

Басқарылатын коллектор тогынан $I_{K \text{ упр}}$ бөлек, коллектор өткелінен өтетін кері басқарылмайтын ток та I_{KB0} бар. Сондықтан коллектордың толық тогы үшін мына теңдік орындалады:

$$I_K = \alpha I_E + I_{KB0} \quad (6.22)$$

Коллектор өткелінің кері тогы I_{KB0} басқарылатын коллектор тогымен $I_{K \text{ бас}}$ бағытталса, ал базада рекомбинация тогына қарама-қарсы болады, сол себепті базадағы толық ток мынаған тең: $I_B = I_{B \text{ рек}} - I_{KB0}$. I_{KB0} тогының шамасы германийлік транзисторлар үшін ондаған микроамперге тең, ал кремнийлік транзисторларда жүздеген наноамперге тең болады және шаманың өзгеруі температураға тікелей тәуелді. Сондықтан (6.22) –ді $I_K \approx \alpha I_E$ десек те болады.

Сурет-6.17 қарап, Кирхгоф заңына сәйкес, БТ-дың үш шығысын байланыстыратын токтардың формуласын аламыз:

$$I_E = I_K + I_B \quad (6.23)$$

(6.23)-ге (6.22)-ді қойсақ, ОЭ схемасындағы транзистордың шығыс I_K және кіріс тогы I_B –ны байланыстыратын формула шығады:

$$I_K = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{KB0}}{1-\alpha} = \beta I_B + (\beta + 1) I_{KB0} = \beta I_B + I_{KЭ0} \quad (6.24)$$

$\beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1$ - параметрін ОЭ схемасындағы токтың статикалық өткізу коэффициенті деп атайды (база тогының статикалық өткізу коэффициенті). Әдетте β орнына $h_{21Э}$ белгіленуін қолданады. $I_{KЭ0} = I_{KB0} (\beta + 1)$ тоғын транзистордың бастапқы толассыз тогы деп атайды. β коэффициенті ондаған – жүздеген есе диапазонында жататын мәндерді қабылдайды.

ОБ бар схемада ток бойынша күшейту болмайды $\alpha < 1$, бірақ кіріс сигналының қуат бойынша күшейтілуі жүреді. Активті режимде коллектор мен эмиттер токтары шамамен тең, ал аз көлемдегі база тогы олардың айырмасына тең. Коллектор тогының шамасы коллектор өткеліндегі кернеуге іс жүзінде тәуелсіз, сондықтан коллектор өткелінің дифференциалды кедергісі $r_K = \frac{dU_{KB}}{dI_K}$ өте үлкен (өткел кері бағытта қосылған). Осыған байланысты транзисторды ток көзі ретінде қарастыруға болады, сондықтан коллектор тізбегіне үлкен кедергісі бар R_H жүктемені қосуға болады, ол коллектор тоғын өзгертпейді деп айтуға болады. Тікелей қосылған эмиттер өткелінің дифференциалды кедергісі өте аз: $r_E = \frac{dU_{ЭБ}}{dI_E} \ll r_K$ және $r_E \ll R_{ж}$. Жоғарыда айтылғаннан кіріс (эмиттер) тогының ΔI_E -ге өзгерсе, коллектор тогында осы шамаға тең дерлік мәнге өзгереді $\Delta I_K \approx \Delta I_E$. Алайда, эмиттер тізбегіндегі тұтыну қуатының өзгерісі

$\Delta P_{\text{кiр}} = \Delta I_3^2 r_3$ шығыс тізбектің тұтыну қуатының $\Delta P_{\text{шығ}} = \Delta I_K^2 R_{\text{ж}} \approx \Delta I_3^2 R_{\text{ж}}$ өзгерісінен әлдеқайда аз, яғни транзистор эмиттер тізбегінде төмен қуат шығыны кезінде коллектор тізбегіндегі үлкен қуатты басқаруға қабілетті. Қуат бойынша күшейту коэффициенті былай анықталады:

$$K_p = \frac{\Delta P_{\text{шығ}}}{\Delta P_{\text{кiр}}} \approx \frac{R_{\text{ж}}}{r_3} \gg 1 \quad (6.25)$$

Статикалық ВАС транзистордың тұрақты кіріс және шығыс токтарының және кернеулердің бір-біріне тәуелділіктерін көрсетеді. Егер тәуелсіз айнымалы кіріс ток және шығыс кернеуді алсақ, ал функция ретінде шығыс токты және кіріс кернеуді алсақ $U_{\text{кiр}}, I_{\text{шығ}} = f(I_{\text{кiр}}, U_{\text{шығ}})$, онда транзистордың кез-келген қосылу схемасы үшін статикалық ВАС-ң төрт түрін алуға болады: кіріс

$U_{\text{кiр}} = f(I_{\text{кiр}})|_{U_{\text{шығ}}=\text{const}}$, шығыс $I_{\text{шығ}} = f(U_{\text{шығ}})|_{I_{\text{кiр}}=\text{const}}$, ток бойынша тікелей жеткізу $I_{\text{шығ}} = f(I_{\text{кiр}})|_{U_{\text{шығ}}=\text{const}}$ және кернеу бойынша кері байланыс $U_{\text{кiр}} = f(U_{\text{шығ}})|_{I_{\text{кiр}}=\text{const}}$. Сурет-6.18 және 6.19 ОБ және ОЭ бар p-n-p- структуралы транзистордың статикалық ВАС графиктері көрсетілген.

БТ-ң дифференциалды аз сигналды h -параметрлері. Күшейткіш құрылғыларды айнымалы ток бойынша аз сигналды талдау кезінде транзисторды h -параметрлер системасымен сипатталатын сызықты төртполюстік ретінде қарастырған дұрыс, ол параметрлер кіріс және шығыс айнымалы токтар мен кернеулердің амплитудалық (әсерлік) мәндерін өзара байланыстырады:

$$U_{\text{кiр}} = h_{11} I_{\text{кiр}} + h_{12} U_{\text{шығ}} \quad (6.26)$$

$$I_{\text{шығ}} = h_{21} I_{\text{кiр}} + h_{22} U_{\text{шығ}} \quad (6.27)$$

(6.26) пен (6.27)-ға кезекпенен $I_{\text{кiр}} = 0$ және $U_{\text{шығ}} = 0$ мәндерін қойсақ, кіріс бойынша бос жүріс (БЖ) режимі мен шығыс бойынша қысқа тұйықталу (ҚТ) режимдері, h -параметрлер үшін физикалық мағынасын анықтайтын келесі өрнекті аламыз:

$h_{11} = \left. \frac{U_{\text{кiр}}}{I_{\text{кiр}}} \right|_{U_{\text{шығ}} = 0}$ – кіріс бойынша ҚТ режиміндегі кіріс кедергі;

$h_{12} = \left. \frac{U_{\text{кiр}}}{U_{\text{шығ}}} \right|_{I_{\text{кiр}} = \text{const}}$ – кіріс бойынша БЖ режиміндегі кернеу бойынша кері байланыс коэффициенті;

$h_{21} = \left. \frac{I_{\text{шығ}}}{I_{\text{кiр}}} \right|_{U_{\text{шығ}} = 0}$ – шығыс бойынша қысқа тұйықталу режиміндегі ток бойынша жеткізу коэффициенті;

$h_{22} = \left. \frac{I_{\text{шығ}}}{U_{\text{шығ}}} \right|_{I_{\text{кiр}} = \text{const}}$ кіріс бойынша бос жүріс режиміндегі шығыс өткізгіштігі.

h-параметрлерді есептеу үшін БТ-ң кіріс және шығыс сипаттамаларын қолданған ыңғайлы. ОЭ бар БТ-ң h-параметрлерінің граф-аналитикалық әдіс бойынша есептеуді қарастырайық: $h_{11э}$ және $h_{12э}$ дифференциалды параметрлерін берілген А жұмыс нүктесінде ($U_{БЭ0}$, $I_{Б0}$, $U_{КЭ0}$) анықтау үшін кіріс сипаттамаларының сызықты аймағында сурет-6.19 а көрсетілгендей құрастыру орындау керек. Токтар мен кернеулердің табылған өсімі ізделіп отырған параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді:

$$h_{11э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{БЭ}=\text{const}} = \left. \frac{U_{БЭ}'' - U_{БЭ}'}{I_{Б}'' - I_{Б}'} \right|_{U_{БЭ}=\text{const}} \quad (6.28)$$

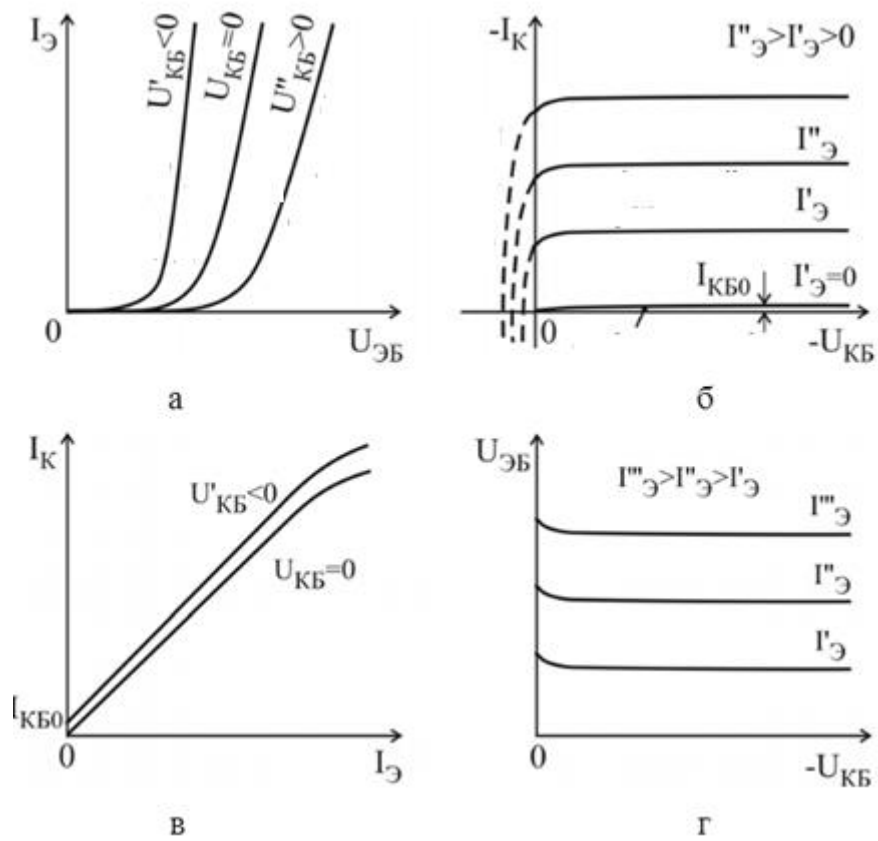
$$h_{12э} = \left. \frac{\Delta U_{БЭ}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} = \left. \frac{U_{БЭ}'' - U_{БЭ0}}{U_{КЭ}'' - U_{КЭ}'} \right|_{I_{Б}=\text{const}} \quad (6.29)$$

$h_{21э}$ және $h_{22э}$ параметрлері шығыс сипаттамалар бойынша анықталады. ОЭ бар схемадағы тоқ бойынша статикалық жеткізу коэффициенті $h_{21э}$ мен дифференциалды параметрлерінің $h_{21э}$ белгілеу айырмашылығына назар аударыңыз. Кіріс сипаттамаларының А нүктесіне сәйкес А' нүкте ($I_{К0}$, $U_{КЭ0}$, $I_{Б0}$) аймағында сурет-6.19 б көрсетілгендей құрастырулар орындау керек. Токтар мен кернеулердің табылған өсімі ізделіп отырған параметрлерді анықтауға мүмкіндік береді:

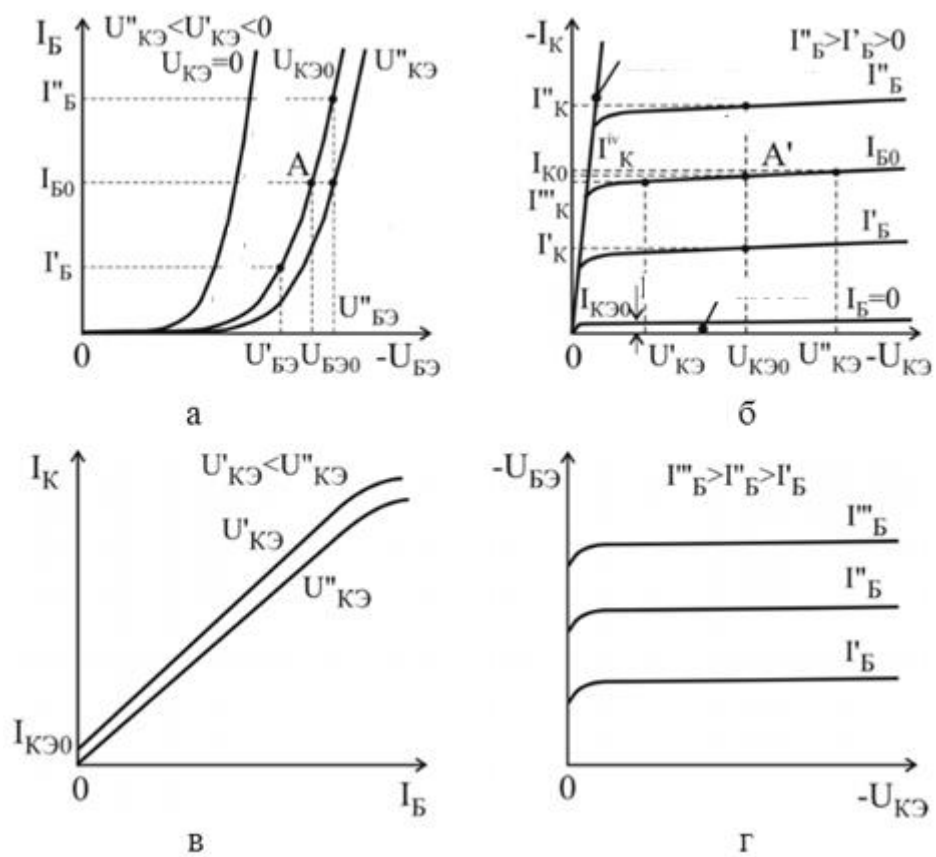
$$h_{21э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta I_{Б}} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}} = \left. \frac{I_{К}'' - I_{К}'}{I_{Б}'' - I_{Б}'} \right|_{U_{КЭ}=\text{const}} \quad (6.30)$$

$$h_{22э} = \left. \frac{\Delta I_{К}}{\Delta U_{КЭ}} \right|_{I_{Б}=\text{const}} = \left. \frac{I_{К}^{iv} - I_{К}'''}{U_{КЭ}'' - U_{КЭ}'} \right|_{I_{Б}=\text{const}} \quad (6.31)$$

Сол сияқты ОБ бар транзистор үшін де h-параметрлері анықталады.



Сурет-6.18. ОБ транзистордың h-параметрлер



Сурет-6.19. Биполяр транзистордың h-параметрлері

БТ-ның физикалық T-тәріздес эквивалентті схемасы h-параметрлерімен қатар төменгі жиіліктердегі реалды транзистордың сипаттамаларын толықтай дерлік көрсетеді және аз сигналды транзисторлық күшейткіштерді талдау үшін кеңінен қолданады. ОБ және ОЭ бар БТ-ның физикалық T-тәрізді эквивалентті схемалары сурет-6.20 а, б көрсетілген. БТ-ы қосу үшін БТ-ның эквивалентті схемасының параметрлерінің мәнін белгілі h-параметрлерді пайдаланып табуға болады:

$$\text{ОБ бар: } r_B = \frac{h_{12Б}}{h_{22Б}}, r_K = \frac{1}{h_{22Б}}, \alpha_{\sim} = -h_{21Б}, r_Э = h_{11Б} - (1 - h_{21Б})r_B \quad (6.32)$$

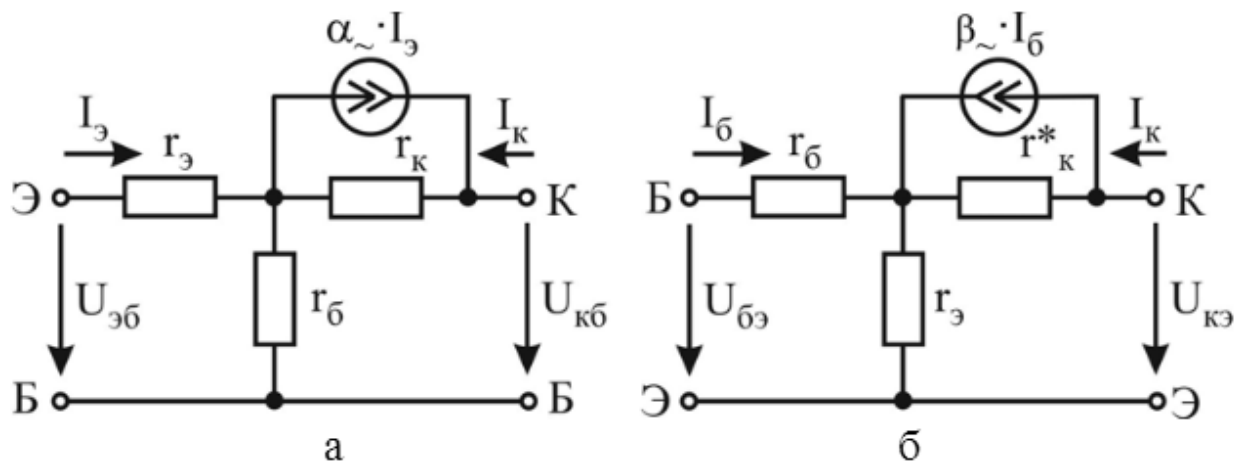
$$\text{ОЭ бар: } r_Э = \frac{h_{12Э}}{h_{22Э}}, r_{*K} = \frac{1}{h_{22Э}}, \beta_{\sim} = -h_{21Э}, r_B = h_{11Э} - (1 - h_{21Э})r_Э \quad (6.33)$$

БТ-ның екі қосылу схемалары үшін кернеу бойынша кері байланыс коэффициенті $h_{21Б}$ және $h_{21Э}$ өте аз мөлшерге ие болғандықтан, статикалық ВАС-ны қолданып есептейтін болсақ, олардың дәлдігі төмен болады. Осыған байланысты эквивалентті схема параметрлерін есептеуді эмиттерлік өткелдің дифференциалды кедергісін есептеуден бастау қажет:

$$r_Э = \frac{\varphi_T}{I_{Э0}} \quad (6.34)$$

мұндағы, $\varphi_T = kT/q$ – жылулық потенциал, $T=300\text{K}$ кезде 26 мВ-қа тең; $I_{Э0}$ – жұмыс нүктесіндегі БТ-ның эмиттер тоғы. Осыны ескере отырып (6.32)-гі БТ базасының көлемдік кедергісін былайша есептеу керек:

$$r_B = (h_{11Б} - r_Э)/(1 - h_{21Б}) \quad (6.35)$$



Сурет-6.20. ОБ және ОЭ бар БТ-ның физикалық T-тәрізді эквивалентті схемалары

Аз қуатты БТ-ның эквивалент схема параметрлері мынадай типтік мағыналарға ие: эмиттерлік өткелдің дифференциалды кедергісі $r_э$ – бірлік – ондық ом; базаның көлемдік кедергісі $r_б$ – жүздік ом – бірлік килоом; ОБ бар схемадағы шығыс кедергі $r_к$ – жүздеген килоОм – бірлік мегаом; ОЭ бар схемадағы шығыс кедергі $r_{*к} = r_к / (h_{21э} + 1)$ – ондаған – жүздеген килоОм.

Максималды рұқсат етілген БТ параметрлері. Аппаратураның сенімді жұмысын қамтамасыз ету үшін транзисторлардың жұмыс режимі ток пен кернеу рұқсат етілген режим аймағының шегінен шығып кетпеуі тиіс, ол параметрлер: коллектордың максималды рұқсат етілген тұрақты тогы $I_{Кmax}$; максималды рұқсат етілген кері кернеу коллектор-эмиттер $U_{КЭmax}$; Максималды рұқсат етілген эмиттер базаның кері кернеуі $U_{ЭБmax}$; Максималды рұқсат етілген коллектордың тұрақты ыдырау қуаты $P_{Кmax} = I_К U_{КЭ}$. Кейде анықтамада максималды ыдырау қуаты қамтамасыз етілетін температура корпусы $T_{К1}$ үшін мына параметрлердің шамалары келтіріледі. Температура $T_{К1}$ жоғары ұлғайса, онда ыдырау қуаты мына формуламен есептеледі:

$$P_{Кmax} = (T_{П} - T_{К} / R_{ТПК}) \quad (6.36)$$

мұндағы $T_{П}$ – өту температурасы; $T_{К}$ – корпус температурасы; $R_{ТПК}$ – өту корпусының жылулық кедергісі;