

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІ

Автоматика және ақпараттық технологиялар институты
«Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы



SATBAYEV
UNIVERSITY

№7 ДӘРІС

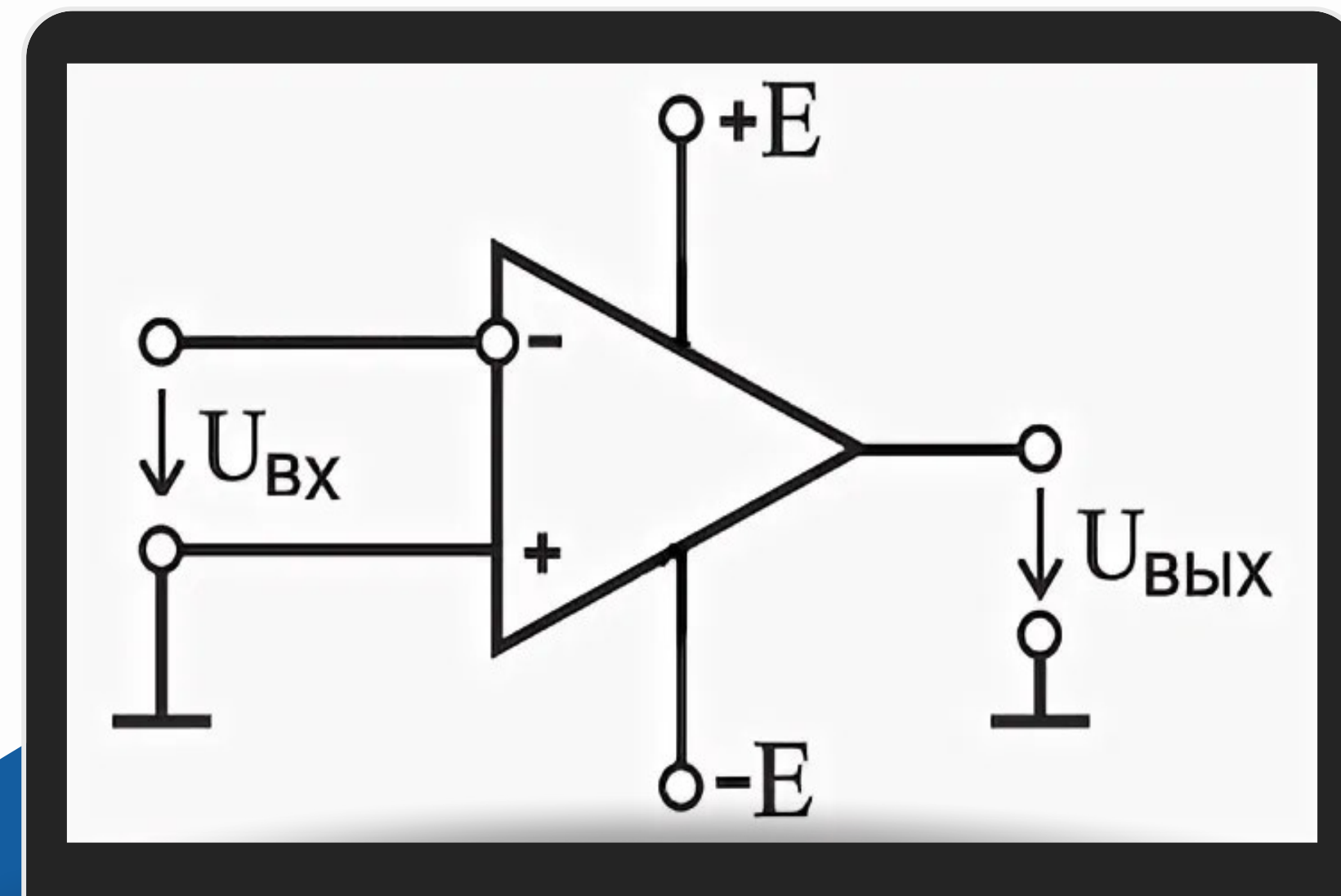
Тақырыбы: «Операциялық күшейткіштер және олардың қолданылу схемалары»

Оқытушы: Хабай А.

ELC5511 «Электроника және схемотехника»

Алматы 2025 ж.

Операциялық күшейткіштер және олардың қолданылу схемалары



Дәрістің мақсаты мен міндеттері



1. Операциялық күшейткіштердің негізгі қасиеттерін түсіндіру;
2. Дифференциалдық күшейткіштің жұмыс принципін талдау;
3. Операциялық күшейткіштің инверттейтін және инверттелмейтін конфигурацияларын қарастыру;
4. Интегратор, дифференциатор, қайталағыш сияқты негізгі функционалдық буындарды түсіндіру;
5. Белсенді сүзгілердің бірінші және екінші ретті түрлерін талдау;
6. Логарифмдік күшейткіш, дәлдікті түзеткіш және басқарылатын көздер схемаларын мысал арқылы түсіндіру;
7. Ор-Амр негізіндегі практикалық схемалардың электроникадағы маңызын көрсету.

Мазмұны

1. Кіріспе
2. Операциялық күшейткіштер және олардың негізгі қасиеттері
3. Дифференциалдық немесе айырмашылық енгізу сигналы
4. Операциялық күшейткіштер амплуадағы желілік құрылғылардың схемалары
5. Инверттейтін операциялық күшейткіш
6. Инверттелмейтін операциялық күшейткіш
7. Түрлендіргіш қосқыш
8. Қорытынды
9. Бақылау сұрақтары

Кіріспе

Операциялық күшейткіштер (Op-Amp) — қазіргі заманғы аналогтық және цифрлық электрониканың ең негізгі элементтерінің бірі. Олар өте жоғары кіріс кедергісі мен өте төмен шығыс кедергісіне ие, сондықтан әлсіз сигналдарды өңдеуде, математикалық операцияларды орындауда, сүзгілерде, генераторларда, өлшеу аспаптарында және басқару жүйелерінде кеңінен қолданылады.

Бастапқыда аналогтық есептеуіш машиналарда математикалық операциялар (қосу, азайту, интегралдау, дифференциалдау) орындау үшін жасалғандықтан, «операциялық күшейткіштер» атауы берілген.

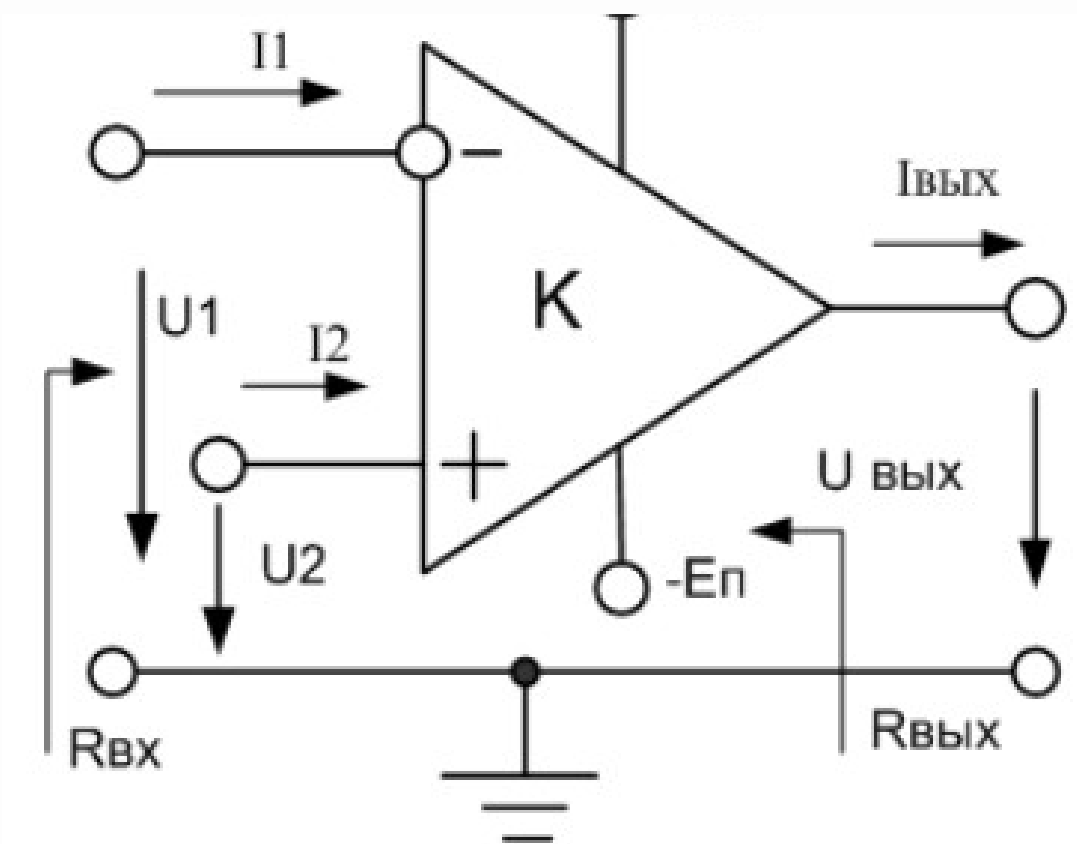
Операциялық күшейткіштер және олардың негізгі қасиеттері

Операциялық күшейткіштер (Оп-амп) — бұл интегралдық схемалар, олар 0-ден жүздеген килогерцке (кейбір жағдайларда мегагерцтерге) дейінгі жиілік диапазонында кем дегенде бірнеше мыңға тең күшейту коэффициентін (KU) қамтамасыз етеді. Оп-амптар тұрақты ток кернеуін күшейте алады, сондықтан бұрын оларды тұрақты ток күшейткіштері (ТТК) деп атаған.

Операциялық күшейткіштер — бұл кіріс кедергісі өте жоғары және шығыс кедергісі өте төмен болатын дифференциалдық күшейткіштер. Олар сигналдардың амплитудасы мен полярлығын өзгерту, бірнеше сигналдармен математикалық операцияларды орындау, белсенді сүзгілер, осцилляторлар және жоғары дәлдікті әртүрлі аспаптардың схемаларында қолданылады.

Әрбір операциялық күшейткіш бірнеше күшейткіш сатылардан тұрады, бұл оның жоғары сигналды күшейту қабілетін қамтамасыз етеді.

ЕІ символы фиг. 4.1. (-) белгісімен көрсетілген 1-енгізу терістеу деп аталады. (+) белгісімен көрсетілген 2-енгізу терістеу емес деп аталады. +Еп және -Еп қоректендіру электр тізбектерінің диаграммаларында жиі көрсетілмейді. Шығыс кернеуі:



4.1-сурет, ОК белгілеу

Дифференциалдық күшейткіш

Операциялық күшейткіштері құрамына арнайы кіріс сатысы — дифференциалдық күшейткіш (тұрақты ток күшейткіші) кіреді. Дифференциалдық күшейткіштер екі сигналдың арасындағы айырмашылықты күшейту үшін кеңінен қолданылады.

Қарапайым дифференциалдық күшейткіштің моделі 4.5-сурет. Дифференциалдық күшейткіште T1 және T2 бірдей күшейткіш транзисторлары пайдаланады. Шығу сигналы $U_{\text{шығ}} = U_{\text{шығ}2} - U_{\text{шығ}1}$ және 2 транзисторларының коллекторларынан алынады. T1 транзисторын енгізу терістеуге жатпайды. T2 транзисторын енгізу терістеу болып табылады. Шығарынды схемаларындағы R1 және R2 кедергілері басқару пультінің кіріс кедергісін арттырады. T3 транзисторы тұрақты ток көзі е I қызметін атқарады. R4-R7 биязылық контуры T3 транзисторының негізінде -12,55В кернеу жасайды. R3 резисторы бойынша кернеу 2В, ал ток:

$$I_3 = I_{31} + I_{32} = 2mA = const.$$

Дифференциалдық күшейткіштің кірмелері $f=1кГц$ жиілігімен және 1В амплитудасымен синус-идеалды сигнал генераторларының кілттерімен жалғанады:

Генератор VG1 создает сигнал $u_{\text{кп}1}(t) = 1 \cdot \sin(2\pi f + 0^\circ)В$

Генератор VG2 создает сигнал $u_{\text{кп}2}(t) = 1 \cdot \sin(2\pi f + 180^\circ)В$

Сигналдардың екі түрі дифференциалдық күшейткіштің кірмелеріне әрекет ете алады:

- Дифференциалдық сигналдар (фазадан тыс).
- Жалпы режим (фазада сәйкестік).

Нәтижесінде шығу кернеуі пайда болады Шығыс кернеуі пайда болады

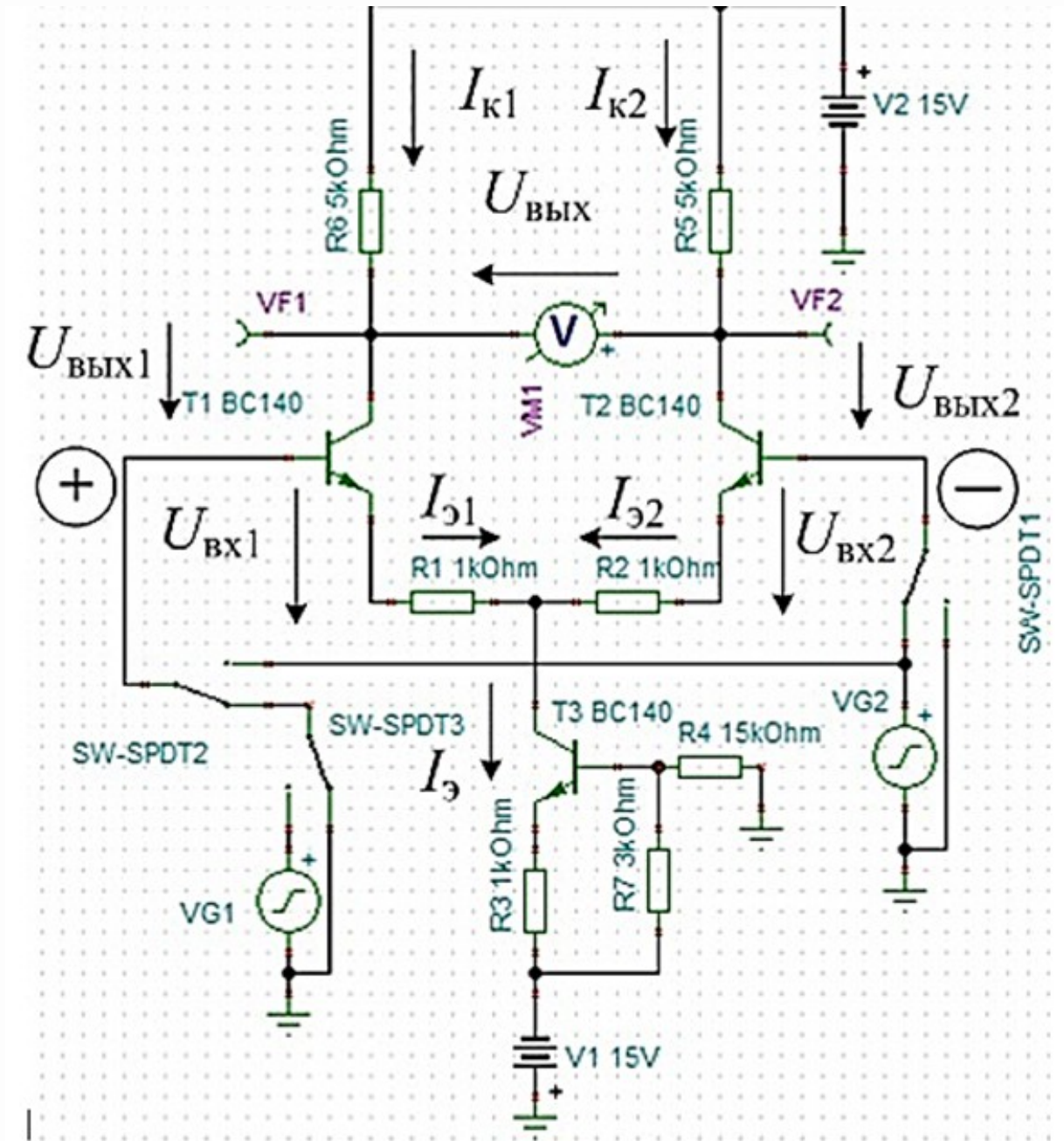
$$U_{\text{шығ}} = U_{\text{шығ}2} - U_{\text{шығ}1} = -K_2 U_{\text{кп}2} - (-K_1 U_{\text{кп}1}),$$

мұндағы: K_1, K_2 - бірінші және екінші транзисторлар бойынша сатылардың пайда факторлары. $K_1 = K_2 = K$ деп жорамалдайық, содан кейін $U_{\text{шығ}} = K(U_{\text{кп}1} - U_{\text{кп}2})$

Келесі жағдайларды қарастырайық:

А. Фазаға қарсы дифференциалдық сигналдар: $U_{\text{кп}1} = -U_{\text{кп}2}$

Дифференциалдық сигнал деп аталады: $U_{\text{диф}} = \frac{U_{\text{кп}1} - U_{\text{кп}2}}{2}$



Бұл жағдайда сигнал шығарушы токтар $e1$ I және $e2$ I де фазадан шығып, бір-бірінен бас тартады. Қазіргі e I көзі тұрақты және пайдаға әсер етпейді.

Пайда резистивті күшейткіште де кездеседі:

$$K_1 = K_2 = K_{\text{диф}} = \frac{R_K}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}} \quad (4.1)$$

VM1 вольтметрімен өлшенетін шығыс сигналы:

$$U_{\text{шығ}} = -\frac{R_K}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}} (U_{\text{кпр2}} - U_{\text{кпр1}}) = 2 U_{\text{диф}} \frac{R_K}{R_{\text{Э}} + r_{\text{Э}}} \quad (4.2)$$

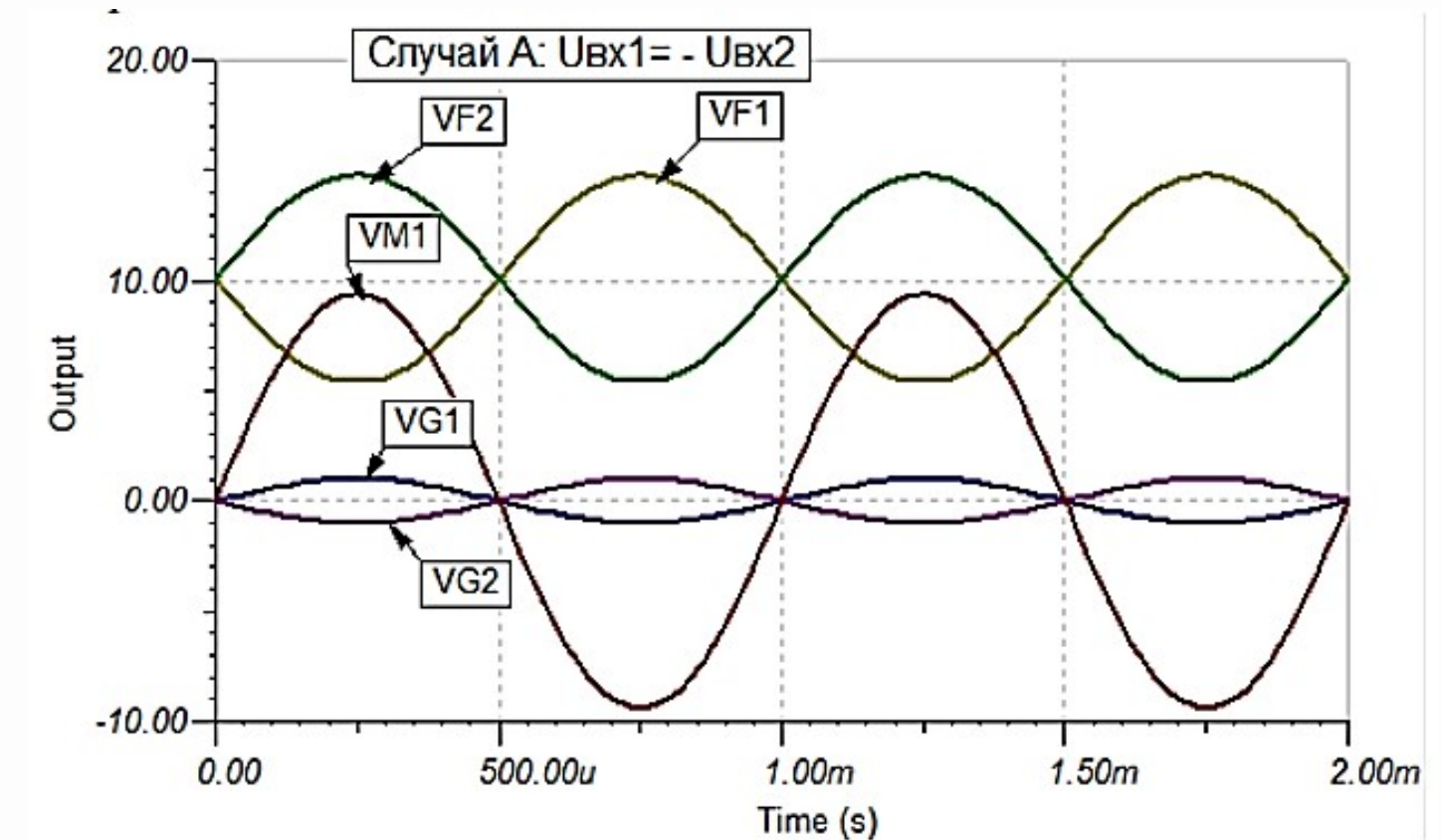
Естеріңізге сала кетейік, базистік-эмиттерлік түйіскен жердің дифференциалды кедергісі $R_{\text{Э}} \approx \frac{25\text{mV}}{I_{\text{Э}}}$ құрайды. Диаграммада 4.5-суретте $\frac{25\text{mV}}{I_{\text{Э}}} I_{\text{Э}} \approx 1\text{mA}$, $r_{\text{Э}} \approx 250\text{m}$.

Сондықтан шығу сигналы 10В-тан сәл кем болады.

Бір мәрте VF2 шығарылымы бойынша пайда екі есе көп:

$$K_{\text{нс}} = K_{\text{диф}} / 2$$

Фазадан тыс сигналдардың жағдайы үшін кернеу диаграммалары 4.6-суретте көрсетілген



4.6-сурет Фазадан тыс сигналдарға арналған кернеу диаграммалары

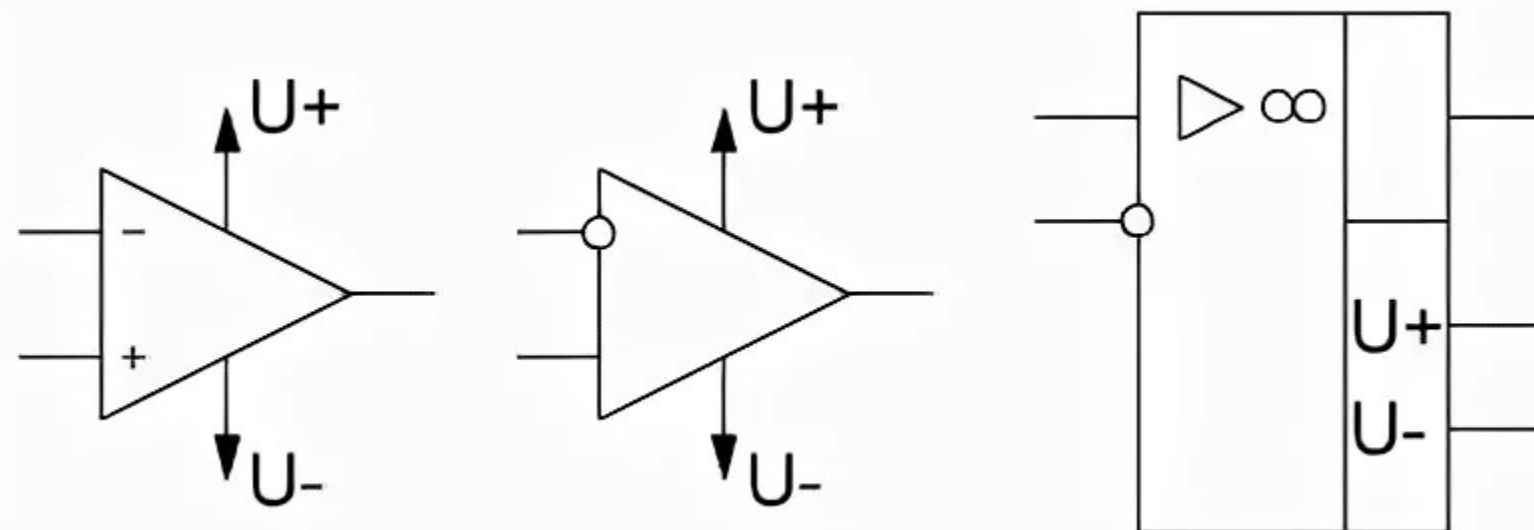
Дифференциалдық немесе айырмашылық енгізу сигналы

Дифференциалдық немесе айырмашылық енгізу сигналы қалыпты немесе пайдалы енгізу сигналы деп те аталады. Жаксы дифференциалдық күшейткіштің жалпы режимдік аттенуация коэффициенті (жалпы режимдік сигналды басу коэффициенті CMR) жоғары болады. Бұл коэффициент пайдалы және жалпы режимді енгізу сигналдарының бірдей амплитудасы болған жағдайда шығу пайдалы сигналының жалпы режимдік сигналға қатынасы болып табылады. Әдетте CMR децибелмен анықталады. Жалпы режимдегі енгізу диапазонында кіру сигналы өзгеріп отыруы тиіс рұқсат етілген кернеу деңгейлері көрсетіледі. Шу фонында әлсіз сигналдар жоғалуы мүмкін жағдайларда дифференциалдық күшейткіштер қолданылады. Мұндай сигналдардың мысалдары ұзын кәбілдер арқылы берілетін сандық сигналдар (кабель әдетте екі ширатылған сымнан тұрады), аудиосигналдар, радиКБиілік сигналдары (екі ядролы кабель дифференциалдан тұрады), электрокардиограмма кернеулері, магниттік жадтан ақпаратты оқуға арналған сигналдар және т.б. Кәбілдер мен екі сымдық сигнал беру желілеріне сыртқы электромагниттік өрістер кедергі келтіреді. Бұл кедергілер жалпы режимде болады және дифференциалды күшейткіште аттенуацияланады. Жалпы режимдегі сыртқы кедергіні басу арқылы қабылдау ұшындағы дифференциалды күшейткіш қажетті сигналды қалпына келтіреді.

Операциялық күшейткіштер амплуадағы желілік құрылғылардың схемалары

Қазіргі заманғы операциялық күшейткіштер (оп-амптар) жинақы интегралдық схемалар (ИС) түрінде шығарылады. Әрбір интегралдық схема құрылымында бірнеше операциялық күшейткіш болуы мүмкін, бұл электрондық құрылғылардың жинақылығын, тиімділігін және үнемділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Операциялық күшейткіштер электроника мен схемотехника саласында кеңінен қолданылады. Олар әртүрлі құрылғылардың жұмыс істеуін қамтамасыз етіп, пайдалы және үнемді электрондық жүйелер жасауға мүмкіндік береді. Бұл бөлімде оп-амптардың маңызды қосымшаларының схемалары мен олардың жұмыс принциптерін қарастыратын боламыз.



Инверттейтін операциялық күшейткіш

Инверттейтін операциялық күшейткіш — бұл операциялық күшейткіштің конфигурациясы, онда кіріс сигнал инверттелетін кіріске (–) беріледі, ал инверттелмейтін кіріс (+) жерге қосылады. Бұл күшейткіштің басты ерекшелігі — кіріс сигналдың фаза бойынша 180°-қа инверттелуі (кері айналуы).

Инвертті операциялық күшейткіштер (4.9-сурет) инвертті емес енгізу $\underline{U}_2$ жерге қосылады. Инвертті оп-тың сұлбасы сызықты болғандықтан, кернеулер мен токтардың күрделі тиімді мәндерін талдаймыз, содан кейін алынған нәтижелерді оператор түрінде ұсынамыз.

Кирхгоффың бірінші заңы бойынша идеалды оп объектінің қасиеттерін ескере отырып, ағымдардың күрделі тиімді мәндері үшін теңдеуді аламыз:

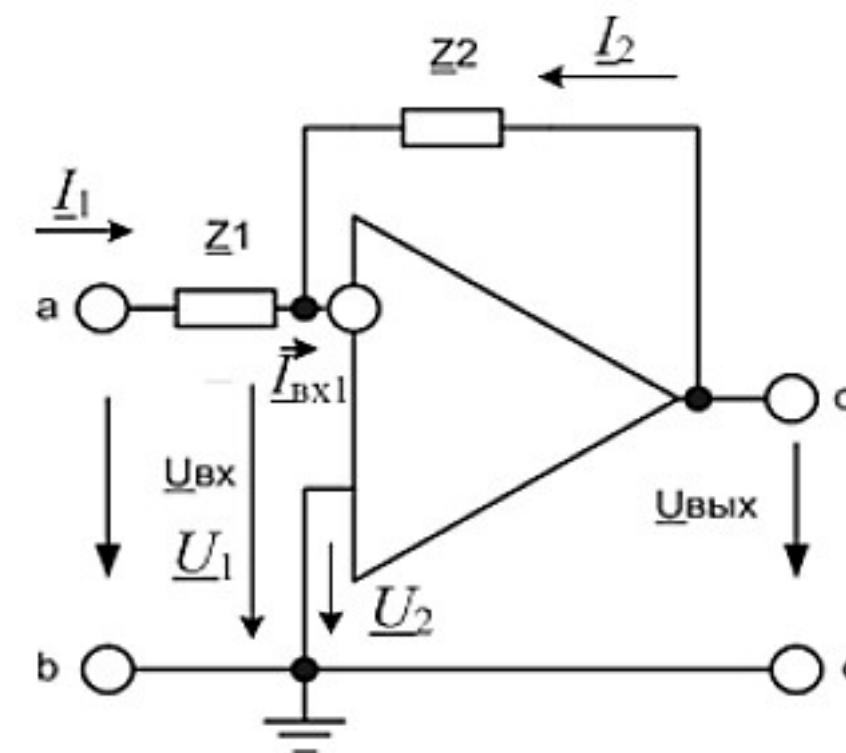
$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{I}_{\text{кпр1}} = 0$$

Инвертті емес енгізу жерге қосылғандықтан ($\underline{U}_2=0$), ал енгізулер арасындағы кернеу виртуалды нөлге ($\underline{U}_1 = \underline{U}_y=0$) тең болғандықтан аламыз:

$$\frac{\underline{U}_{\text{кпр}} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{U}_{\text{шығ}} - \underline{U}_1}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{U}_{\text{кпр}}}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{U}_{\text{шығ}}}{\underline{Z}_2} = 0$$

Осыдан инвертті оп-амптың шығу кернеуі үшін маңызды теңдеу жүреді:

$$\underline{U}_{\text{шығ}} = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} \underline{U}_{\text{кпр}} \quad (4.5)$$



4.9-сурет. Инверттеу Оп

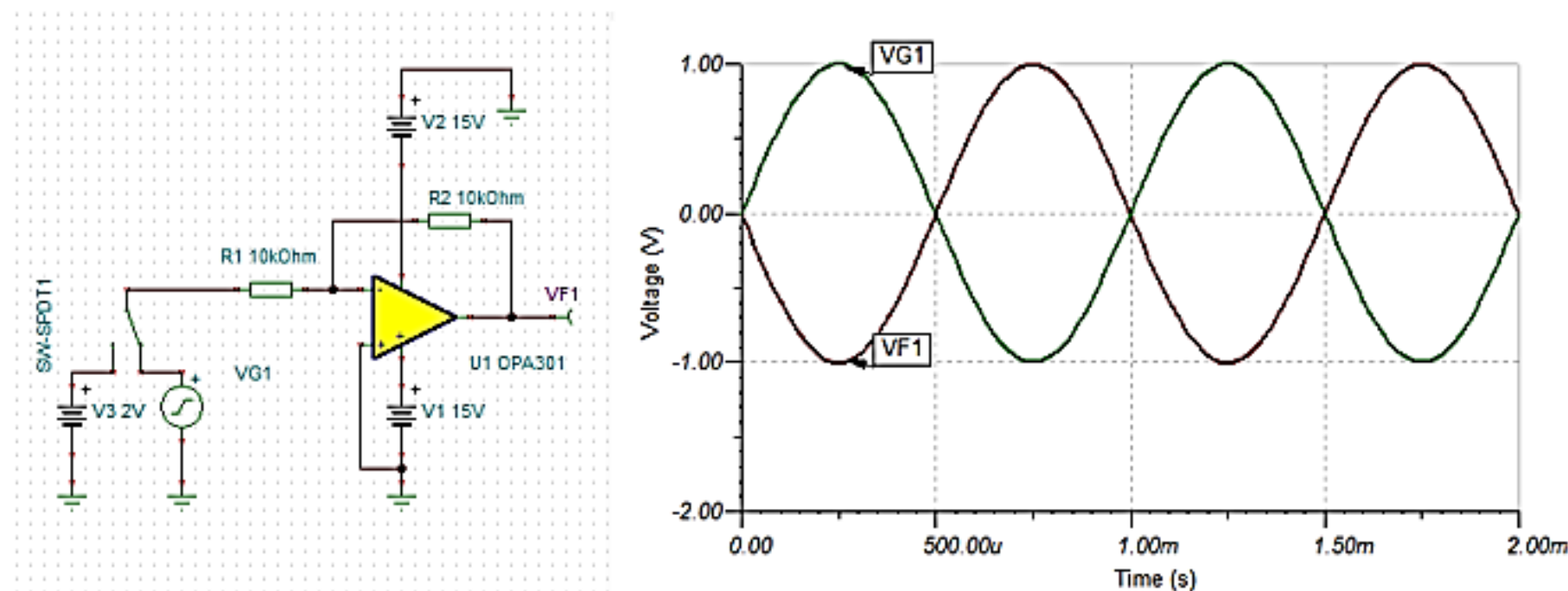
Гармоникалық сигналдар үшін теңдеуден (4.5) күрделі кернеуді беру коэффициентін аламыз:

$$\underline{K_U}(j\omega) = \frac{\underline{U}_{шығ}}{\underline{U}_{кір}} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (4.6)$$

Неғұрлым жалпы операторлық формада терістеу оп-ның трансфер функциясына теңдеуді жазайық:

$$K(p) = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)} \quad (4.7)$$

Бұл формула оп-ампы бар схемалардың жиілік қасиеттері мен өтпелі сипаттамаларын зерттеуде өте пайдалы болады.



4.10-сурет. Резистивті элементтері бар инвертті оп объектінің моделі

Инверттелмейтін операциялық күшейткіш

Инверттелмейтін операциялық күшейткіш — кіріс сигналы операциялық күшейткіштің **инверттелмейтін кірісіне (+)** беріледі, ал инверттелетін кіріс (–) сыртқы кері байланыс тізбегі арқылы шығысқа ($U_{\text{шығ-}}$) қосылады. Бұл конфигурацияда кіріс сигналы күшейтіледі және оның фазасы өзгеріссіз қалады.

Инвертті емес оп сұлбасы үшін (4.12-сурет) бізде келесі теңдеулер бар:

$$U_1 \approx U_2 = U_{\text{кір}}$$

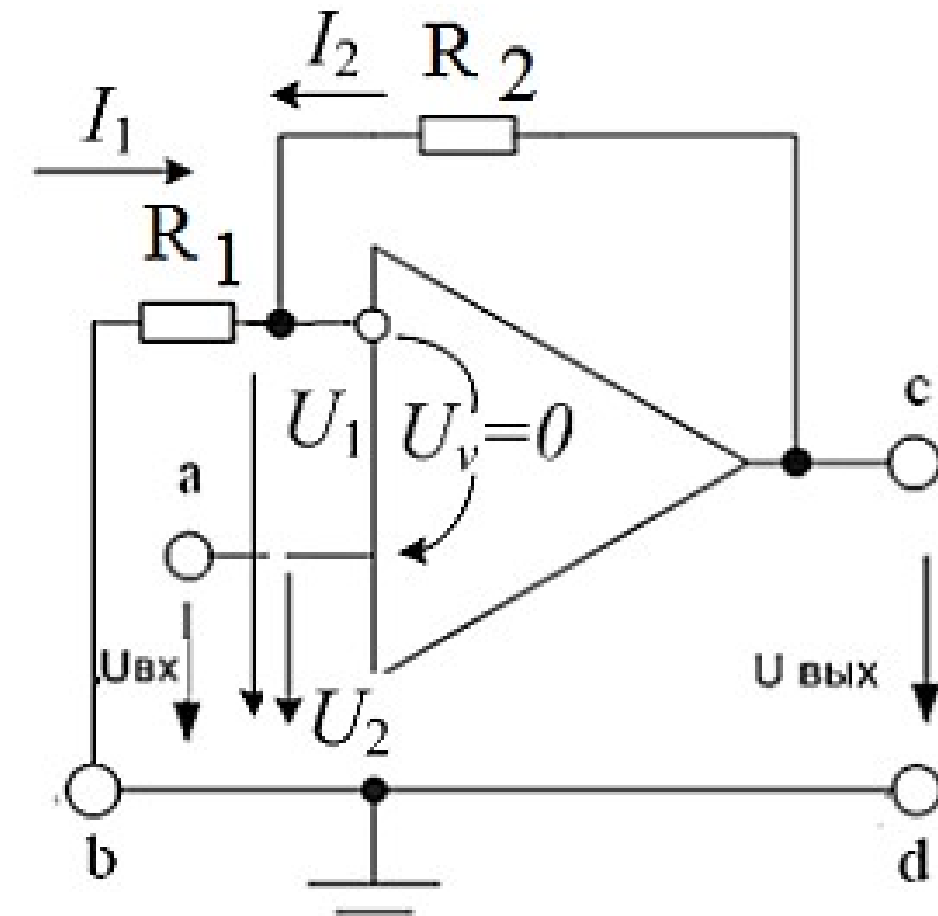
$$I_1 = \frac{0 - U_{\text{кір}}}{R_1}; I_2 = \frac{U_{\text{шығ}} - U_{\text{кір}}}{R_2}$$

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$\frac{U_{\text{шығ}}}{R_2} - \frac{U_{\text{кір}}}{R_2} - \frac{U_{\text{кір}}}{R_1} = 0$$

Осы жерден ақырғы теңдеуді аламыз:

$$U_{\text{шығ}} = U_{\text{кір}} \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (4.8)$$



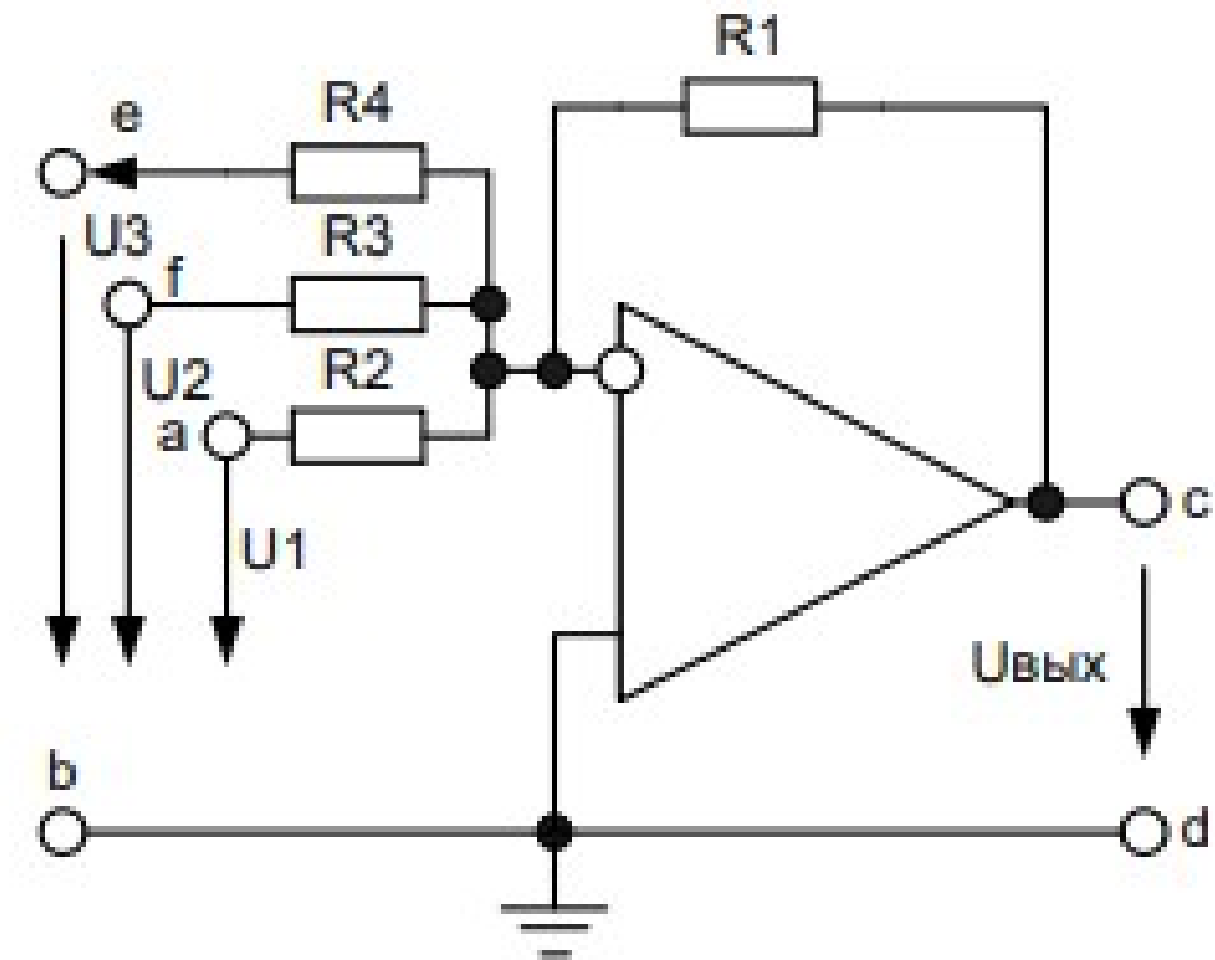
4.12-сурет инвертті емес ОК

Түрлендіргіш қосқыш

4.14-суретте терістеуші қондырманың сызбасы көрсетіледі. Шығу кернеуінің формуласы инвертті оп амп. Соның салдарынан аламыз:

$$U_{\text{шығ}} = -\left(\frac{R_1}{R_2} U_1 + \frac{R_1}{R_3} U_2 + \frac{R_1}{R_4} U_3\right) \quad (4.10)$$

Бұл схема — **дифференциалдық операциялық күшейткіш** (немесе **дифференциалды күшейткіш**), ол екі кіріс сигнал арасындағы айырмашылықты күшейту үшін қолданылады. Схема құрамында екі кіріс (U_1 және U_2) және бір шығыс ($U_{\text{шығ}}$) бар. Құрылғының күшейту коэффициенті (K) кері байланыс резисторлары (R_2 , R_3 , R , R_1) арқылы анықталады. Бұл схема көбінесе сигналдарды талдау, аралық күшейту және математикалық операциялар орындау үшін қолданылады. Дифференциалды күшейткіштің басты артықшылығы — бірдей амплитудадағы және полярлықтағы шу немесе бұзылуларды екі кірістен де бірдей деңгейде басып, тек пайдалы сигналды күшейтуге қабілеті.



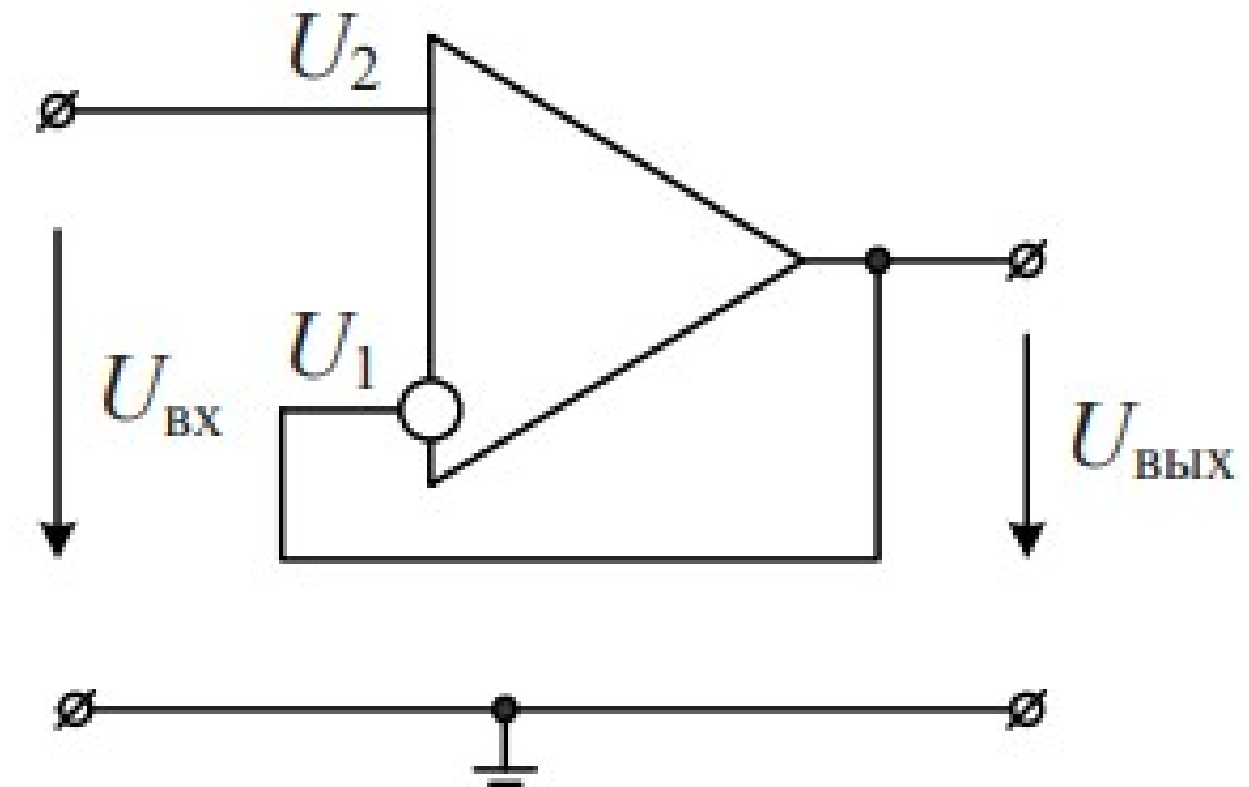
4.14-сурет Түрлендіргіш қосқыш

Кернеуді қайталаушы

Кернеуді қайталаушы — бұл операциялық күшейткіштің арнайы конфигурациясы, онда шығыс кернеуі кіріс кернеуіне тең болады ($U_{\text{шығ}} = U_{\text{кір}}$). Бұл схема кіріс сигналының кернеуін өзгеріссіз қайталайды, бірақ оның ток деңгейін күшейтеді. Мұндай конфигурацияда операциялық күшейткіштің инверттелмейтін кірісі (+) кіріс сигналына қосылады, ал инверттелетін кірісі (–) шығысқа тура жалғанады (кері байланыс).

Қайталағыштың сұлбасы 4.16-суретте келтірілген. Инвертті емес оп амплитудасында шығу кернеуінің формуласын алу үшін біз жасаймыз $R_1 = \infty$, $R_2 = 0$, сонда

$$U_{\text{шығ}} = U_{\text{кір}} \frac{R_1 + R_2}{R_1} = U_{\text{кір}} \frac{1 + \frac{0}{\infty}}{1} = U_{\text{кір}}$$



4.16-сурет Кернеуді қайталаушы

Қорытынды:

Операциялық күшейткіштер – электроникадағы әмбебап құрылғылардың бірі. Олар:

- әлсіз сигналдарды күшейтуге,
- математикалық операцияларды орындауға,
- сүзгілерді құруға,
- өлшеу және басқару жүйелерінде жоғары дәлдікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Ор-Амр-тың басты артықшылығы – олардың көпқызметтілігі мен тұрақтылығы. Қазіргі интегралдық схемаларда бір корпуста бірнеше күшейткіш орналасып, құрылғылардың ықшамдығын және қуат үнемділігін арттырады. Сондықтан операциялық күшейткіштерсіз заманауи электрониканы елестету мүмкін емес.

Бақылау сұрақтары

1. Операциялық күшейткіштің негізгі қасиеттерін атаңыз.
2. Идеалды Ор-Амр қандай шарттарға сәйкес келеді?
3. Неліктен Ор-Амр бастапқыда «операциялық» деп аталды?
4. Дифференциалдық күшейткіштің жұмыс принципін түсіндіріңіз.
5. Ор-Амр-тың инверттейтін және инверттелмейтін конфигурацияларының айырмашылығы неде?
6. Қайталағыш (buffer) Ор-Амр-тың негізгі қолданылу аймағы қандай?
7. Дифференциатор схемасы қандай математикалық операцияны орындайды?
8. Интегратордың жұмыс істеу принципін түсіндіріңіз.
9. Белсенді сүзгілердің пассивті сүзгілерге қарағанда қандай артықшылығы бар?
10. Бірінші ретті және екінші ретті белсенді сүзгілердің айырмашылығын түсіндіріңіз.
11. Логарифмдік күшейткіштің жұмыс істеу принципін түсіндіріңіз.
12. Дәлдікті түзеткіштің артықшылығы неде және ол қайда қолданылады?
13. Ор-Амр негізіндегі басқарылатын кернеу және ток көздері қайда қолданылады?
14. Ор-Амр-тың жиілік сипаттамасына қандай параметрлер әсер етеді?
15. Неге Ор-Амр заманауи электрониканың негізгі элементі болып саналады?

Назарларыңызға
рақмет!

