

ЭЛЕКТРОНДЫҚ КҮШЕЙТКІШТЕР

15.1. ЭЛЕКТРОНДЫҚ КҮШЕЙТКІШТЕРДІ ЖІКТЕУ

Күшейткіштер деп қосылған қуаттау көзі энергиясының есебінен электр сигналдары параметрлерінің мәндерін ұлғайтуға арналған құрылғыларды айтады. Күшейткіштер сигналдардың қандай да бір параметрлерін барынша күшейту үшін қолданылады. Осы белгісіне қарап оларды кернеу, ток және қуат күшейткіштері деп бөледі.

Күшейткіштің сызықтық және сызықтық емес жұмыс режимдері болуы мүмкін.

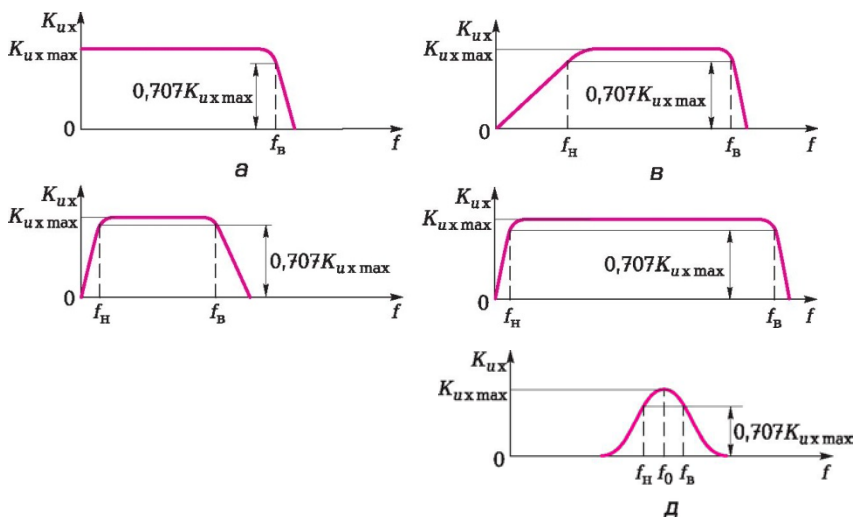
Сызықтық жұмыс режимді күшейткіштерде әртүрлі жиілік гармоникаларының жиынтығы ретінде ұсынуға болатын (4.17-бөлімшені қараңыз) күшейтілетін сигнал формасының бұрмалануы минималды болады. Егер сигналдың барлық гармоникалық құраушылары бұрмаланбастан ұлғайса, онда сигналдың бұрмалануы минималды болады. Күшейткіштің сигналдың гармоникалық құраушыларының амплитудасын ұлғайту қасиеті оның амплитудалық-жиіліктік сипаттамасын (АЖС) (4.49) сипаттайды.

$$K_{и\kappa}(\omega) = \frac{U_{вых\kappa}}{U_{вх}}, \quad (15.1)$$

мұндағы $U_{к\text{ірі}}$ және $U_{шығ.ж}$ — бос жүріс режиміндегі күшейткіштің кірісі мен шығысындағы синусоидалық кернеулердің әсерлік мәндері.

АЖС типі бойынша күшейткіштер баяу өзгертін кернеулер мен токтар немесе тұрақты ток (15.1-сурет, *а*), төмен жиіліктер (15.1-сурет, *б*), жоғары жиіліктер (15.1-сурет, *в*) күшейткіштері, кең жолақты (15.1-сурет, *г*) және тар жолақты (15.1-сурет, *д*) күшейткіштер болып бөлінеді.

Әртүрлі типтегі күшейткіштер АЖС-ң жиіліктерінің төменгі және жоғарғы шекараларының типтік мәндері 15.1-кестеде келтірілген.



15.1-сурет

Сызықтық емес жұмыс режимді күшейткіштерде кірістегі кернеу мәні шекаралық деңгейден біраз үлғайған жағдайда шығыстағы кернеу мүлдем болмайды. Мұндай күшейткіштер импульсті, оның ішінде логикалық техника құрылғыларында қолданылады.

Қазіргі уақытта интегралдық атқарымдағы күшейткіштер кеңінен пайдаланылады. Сондықтан күшейткіштерді әзірлеу емес, оларды автоматика, басқару және өлшеу жүйелерінің әртүрлі функционалдық түйіндерін іске асыру үшін қолдану өзекті болмақ.

15.1-кесте. Күшейткіштің амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы жиіліктерінің төменгі және жоғарғы шекаралары

Күшейткіш типі	Жиілік шекаралары, Гц	
	төменгі f_T	жоғарғы $f_{ж}$
Тұрақты ток күшейткіші	0	$10^3 - 10^8$
Төмен жиілік күшейткіші	20-50	$10^4 - 2 \cdot 10^4$
Жоғары жиілік күшейткіші	$10^4 - 10^5$	$10^7 - 10^8$
Кең жолақты күшейткіш	20-50	$10^7 - 10^8$

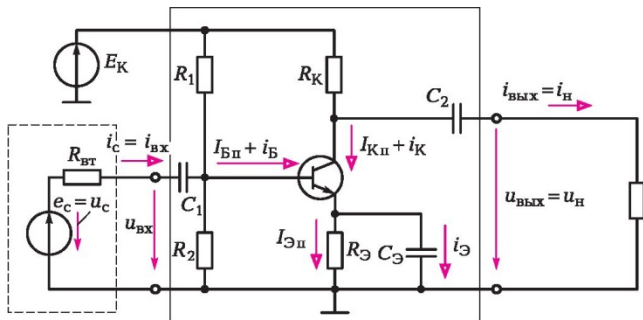
Биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың негізгі үш типі бар: ортақ эмиттерлі (ОЖ), ортақ коллекторлы (ОК) және ортақ базалы (ОБ).

Каскадтардың атаулары олардың төмен сигнал режиміндегі кіріс және шығыс тізбектерін алмастыру схемаларында транзистор эмиттеріне (154-суретті қараңыз), коллекторына (15.9-суретті қараңыз) және базасына сәйкес келетін ортақ нүктенің барын көрсетеді.

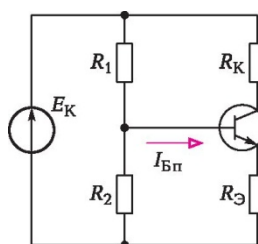
Төмен жиілікті күшейткіш каскадтардың жұмыс принциптері мен сипаттамаларын қарастырайық.

ОЭ-лі күшейткіш каскад. ОЭ-лі күшейткіш каскадтың типтік схемасы 15.2-суретте тұтас сызықпен белгіленген. Бұнда және бұдан әрі күшейткіштің кірісі мен шығысының ортақ түйінін жерге қосу арқылы белгілетін боламыз. Штрих сызықтың ішінде көрсетілген күшейтілетін сигналдың көзі күшейткіш каскадтың кіріс шықпасына қосылады және ол ішкі кедергісі $R_{\text{ш}}$ және ЭҚК $e_c = u_c$ болатын көз болып есептеледі. Жоғары сыйымдылықты C_1 және C_2 конденсаторлары тұрақты ток тізбегін (қуаттау тізбегін) сигнал көзінің тізбегінен және күшейткіш каскадтың кіріс шықпаларына қосылатын жүктеме кедергісі $R_{\text{ж}}$ қабылдағыш тізбегінен бөледі. Бұл ретте C_1 , C_2 , сондай-ақ C_3 синусоидалық ток конденсаторларының X_C кедергілері төмен болады.

Кіріс сигналының u_c кернеуі төмен болса, онда күшейткіш каскадтың жұмысын E_K ЭҚК көзінің ғана әсер ету жағдайында $I_{\text{БТ}}$, $I_{\text{КТ}}$ коллектор және $I_{\text{ЭТ}}$ токтарының құрауыштары тұрақты болатын



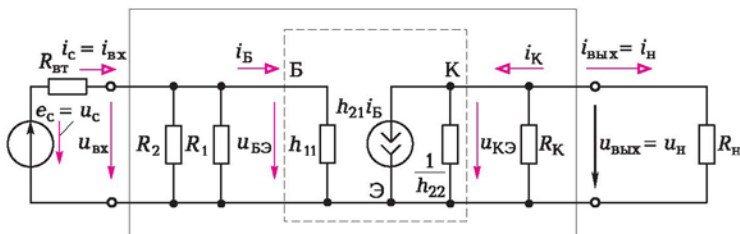
15.2-сурет



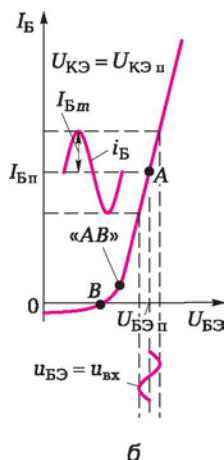
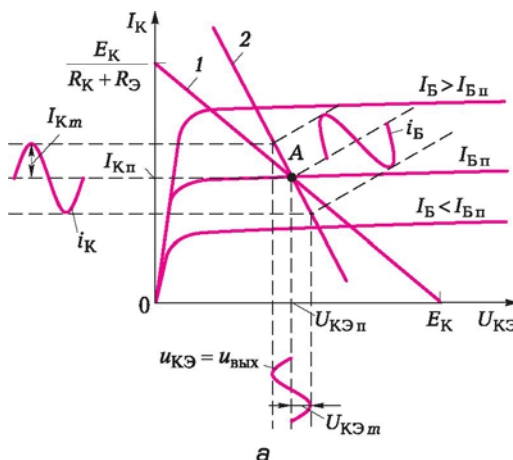
15.3-сурет

тыныштық режимі (15.3-сурет) мен i_c тогы күшейткіш каскад кірісіндегі $i_{к\text{іріс}}$ тогына тең e_c ЭҚК басқа көзінің (15.4-сурет) әсер ету жағдайында i_B , i_K коллектор және $i_Э$ токтарының құрауыштары айнымалы болатын төмен сигнал режимінің қосындысы ретінде қарастырған қолайлы болмақ. Күшейткіш каскад шығысындағы $i_{\text{шығ}}$ тогына тең $i_{\text{ж}}$ жүктеме тогының оң бағыты транзистордың ортақ шығысына, яғни эмиттерге қабылданған.

Тыныштық режимін 2.32-суреттегі сияқты, $I_{БТ} < I_{КТ}$, яғни $I_{ЭТ} \approx I_{БТ}$ деп алатын болсақ, жүктемелік сипаттама әдісі бойынша транзистордың статикалық коллекторлық сипаттамаларындағы A



15.4-сурет



15.5-сурет

$$I_K = \frac{E - U_{KЭ}}{R_K + R_Э}, \quad (15.2)$$

жұмыс нүктесі анықтайды (15.1-сурет, $a - 1$ -түзу).

Қажетті тыныштық режимін R_2 және R_3 резисторларынсыз да алуға болатынын атап өтеміз. Алайда соңғысы қоршаған орта температурасы өзгерген жағдайда A жұмыс нүктесінің күйін тұрақтандыруға мүмкіндік береді. Қоршаған орта температурасының жоғарылауы транзистордың параметрлерін база, коллектор және эмиттер токтары өзге өзгермейтін жағдайларда ұлғаятындай етіп өзгертеді. Эмиттер тізбегінде $R_Э$ резисторы болған жағдайда бұл онда кернеудің ұлғаюына әкеледі. Сонымен қатар базаның $U_{БЭ}$ кернеуі мен тогы азаяды. Осылайша теріс кері байланыс іске асып, тыныштық режимі тұрақтанады. Төмен сигнал режимінде теріс кері байланыстың сипатталған механизмі жоқ, себебі $R_Э$ резисторына параллель $C_Э$ жоғары сыйымдылықты конденсаторы қосылған.

Төмен сигнал режимі 15.4-суреттегі күшейткіш каскадты алмастыру схемасы бойынша есептеледі, онда тұрақты h -параметрлі (13.6) транзисторды алмастыру схемасы штрих сызықтың ішінде, ал күшейткіш каскадты алмастыру схемасы тұтас сызықтың ішінде көрсетілген.

Алмастыру схемасынан басқа резистивтік элементтермен салыстырғанда кедергілері жоғары $1/h_{22}$, R_1 және R_2 резистивтік элементтерін алып тастап, сигнал кернеуінің өзгеруін синусоидалық деп және жүктеме тізбегін $R_{ж} = \infty$ деп алып, ОЭ-лі күшейткіш каскадтың *негізгі параметрлерін* аламыз:

$$R_{к\text{іріс}} = h_{11} \quad (15.3)$$

— кіріс кедергісі (1—10 кОм);

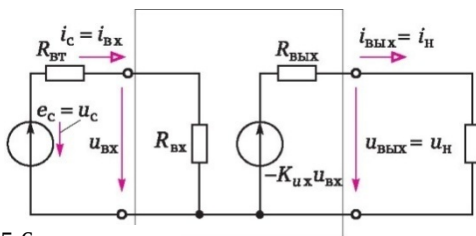
$$R_{шығ} = R_K \quad (15.3a)$$

— шығыс кедергісі (10—100 кОм);

$$u_{н.х} = -\frac{h_{21}R_K}{h_{11}}u_{вх} \quad (15.3б)$$

— $u_{нх} = h_{11}i_B$ кернеуінің полярлылығына қатысты $u_{нх} = -h_{21}R_K i_B$ кернеуінің полярлылығының инверттеу (15.5-суретті қараңыз);

$$K_{u\text{х}} = \frac{U_{н.х}}{U_{вх}} = \frac{h_{21}R_K}{h_{11}} \quad (15.3в)$$



15.6-сурет

РИС. 15.6

— $u_{нх}$ және $u_{вх}$ синусоидальқ кернеулерінің әсерлік мәндерінің қатынасына тең кернеудің (10-100) күшею коэффициенті.

(15.3) өрнектеріне ОЭ-лі күшейткіш каскадтың (15.6-сурет) кіріс және шығыс тізбектерін орналастырудың жалпылама схемасына сәйкес келеді, оны да энергия көзін орналастырудың екі схемасының эквиваленттілігімен (2.11-суретті қараңыз) алуға болады.

Каскадты жүктеме тізбегіне қосқан кезде сигнал көзі кернеуінің күшею коэффициенті мынаған тең болады:

$$K_u = \frac{U_n}{U_c} = \frac{h_{21} R_n R_K}{(R_{вт} + h_{11})(R_n + R_K)}, \quad (15.4)$$

мұндағы $U_c = (h_n + R_{вт})I_b$, $U_K = h_n I_b R_K R_K / (R_K + R_K)$ және $I_b - u_c$, u_K синусоидальқ кернеулері мен i_b тогының әсерлік мәндері.

Бұл күшею коэффициенті күшейткіштің негізгі параметрі болып табылмайды, себебі сигнал мен жүктеме көзі тізбектерінің кедергісіне тәуелді болады.

ОЭ-лі күшейткіш каскадтың негізгі кемшілігі – кіріс кедергісінің төмен мәні. Бұл сигнал көзінің тогы мен шығын қуатын, сондай-ақ оның ішкі кедергісіндегі кернеудің төмендеуін ұлғайтады.

15.4-суреттегі алмастыру схемасына айналымы құраушы бойынша ОЭ-лі күшейткіш каскадтың шығыс тізбегінің сыртқы сипаттамасы сәйкес келеді (15.5. а суретін қараңыз, 2-түзу):

$$u_{КЭ} = -\frac{R_K R_n}{R_K + R_n} i_K. \quad (15.5)$$

Бұл ретте жүктеме тізбегіндегі ток мынаған тең.

$$i_n = -\frac{R_K}{R_n + R_K} i_K.$$

Тыныштық режимінің жұмыс нүктесінің орналасуы бойынша A , B және AB кластарындағы күшейткіштер болады.

A класында эмиттер мен базаның арасындағы p - n -өткел тура бағытта (тыныштық режимінің A жұмыс нүктесі 15.5, a , b суреттерінде) жылжыған және төмен сигнал режимінде күшейткіш барлық кернеулер мен токтар синусоидалық түрде өзгертін сызықтық тізбек болып есептеледі.

B класында эмиттер мен базаның арасындағы p - n -өткел (тыныштық режимінің B жұмыс нүктесі 15.5, b суретінде) оның шектік өткізгіштік кернеуінің аймағына жылжыған, сондықтан $u_{bx} = u_{бэ}$ синусоидалық сигналының күшеюі оның оң жарты период уақыт моментінде ғана болады.

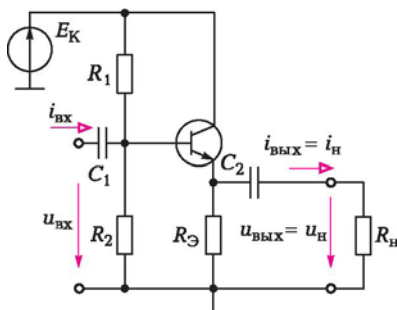
AB класында тыныштық режимінің « AB » жұмыс нүктесі A және B кластарындағы күшейткіштердің $I_B(U_{бэ})$ сипаттамасындағы оның орындарының арасындағы аралық орынды алады (15.5-сурет, b), сондықтан синусоидалық сигналдың оң (теріс) жарты периодының күшеюі осы сипаттаманың сызықтық $AB - A$ (сызықтық емес $AB - B$) бөлігінде болады.

A класының күшейткіштерінде токтың тұрақты құрауышы жоғары, B және AB кластарының күшейткіштерінде төмен болады. Сондықтан біріншісі көбінесе кернеу күшейткіштері ретінде, ал екіншісі ПЭК мәні біршама қуат күшейткіштері ретінде пайдаланылады (15.8-бөлімшені қараңыз). Бұл ретте синусоидалық сигналды күшейту үшін оны оң және теріс жарты периодтар уақыт моментінде күшейтеді де, нәтижелерін қосады.

(15.4) өрнектен K_u кернеуінің күшею коэффициентін ұлғайтуға және оның жүктеме тізбегінің кедергісіне тәуелділігін азайтуға арналған жағдайлардың қарама-қайшы екенін көруге болады. Күшейткіш каскадтың $R_{шығ} = R_K$ шығыс кедергісі неғұрлым жоғары болған сайын, кернеудің күшею коэффициентінің мәні де, оның жүктеме тізбегіне тәуелділігі де соғұрлым жоғары болады. Кернеудің күшею коэффициентін ұлғайтып, оның R_K кедергісіне тәуелділігін азайту үшін, ОЭ-лі күшейткіш каскад шығысы мен қабылдағыштың арасына кіріс және шығыс кедергілері жоғары келістіруші құрылғы қосу қажет. Мұндай құрылғының рөлін ОК-лы күшейткіш каскад атқара алады, ол сонымен қоса *эмиттерлік қайталағыш* деп аталады.

ОК-лы күшейткіш каскад. 15.7-суретте эмиттерлік қайталағыштың типтік схемасы келтірілген.

Күшейткіш каскадты алмастыру схемасынан (15.8-сурет), алдыңғы жолдағыдай, басқа резистивтік элементтермен салыстырғанда кедергілері жоғары $1/h_{22}$, R_1 және R_2 резистивтік



15.7-сурет

элементтерін алып тастап, $u_{\text{кпр}}$ кернеуін синусоидалық деп аламыз. Онда 1-контурға арналған Кирхгофтың екінші заңы бойынша $R_{\text{ж}} = \infty$ бос жүріс режиміндегі каскад кірісіндегі кернеу мынаған тең болады:

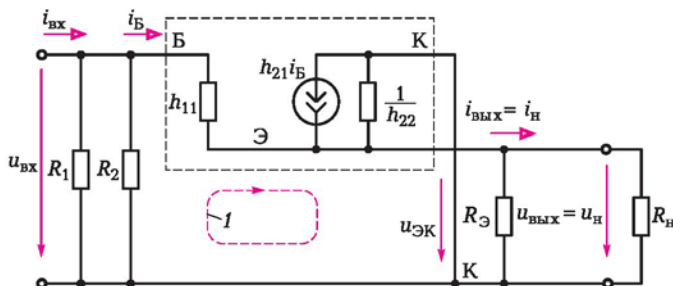
$$u_{\text{кпр}} = h_{11} i_{\text{б}} + U_{\text{ж.ж}} \quad (15.6)$$

мұндағы $U_{\text{ж.ж}} = (1 + h_{21})i_{\text{б}}R_{\text{Э}}$ — каскад шығысындағы кернеу; напряжение на выходе каскада; $i_{\text{б}} = i_{\text{кпр}}$ — каскад кірісіндегі ток.

(15.6) өрнектен ОК-лы күшейткіш каскадтың негізгі параметрлерін аламыз:

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{вх}} &= \frac{u_{\text{вх}}}{i_{\text{вх}}} = h_{11} + (1 + h_{21})R_{\text{Э}}; \\ K_{\text{вх}} &= \frac{u_{\text{вх}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{(1 + h_{21})R_{\text{Э}}}{h_{11} + (1 + h_{21})R_{\text{Э}}} \end{aligned} \right\} \quad (15.7)$$

— оның кіріс кедергісі (100-300 кОм) ОЭ-лі күшейткіш каскадтың кіріс кедергісінен едәуір жоғары және кернеудің күшею коэффициентін аламыз. Оның мәні бірлікке жақын (0,8-0,9), ал $u_{\text{кпр}}$ және $U_{\text{ж.ж}}$ кернеулері фаза бойынша сәйкес келеді. Бұл ОК-лы күш-



15.8-сурет

ейткіш каскадтың «қайталағыш» деген атауын білдіреді.

Эмиттерлік қайталағыштың шығыс кедергісі (10-50 Ом) ОЭ-лі күшейткіш каскадтың шығыс кедергісінен біршама аз.

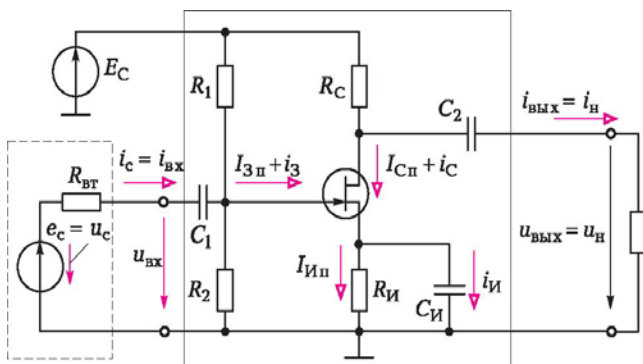
ОБ-лы күшейткіш каскад. ОЭ-лі күшейткіш каскадпен салыстырғанда ОБ-лы күшейткіштің каскадтың кернеуінің күшею коэффициенті шамалас мәнде болған кезде, шекаралық жиілігінің мәндері жоғары болады. Алайда оның кіріс және шығыс кедергілері төмен. Осы себептерге байланысты ОБ-лы күшейткіш каскад сирек қолданылады.

15.3. ДАЛАЛЫҚ ТРАНЗИСТОРЛАРДАҒЫ КҮШЕЙТКІШ КАСКАДТАР

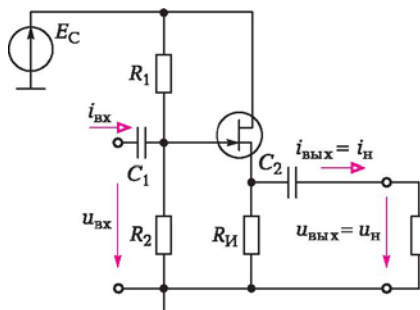
ОБ-лы, ОЭ-лі және ОК-лы биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтар сияқты, далалық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың үш типі болады: ортақ бекітпелі (ОЗ), ортақ бастаулы (ОИ) және ортақ ағынды (ОС). ОИ-лыкүшейткіш каскад басқаларына қарағанда жиі пайдаланылады.

ОИ-лы далалық транзисторлардағы күшейткіш каскад 15.9-суретте тұтас сызықпен белгіленген типтік схема бойынша іске асырылады.

Схеманың барлық элементтерінің міндеттері олардың ОЭ-лі биполярлық транзистордағы күшейткіш каскадтағы (15.2-суретті қараңыз) міндеттеріне ұқсайды, ал төмен сигнал режиміге 15.6-суреттегі жалпылама алмастыру схемасы сәйкес келеді.



15.9-сурет



15.10-сурет

ОЭ-лі биполярлық транзистордағы күшейткіш каскадпен салыстырғанда ОИ-лы далалық транзистордағы күшейткіш каскадтың негізгі артықшылығы – оларда шығыс кедергісінің (10-100 кОм) және бос жүріс режиміндегі кернеудің күшею коэффициентінің (10-100) мәндері шамалас болған жағдайда кіріс кедергісінің (10^2 - 10^3 кОм) мәні жоғары болады.

ОС-лы күшейткіш каскад (15.10-сурет) *бастаулы қайталағыш* деп те алады, ол функционалдық жағынан эмиттерлік қайталағышқа (15.7-суретті қараңыз) ұқсайды. Бастаулы қайталағыш кернеуінің күшею коэффициенті $K_{б.ж} = 0,8—0,9$ бірлікке жақын, шығыс кедергісі $R_{шығ} = 10—50$ Ом, ал кіріс кедергісі $R_{кір} = 1—10^3$ МОм.

ОЗ-лы күшейткіш каскадтар электроника құрылғыларында мүлдем қолданылмайды.

Энергия қабылдағыш ретінде күшейткіш каскадтың шығысына тағы бір күшейткіш каскад қосылуы мүмкін. Мұндай каскадтардың жиынтығы *көп каскадтық күшейткіш* құрайды.

Төмен және жоғары жиілікті, сондай-ақ кең жолақты және тар жолақты күшейткіштерде каскадтардың арасындағы электрлік байланыс конденсаторлармен, ал тұрақты ток күшейткіштерінде резисторлармен не тікелей байланыстармен жүзеге асырылады. Соңғы жағдайда тұрақсыздандырушы факторлардың, әдетте температураның әсерінен транзистор параметрлерінің тұрақсыздығына байланысты бір каскадтың шығысындағы тұрақты кернеудің кез келген өзгерістері басқа каскадтардың жұмыс режиміне әсер етеді, бұл көп каскадтық күшейткіштің шығысында тіпті күшейткіш сигнал жоқ болса да, кернеудің өзгеруіне әкеледі. Бұл құбылыс *нөл дрейфі* деп аталады.

Нөл дрейфін азайтуға және басқа пайдалы сапалар алуға дифференциалды күшейткіш каскадтар мүмкіндік береді.

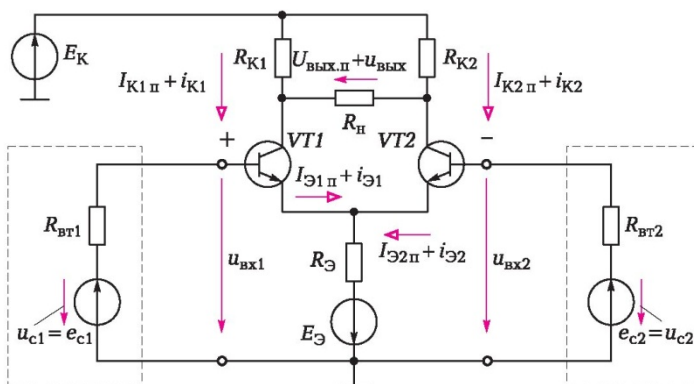
Иіндері $R_{K1} = R_{K2}$ резисторларымен және эмиттерлері біріктірілген бір типті $VT1$ және $VT2$ биполярлық транзисторларымен құрылған тұрақты ток көпірі негізіндегі дифференциалды күшейткіш каскадтың (15.11-сурет) схемасы ең кең таралған.

Көпірдің тиімді теңгерімі үшін транзисторларды бір кристалда бірыңғай технология бойынша дайындайды, сондықтан олардың параметрлері 1-5%-ға өзгешеленеді. Екі сигнал көзі бейсимметриялық кірістер деп аталатын транзисторлар базаларының тізбегіне қосылады, ал жүктеме кедергісі $R_{ж}$ қабылдағыш транзисторлардың коллекторларының арасына қосылады (*симметриялық шығыс*).

Каскадтың тыныштық режимі $u_{к1p1} = u_{к1p2} = 0$ кернеулерде немесе кірістердің қысқа тұйықталуымен кернеуді анықтайды:

$$U_{БЭТ} = E_{Э} - R_{Э} (I_{Э1T} + I_{Э1T}) > 0,$$

ол екі транзистор үшін де бірдей болады. Сондықтан олардың жұмыс режимдері аса өзгешеленбейді. Мұндай каскадта тыныш режимін тұрақтандыру жүзеге асырылады. Егер тұрақсыздандырғыш факторлардың, мысалы қызудың, әсерінен коллекторлардың I_{K1T} , I_{K2T} және эмиттерлердің $I_{Э1T}$, $I_{Э2T}$ токтары өссе, онда $U_{БЭТ}$ кернеуі азаяды, эмиттерлік өткелдер аз ток өткізетін болады; нәтижесінде шығыстағы I_{K1T} , I_{K2T} токтары мен тыныштық



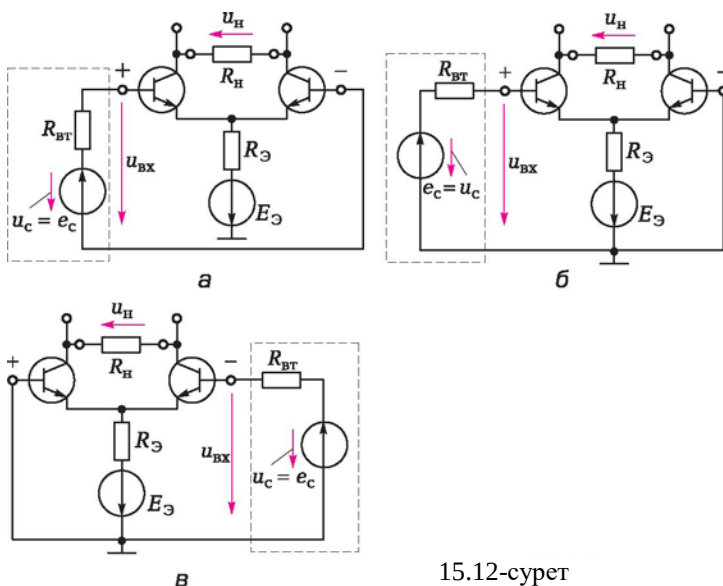
15.11-сурет

кернеуі тұрақтанады:

$$U_{\text{шығ.т}} = R_{K1} I_{K1T} - R_{K2} I_{K2T} \quad (15.8)$$

(15.8) формуласынан каскадтың аттас иіндеріндегі кез келген бірдей өзгерістердің $U_{\text{шығ.т}}$ кернеуінің өзгерістерін, яғни нөл дрейфін тудырмайтыны көрініп тұр. Нағыз каскадтарда элементтердің толық симметриясы болмайды, алайда дифференциалды күшейткіш каскадтағы $U_{\text{шығ.т}}$ кернеуінің дрейфі биполярлық (15.2-суретті қараңыз) және далалық (15.9-суретті қараңыз) транзисторлардағы күшейткіш каскадтармен салыстырғанда бірнеше мәрте төмендейді. Дифференциалды күшейткіш каскад әртүрлі режимде жұмыс жасайды.

Бір көз сигналының күшеюі. Сигнал көзі симметриялы (15.12-сурет) немесе бейсимметриялық (15.12-сурет, *б* және *в*) қосылады. 15.12, *б* суретіндегі схемада күшейткіш каскадтың шығысындағы $u_{\text{шығ}} = u_{\text{ж}}$ және кірісіндегі $u_{\text{кір}}$ кернеулерінің фазалары сәйкес келетінін ($u_{\text{шығ}} > 0, u_{\text{ж}} > 0$; $u_{\text{шығ}} < 0, u_{\text{ж}} < 0$), ал 15.12, *в* суретіндегі схемада қарама-қайшы екенін ($u_{\text{шығ}} > 0, u_{\text{ж}} < 0$; $u_{\text{шығ}} < 0, u_{\text{ж}} > 0$) атап өтеміз. Күшейткіштің тиісті кірістері *терістемейтін* және *терістейтін* деп аталады және олар схемада плюс, минус белгілерімен белгіленеді.



15.12-сурет

Тәуелсіз сигнал көздерінің екі кіріске қосылуы. Екі сигнал көзін, яғни тізбектің ортақ түйініне қатысты қарама-қарсы және бірдей полярлылықтағы көздерді фазаға қарсы және синфазалық қосу болады.

15.11-суреттегі $u_{c1} > 0$ және $u_{c2} < 0$ фазаға қарсы қосу (немесе керісінше) кезінде VT1 транзисторының базасы мен коллекторының токтары артады, ал VT2 транзисторында сол мәндерге азаяды (немесе керісінше). Сонымен қатар сәйкес транзисторларда коллекторлардың электрлік потенциалдары азаяды және ұлғаяды (немесе керісінше), олардың айырымы күшейткіш каскадтың шығысындағы кернеуді білдіреді.

$u_{c1} = u_{c2}$ тең мәндегі синфазалық сигналдардың әсері транзисторлардың жұмыс режимдерінің бірдей өзгеруіне сәйкес келеді. Бұл ретте (15.8) формула бойынша иіндері идеалды симметриялы күшейткіш каскадтың шығысында кернеу өзгерістері болмайды. Бұл өте маңызды, себебі синфазалық сигналдар әртүрлі тектегі бөгеуілдерден (атмосфералық, желілік және т.б.) тұрады.

Терістемейтін $u_{к1р1} = u_{ни}$ және терістейтін $u_{к1р2} = u_{ни}$ кірістердегі кернеулердің, терістемейтін және терістейтін кірістердің арасындағы потенциалдар айырымына тең, айырымын күшейту қабілеті:

$$u_{к1р} = u_{ни} - u_{и} = v_{ни} - v_{и},$$

күшейткіш каскадтың «дифференциалды» деген атауын білдіреді.

Дифференциалды күшейткіш каскадта биполярлық транзисторлардың орнына далалық транзисторлар қолданылуы мүмкін.

Биполярлық және далалық транзисторлардағы дифференциалды күшейткіш каскадтардың негізгі параметрлерінің мәндері сәйкесінше ОЭ-лі және ОИ-лы каскадтардағы сияқты тәртіпте болады.

Дифференциалды күшейткіш каскадтардың негізгі артықшылықтары – синфазалық бөгеуілдерге төзімділік және төмен нөл дрейфі $-1 \text{ — } 10 \text{ мкВ/}^{\circ}\text{С}$ дейін, бұл тұрақты токтың теңгерімді күшейткіштерінде нөл дрейфінен 20-100 есеге төмен. Осы себепке байланысты дифференциалды күшейткіш каскадтар, көбінесе, операциялық күшейткіштердің кіріс каскадтарды ретінде қолданылады.

15.5. ОПЕРАЦИЯЛЫҚ КҮШЕЙТКІШТЕР

Операциялық күшейткіштер (ОК) тұрақты ток күшейткіштерінің

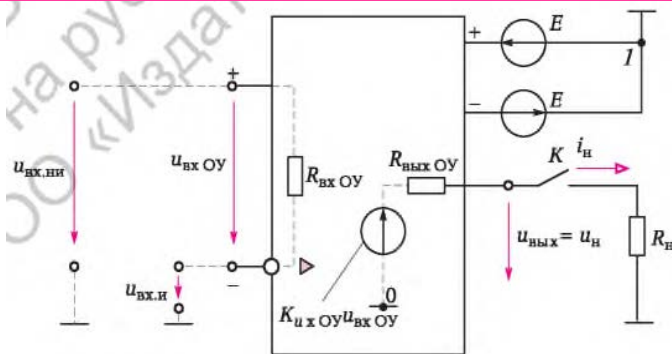
(15.1, *a* суретін қараңыз) бір түрі болып есептеледі. Бұл типтегі «операциялық» күшейткіштердің атауы олардың бастапқыда көбінесе аналогты шамаларға қатысты математикалық операцияларды (қосу, азайту, интегралдар және т.б.) орындау үшін қолданылғанына байланысты берілген. Қазіргі уақытта ОК әртүрлі функционалдық мақсаттағы электрондық құрылғыларды (кернеу стабилизаторларын, әртүрлі формадағы сигнал генераторларын) құрастыру кезінде қолданылады. Операциялық күшейткіштер тікелей байланыстары бар көп каскадтық болып жасалады. ОК кірісінде нөл дрейфін азайту үшін тұрақты тоқтың дифференциалды күшейткіш каскады (далалық транзисторларда және кіріс кедергісін ұлғайту үшін), одан кейін қажетті күшейтуді алу үшін аралық күшейткіш каскадтар қосылады және шығыста шығыс кедергісін азайту үшін кернеу қайталағыш қосылады. ОК әзірлеу – күрделі проблема. Алайда бұл оларды практикада қолдануды қиындатпайды, себебі олар интегралдық схемалар түрінде дайындалады.

Нақты операциялық күшейткіш. *Төмен сигнал режимінде* ОК-ң кіріс және шығыс тізбектері 15.13-суреттегі алмастыру схемасымен ұсынылады, оның элементтері ОК-ң *негізгі параметрлерін* көрсетеді:

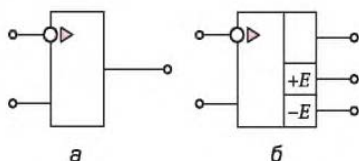
$$R_{\text{ОКкіріс}} = 10^4 - 10^{10} \text{ Ом} \quad (15.9)$$

— кіріс кедергісі;

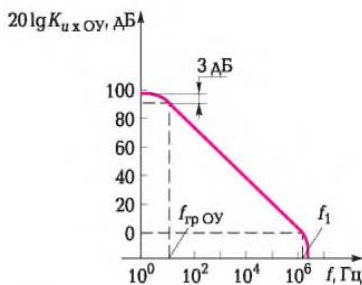
$$R_{\text{ОКшығыс}} = 10 - 50 \text{ Ом} \quad (15.9a)$$



15.13-сурет



15.14-сурет



15.15-сурет

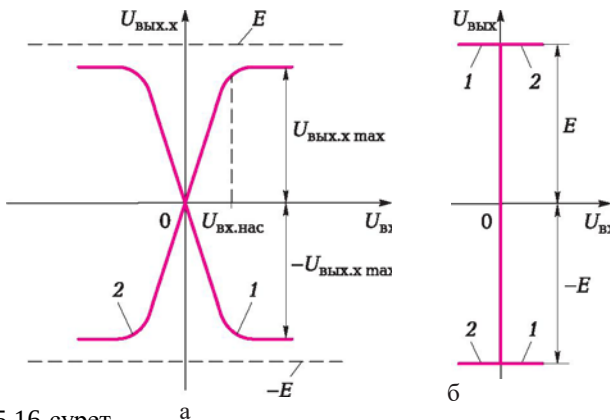
— шығыс кедергісі;

$$K_{\text{иХОК}} = U_{\text{шығ.ж}} / U_{\text{ОКкір}}. \quad (15.96)$$

— бос жүріс режиміндегі ОК шығысы мен кірісіндегі синусодалық кернеулердің әсерлік мәндерінің қатынасына тең кернейдің күшею коэффициенті ($R_{\text{ж}} = \infty$).

0 нөлдік потенциалды түйін ОК шығыс тізбегін алмастыру схемасында қуаттау тізбегінің 1 эквипотенциалдық нүктесіне сәйкес келеді. 15.14, а және б суреттерінде ОК-ң шартты белгілері келтірілген, оларда терістейтін кіріс шеңбермен белгіленген.

ОК-ң күшейткіш қасиеттерін оның жүктеме тізбегі ажыратулы болған кездегі жиіліктік және табыстама сипаттамалары айқындайды.



15.16-сурет

ОК-ң *логарифмалық амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы* (15.15-сурет) биполярлық транзистордың ЛАЖС-ына (13.14-суретті қараңыз) ұқсайды. Соңғысы сияқты операциялық күшейткіштің ЛАЖС-ында $f_{шк.ОК}$ *шекаралық жиілігін* бөледі, онда ОК кернеуінің күшею коэффициентін оның нөлдік жиіліктегі мәнімен салыстырғанда:

$$K_{и.хОК}(0) = 10^4 — 10^5 \quad (15.10)$$

$\sqrt{2}$ -ге немесе 0,707 есеге азаяды, ал $20 \lg K_{и.хОК}$ шамасы — $20 \lg \sqrt{2} = 3$ дБ-ға азаяды, сондай-ақ f_1 *бірлік күшею жиілігін* бөледі, онда ОК кернеуінің күшею коэффициенті: $K_{и.хОК} = 1$.

ОК-ң табыстама сипаттамаларын оның шығысындағы кернеудің жүктеме тізбегі ажыратылған кездегі тұрақты ток режиміндегі $U_{к\piр.и} = 0$ кезіндегі $U_{шығ.ж}$ ($U_{к\piр.и}$) терістейтін және $U_{к\piр.и} = 0$ кезіндегі $U_{шығ.ж}$ ($U_{к\piр.и}$) терістемейтін кірістеріндегі кернеулерге тәуелділігі анықтайды (15.16-сурет, a , 1 және 2-тәуелділіктер).

15.2-кесте. Операциялық күшейткіштердің кейбір типтерінің параметрлері

Параметр	Операциялық күшейткіштің типі			
	К140УД6	К140УД7	К140УА17	К140УД8
$\pm E$, В	± 15	± 15	± 15	± 15
$I_{ку}$, мА	3	2,8	5	5
$I_{к\piрОК}$, нА, көп емес	50	400	10	0,2
$\Delta I_{к\piрОК}$, нА, көп емес	15	200	5	0,1
$R_{ж}$, кОм, аз емес	1	2	2	2
$U_{шығ.ж тах}$, В	± 12	$\pm 10,5$	12	10
f_1 , МГц	1	0,8	0,4	1
$K_{ос.сф}$, дБ	70	70	100	70
$K_{ахОК}(0)$, аз емес	30 000	30000	200 000	50 000
$U_{см}$, мВ, көп емес	± 8	± 9	$\pm 0,25$	± 50
$R_{ахОК}$, МОм, аз емес	1	0,4	30	10

Қуаттау көзінің ЭҚК-ң $E = 10$ В типтік мәні үшін (15.10) өрнегін ескере отырып, шығыс каскадты транзистордың қанығуы $U_{\text{кп.кан}} = E/K_{\text{ухОК}}(0) = \pm(0,1 - 1)$ мВ кезінде жүзеге асады. $U_{\text{кп}}$ кернеуінің одан әрі ұлғаюы шығыстағы кернеу өзгерісін тудырмайды.

Бос жүріс режиміндегі $K_{\text{ухОК}}(0)$ нөлдік жиіліктегі ОК кернеуінің күшею коэффициентінің, f_1 бірлік күшею жиілігінің, номиналды қуаттау кернеуіндегі ОК шығысындағы максималды тұрақты $U_{\text{шығ.мах}}$ кернеуінің және $R_{\text{кп.ОК}}$ кіріс кедегісінің мәндері анықтамалықтарда көрсетіледі.

Анықтамалықтарда тізілген мәндерден басқа ОК-ң басқа да параметрлерінің мәндері көрсетіледі (15.2-кесте):

- шығыстағы кернеу нөлге тең кезде $U_{\text{кп}}$ кірістегі ең жоғары тұрақты жылжу кернеуі;
- $I_{\text{кпОК}}$ терістемейтін және терістейтін кірістер бойынша тұрақты ток және осы токтардың айырымы $\Delta I_{\text{кпОК}}$;
- $K_{\text{ос.сф}}$ синфазалық кернеулердің бәсеңсу коэффициенті;
- $\pm E$ номиналды кернеу мен $I_{\text{кп}}$ қуаттау тогы;
- $R_{\text{ж}}$ жүктеме тідбегінің минималды рұқсат етілген кедергісі.

Идеалды операциялық күшейткіш. $U_{\text{кп.кан}}$ қанығу кернеуінің төмен мәндерін елемей, *идеалды ОК* ұғымын енгіземіз, оның бос жүріс режиміндегі кернеуінің күшею коэффициенті, кіріс және шығыс кедергілері жиілікке тәуелді болады және мына мәндерден тұрады:

$$\boxed{K_{\text{ухОУ}} \rightarrow \infty; \quad R_{\text{вхОУ}} \rightarrow \infty; \quad R_{\text{выхОУ}} = 0,} \quad (15.11a)$$

яғни, терістемейтін және терістейтін кірістердің арасындағы потенциалдардың айырымына тең кернеу және сигналдар күшеюінің *сызықтық* режиміндегі идеалды ОК кірісіндегі ток нөлге тең:

$$\boxed{u_{\text{вхОУ}} = v_{\text{ин}} - v_{\text{и}} = u_{\text{вых}}/K_{\text{ухОУ}} = 0; \quad i_{\text{вхОУ}} = u_{\text{вхОУ}}/R_{\text{вхОУ}} = 0,} \quad (15.11b)$$

ал оның терістемейтін және терістейтін кірістер бойынша табыстама сипаттамалары $R_{\text{ж}} > 0$ жүктеме тізбегінің кез келген кедергісінде 15.16, б суретіндегі 1 және 2-сынық сызықтар сияқты болады.

Идеалды ОК-ң қанығу режимінде, яғни *сызықтық емес* режимде $u_{\text{кп.ОК}} \neq 0$, ал ток $i_{\text{кпОК}} = 0$.

Бұдан әрі ОК кірісіндегі кернеу астындағы электрондық құрылғыларды талдау кезінде $u_{\text{кпОК}} = v_{\text{ин}} - v_{\text{и}}$, және $u_{\text{кпОК}} = v_{\text{и}} - v_{\text{ни}}$, схемаларда кернеудің оң бағытын нұсқармен көрсете отырып түсінетін боламыз.

Егер ОК сигналдар күшеюінің сызықтық режимінде қолданылса,

онда оны 15.14, *а* суретіндегі шартты белгімен пайдаланамыз, ал егер сызықтық емес режимде қолданылса, онда 15.14, *б* белгімен пайдаланамыз. 15.14. *б* суретінде қанығу режиміндегі идеалды ОК шығысындағы кернеулер мен E немесе $-E$ қуаттау көздерінің тепе-теңдігін түсіндіреді.

15.6. КҮШЕЙТКІШТЕРДЕГІ КЕРІ БАЙЛАНЫС

Күшейткіштегі *кері байланыс* (КБ) деп энергия бөлігін шығысынан кірісіне беруді айтады.

Кері байланыс күшейткіштің күшею коэффициентін азайтса *теріс* болады, кері жағдайда *оң* болады.

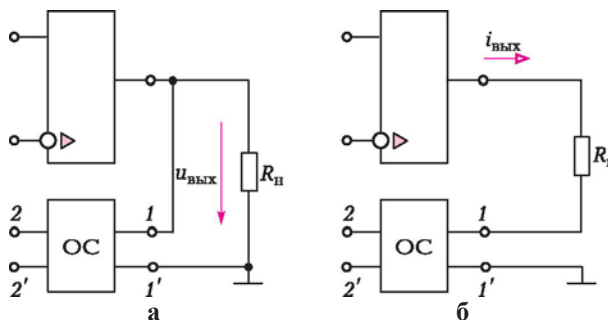
Кері байланыстар мақсатты құрылса *пайдалы*, өздігінен туындаса *паразитті* (зиянды) болады.

Орналасу орны бойынша кері байланыстар күшейткіш каскад тізбегінің ішінде жүзеге асырылған жағдайда *ішкі* және олардың тізбектері күшейткіш каскадты сырттан қамтыған жағдайда *сыртқы* болуы мүмкін.

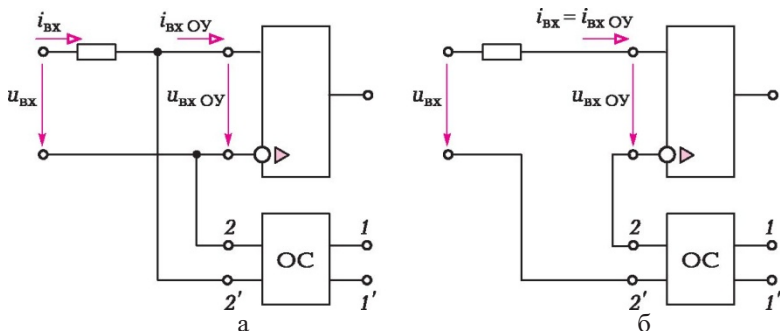
Жалпы сыртқы КБ тізбегі өз шықпаларымен ОК-ң шығыс және кіріс тізбектеріне қосылатын пассивті төрт полюсті құрылым болып есептеледі.

КБ төрт полюсті құрылымының $1 — 1'$ кіріс шықпаларының қосылу тәсілі бойынша кері байланыс *кернеу* бойынша және *ток* бойынша деп бөлінеді (15.17-сурет, *а* және *б*), оның $2 — 2'$ шығыс шықпаларының қосылу тәсілі бойынша *параллель* және *тізбектей* болып бөлінеді (15.18-сурет, *а* және *б*).

Жалпы кері байланысты күшейткіштегі кернеу мен ток және ОК кірісіндегі аттас шамалар сәйкес келмейтінін атап өтеміз.



15.17-сурет



15.18-сурет

Оң КБ күшейткіштерде мүлдем қолданылмайды, бірақ әртүрлі тектегі синусоидалық тербеліс автогенераторлары (15.9-суретті қараңыз) мен регенеративтік құрылғылар (15.6-суретті қараңыз) жұмысының негізінде жатыр.

Теріс КБ күшейткіштерде өте кеңінен пайдаланылады. Ол әртүрлі функционалдық мақсаттағы құрылғыларды құруға мүмкіндік береді, сондай-ақ күшейткіштердің параметрлерін жақсартады: шығыс кедергісінің мәнін азайтады, $f_{\text{шек}}$ шекаралық жиілігінің мәнін, сәйкесінше, сигналдар күшеюінің $0 \leq f \leq f_{\text{шек}}$ жиіліктер жолағын ұлғайтады, шығыстағы кернеудің сызықтық емес бұрмалануын және күшейткіш параметрлері мәндерінің тұрақсыздандырғыш факторларға (әдетте температураға) тәуелділігін азайтады.

Теріс кері байланыстың пайдалы қасиеттеріне күшейткіш кернеуінің күшею коэффициентінің мәндерін азайту арқылы жетеді. Алайда, бұл айтарлықтай маңызға ие емес, себебі ОК кернеуінің меншікті күшею коэффициенті өте жоғары болып табылады (15.10).

15.7. ТЕРІС КЕРІ БАЙЛАНЫСТЫ КҮШЕЙТКІШТЕР

ОК негізіндегі теріс кері байланысты күшейткіштердің мысалдарын, оларды идеалды деп алып, қарастырамыз (15.11).

Терістемейтін күшейткіш. Терістемейтін күшейткіште (15.19-сурет) кернеу бойынша тізбектей теріс КБ пайдаланылады. Бұдан әрі кері байланыстың төрт полюсті құрылымының орнына күшейткіштер схемаларында оны алмастыру схемаларының эле-

менттерін ғана көрсететін боламыз.

Кирхгофтың 1-контурға арналған екінші заңы бойынша теңдеуден:

$$u_{\text{о.с}} - u_{\text{о.с}} = u_{\text{вх}} \ominus u_{\text{вх}} = 0,$$

мұндағы кернеу

$$u_{\text{о.с}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{о.с}}} u_{\text{вх}}$$

тізбектей теріс кері байланысты сипаттайды, терістемейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулердің арасындағы

$$u_{\text{вх}} = \frac{R_1 + R_{\text{о.с}}}{R_1} u_{\text{вх}} \quad (15.12)$$

қатынас шығады:

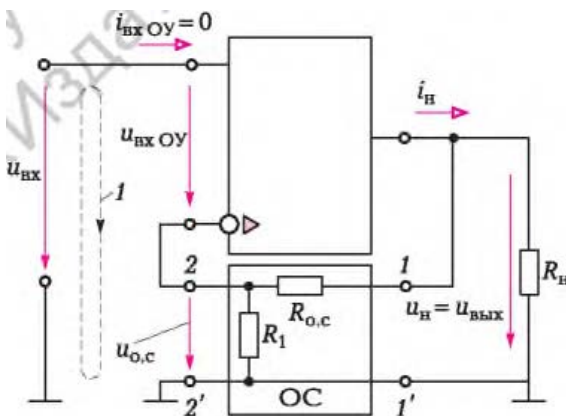
Терістемейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулердің полярлылығы сәйкес келеді, ал кернеудің күшею коэффициенті мынаған тең:

$$K_u = \frac{R_1 + R_{\text{о.с}}}{R_1} \quad (15.13)$$

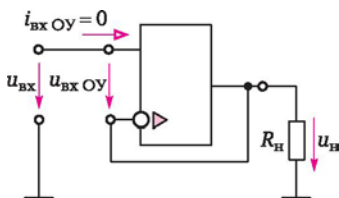
Идеалды ОК негізіндегі терістемейтін күшейткіштің кіріс және шығыс кедергілері мынаған тең:

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{вх}} = 0, \\ R_{\text{вх}} = \infty. \end{array} \right\} \quad (15.14)$$

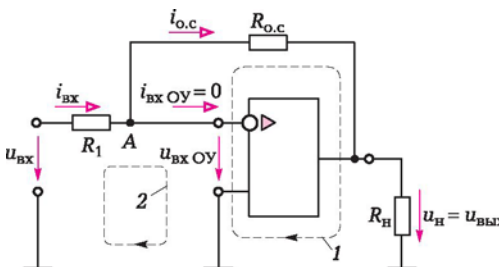
Кернеу қайталағышы. $R_1 \gg R_{\text{о.с}}$ шартын орындаған жағдайда (15.13) терістемейтін күшейткіш кернеуінің күшею коэффициентінің мәні бірлікке жақындайды. Шекті жағдайда ($R_1 \rightarrow \infty$; $R_{\text{о.с}} \rightarrow 0$) терістемейтін күшейткіш $u_{\text{н}} = u_{\text{кп}}$ кернеу қайталағышына түрленеді.



15.19-сурет



15.20-сурет



15.21-сурет

Терістейтін күшейткіш. Терістейтін күшейткіште кернеу бойынша параллель теріс кері байланыс пайдаланылады, ал сигнал көзі мен R_1 және $R_{\text{о.с}}$ кедергілі кері байланыстың тізбектері операциялық күшейткіштің терістейтін кірісіне қосылады (15.21-сурет).

Кирхгофтың бірінші (A түйініне арналған) және екінші (1 және 2-контурларға арналған) заңдары бойынша теңдеулер жүйесін құрастырамыз:

$$\left. \begin{aligned} i_{\text{к.б}} - i_{\text{к.р}} = i_{\text{к.р.ОК}} = 0; \\ R_{\text{к.б}} i_{\text{к.б}} + u_{\text{н}} = u_{\text{к.р.ОК}} = 0; \\ u_{\text{к.р}} - R_1 i_{\text{к.р}} = u_{\text{к.р.ОК}} = 0; \end{aligned} \right\} \quad (15.15)$$

мұндағы $i_{\text{к.б}}$, $i_{\text{к.р}}$, $i_{\text{к.р.ОК}}$ — кері байланыс тізбегіндегі, терістейтін күшейткіш кірісіндегі және ОК кірісіндегі ток.

(15.15) теңдеулер жүйесінен терістейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулердің арасындағы қатынас және оның кіріс кедергісі шығады:

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{вых}} &= -\frac{R_{\text{о.с}}}{R_1} u_{\text{вх}}; \\ R_{\text{вх}} &= u_{\text{вх}} / i_{\text{вх}} = R_1. \end{aligned} \right\} \quad (15.16)$$

Терістейтін күшейткіштің кірісі мен шығысындағы кернеулер әртүрлі полярлылыққа ие, ал олардың абсолюттік мәндерінің қатынасы кернеудің күшею коэффициентін анықтайды:

$$K_u = \frac{R_{\text{о.с}}}{R_1}. \quad (15.17)$$

Терістейтін күшейткіштің шығыс кедергісі терістемейтін күшейткіштегі сияқты (15.14) төмен.

Таңдаушы күшейткіш. Таңдаушы күшейткіште (15.22-сурет, а) кернеу бойынша параллель теріс кері байланыстың тізбегі резонанстық бөгеуіш сүзгіден тұрады (4.42, а суретін қараңыз). $u_{\text{кiр}}$ синусоидалық кернеуінде күшейткішті есептеу үшін кешенді әдісті қолданамыз.

Токтың тұрақты және айнымалы құраушыларын бөлу үшін кері байланыс тізбегіне C_1 жоғары сыйымдылықты конденсатор қосылған, оның X_{C1} кедергісін елемеге болады.

(15.16) теңдеудегі $u_{\text{кiр}}$ және $u_{\text{шығ}}$ кернеулерін кешенді $\dot{U}_{\text{кiр}}$ және $\dot{U}_{\text{шығ}}$ кернеулерімен, ал $R_{\text{к.б.}}$ теріс кері байланыс кедергісін бөгеуіш сүзгінің кешенді кедергісімен алмастырып:

$$\underline{Z} = \frac{jX_L(-jX_C)}{jX_L - jX_C} = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC}$$

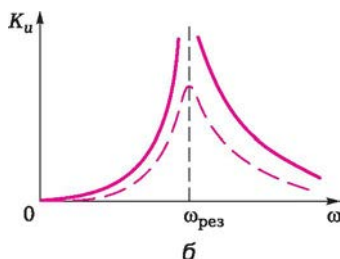
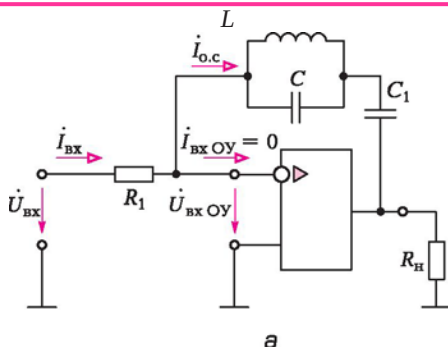
таңдаушы күшейткіш кернеуі күшеюінің кешенді коэффициентін:

$$\underline{K}_u = K_u(\omega) e^{j\theta_u(\omega)} = \frac{\dot{U}_{\text{ш}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = -\frac{\underline{Z}}{R} = \frac{-j\omega L}{(1 - \omega^2 LC)R_1}$$

және оның амплитудалық-жиіліктік сипаттамасын табамыз:

$$K_u(\omega) = \frac{\omega L}{|(1 - \omega^2 LC)R_1|} \quad (15.18)$$

Резонанстық бұрыштық $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC}$ жиілігінде (15.22, б суретінде — үздіксіз сызық) кернеудің күшею коэффициентінің мәні $K_u \rightarrow \infty$. Нақты резонанстық бөгеуіш сүзгідегі энергия шығынын ескеретін болсақ, таңдаушы күшейткіштің АЖС-ы идеалды күшейткіштен өзгешеленетін болады (15.22, б суретінде — штрих сызық).



15.22-сурет

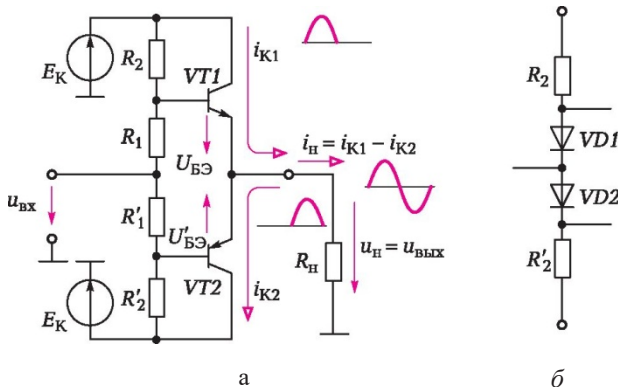
Кері байланыс тізбегінде бөгеуіш RC -сүзгісін пайдалану (4.43, *a* суретін қараңыз) балама нәтижелерге әкеледі. Алайда RC -сүзгілері практикада қолданғанға жеңіл, сондықтан көп жағдайда резонанстық бөгеуіштерге қарағанда дұрысырақ болады. Мұндай ОК негізіндегі сүзгілерді *активті RC -сүзгілер* деп атайды.

15.8. ҚУАТ КҮШЕЙТКІШТЕР

Қуат күшейткіш әдетте сигнал күшейткіш тізбегіндегі соңғы каскад болып табылады. Оның шығысына жоғары қуатты қабылдағыш қосылады. Сондықтан қуат күшейткіштің маңызды параметрлерінің бірі оның ПӘК-і болып табылады.

Синусоидалық және басқа да қос полярлық сигналдарды күшейту үшін ең жоғары ПӘК-ке қос тактілі қуат күшейткіш ие, оның төмен шығыс кедергілі эмиттерлік қайталағыштар (15.2-бөлімшені қараңыз) негізіндегі типтік схемасы 15.23, *a* суретінде келтірілген. R_1 және R'_1 резисторларындағы кернеулердің тұрақты құраушылары B және AB кластарындағы эмиттерлік қайталағыштардың (15.5-сурет, *б*) жұмысы үшін қажетті транзисторлардың эмиттерлері мен базаларының арасындағы p - n -өткелдердің жылжуын қамтамасыз етеді. Бұл ретте қуат күшейткіштің ПӘК-і мынаған тең:

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{Е}}} 100 \leq 78,5 \%,$$



15.23-сурет

мұндағы $P_E = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_K I_{K.m} \sin \omega t d\omega t = 2E_K I_{K.m} / \pi$ и $P_H = \frac{I_{H.m} U_{H.m}}{2}$ — тұрақты

E_K ЭҚК екі қуаттау көзінің және $I_{H.m} < I_{K.m}$ және $U_{H.m} < E_K$ кезіндегі жүктеме тізбегінің қуаты, ал шығыстағы кернеу $u_H = u_{шығ} = R_H(i_{K1} - i_{K2})$ формасы жағынан кірістегі синусоидалық кернеуге жақын.

Температураның өзгеруі транзисторлардың эмиттерлері мен базаларының арасындағы өткелдің шектік өткізгіштік кернеуінің мәні өзгертеді, бұл олардың үйлесімді жұмысын бұзады. Бұл құбылысты жою үшін R_1 және R'_1 резисторларының орнына шектік өткізгіштік кернеуі (13.5-суретті қараңыз) сол температуралық коэффициентке ие, тура бағытта жылжыған диодтарды қосады (15.23, б суретін қараңыз).

БАҚЫЛАУ СҰРАҚТАРЫ

1. Биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың үш негізгі типін атаңыз.
2. A және B кластарындағы күшейткіштердің негізгі айырмашылықтары неде?
3. Далалық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың үш негізгі типін атаңыз.
4. Тұрақты токтың күшейткіш дифференциалды каскады неге электрлік бөгеуілдерді (атмосфералық, желілік және т.б.) күшейтпейді?
5. Операциялық күшейткіштердің кіріс және шығыс кедергілері мен кернеу күшею коэффициенті мәндерінің тәртібі қандай?
6. Идеалды операциялық күшейткіштің қасиеттерін атаңыз.

ӨЗІНДІК ШЫҒАРУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТЕР

1. Терістемейтін күшейткіштің (15.19-суретті қараңыз) кернеуінің күшею коэффициенті $R_L = 1,5$ кОм кедергісінде $K_u = 50$ -ге теңесу үшін оның кері байланыс тізбегінің $R_{к.б.}$ кедергісі қандай болуы тиіс?

Жауабы: 74,5 кОм.

2. Терістейтін күшейткіштің (15.21-суретті қараңыз) кіріс кедергісі элемент параметрлерінің мынадай мәндерінде неге тең: $R_1 = 1$ кОм, $R_{к.б.} = 10$ кОм, $R_H = 2$ кОм, ОК идеал?

Жауабы: 1 кОм.