

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Аналогты электронды схемалар

«Өндірістік электроника және басқару жүйелері», «Радиотехника,
электроника және телекоммуникациялар» мамандықтары бойынша білім
алушы студенттерге арналған

Алматы

8 Дәріс. Операциялық күшейткіштер: идеалды модель

Дәрістің мақсаты: Операциялық күшейткіштердің жұмыс принциптерімен, олардың идеалды сипаттамаларымен және әртүрлі электронды схемалардағы практикалық қолданылуымен танысу. Операциялық күшейткіштің құрылымы, негізгі функциялары, сондай-ақ интеграторлар, дифференциалды күшейткіштер, компараторлар және сүзгілер сияқты типтік схемаларын қарастыру.

Кіріспе

Операциялық күшейткіштер (ОК) – бұл кеңінен қолданылатын электрондық компоненттер, олар көптеген құрылғылар мен жүйелерде сигналдарды күшейту үшін пайдаланылады. Операциялық күшейткіштердің идеалды моделі теориялық тұрғыда ОК жұмысын түсіну үшін негіз болып табылады. Бұл модельдер нақты күшейткіштерден айырмашылығы бар, бірақ олар көптеген жағдайларда дәл нәтижелер береді.

1. Операциялық күшейткіштер түсінігі

Операциялық күшейткіш (ОК) – бұл электрондық құрылғы, оның негізгі қызметі — екі кіріс сигналының айырмасын күшейту. Бұл құрылғының басты мақсаты — кіріс сигналдарының арасындағы қатынасты өзгерту арқылы күшті, өңделген шығыс сигналын алу. ОК көбінесе кері байланыс арқылы басқарылатын күшейткіш болып табылады, бұл оның күшейту деңгейін дәл реттеуге мүмкіндік береді.



1.1. Операциялық күшейткіштің негізгі құрылымы

Операциялық күшейткіштің негізгі құрамдас бөліктері:

❖ **Кіріс сигналдары:** Операциялық күшейткіштің екі кірісі бар — біреуі инвертирленген (минус кірісі), екіншісі инвертирленбеген (плюс кірісі). Бұл кірістер арасындағы кернеу айырмасын күшейту арқылы шығыс сигналын алуға мүмкіндік береді.

❖ **Кері байланыс:** Операциялық күшейткіштің күшейтуін басқару үшін кері байланыс қолданылады. Кері байланыс кіріс және шығыс арасындағы байланысты орнатуға және күшейту деңгейін реттеуге мүмкіндік береді. Бұл компоненттің басты ерекшелігі — кері байланыс арқылы күшейтуді нақты әрі тұрақты етіп қамтамасыз ету.

❖ Шығыс сигнал: Кіріс сигналының өзгерісіне пропорционалды түрде, күшейтілген сигнал шығады. Шығыс сигнал оның бірден-бір нәтижесі болып табылады.

1.2. Дифференциалды кіріс

Операциялық күшейткіштің негізгі ерекшелігі — оның дифференциалды кірісі. Бұл дегеніміз, ОК бір уақытта екі кіріс сигналының арасындағы айырманы күшейтеді:

❖ Инвертирленген кіріс: Бұл кіріс сигналының фаза кері болады, яғни кіріс сигналындағы оң өзгерістер шығыс сигналында теріс өзгерістерге айналады.

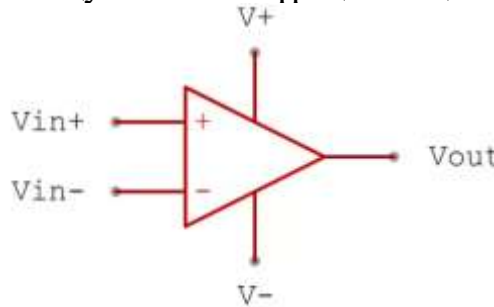
❖ Инвертирленбеген кіріс: Бұл кіріс сигналы фаза бойынша шығыс сигналына сәйкес келеді, яғни оң кіріс сигналдары шығыста оң өзгерістер тудырады.

Дифференциалды кіріс арқылы операциялық күшейткіш кез келген асимметриялық сигналдарды күшейтуге мүмкіндік береді.

1.3. Жоғары күшейту

Операциялық күшейткіштердің маңызды сипаттамаларының бірі — жоғары күшейту. Идеалды ОК-лар шексіз күшейтуге ие болады, яғни кішігірім кіріс сигналының өзі үлкен шығыс сигналына айналады. Бұл мүмкіндік көптеген тапсырмаларды орындауға, мысалы, өте әлсіз сигналдарды өңдеуге өте ыңғайлы.

Шынайы өмірде операциялық күшейткіштердің күшейтуі өте жоғары болады, бірақ ол шексіз емес. Көптеген жағдайларда ОК-лар 10^5 -тен 10^6 -ға дейін күшейтеді. Дегенмен, шынайы күшейткіштердің кейбір шектеулері бар, олар кіріс кедергісі, шығыс қуаты және тұрақтылықпен байланысты.



1.4. Операциялық күшейткіштердің негізгі қолдану аймақтары

Операциялық күшейткіштердің кеңінен қолданылатын бірнеше негізгі аймақтары бар:

1.4.1. Аналогтық сигналдарды өңдеу

Операциялық күшейткіштер аналогтық сигналдарды күшейту, сүзгіден өткізу, инверсиялау сияқты көптеген операцияларды орындау үшін пайдаланылады. ОК аналогтық жүйелерде сигналдардың сапасын жақсартуға және күшейтуге арналған маңызды құрал болып табылады.

❖ Күшейту: Әлсіз сигналдарды күшейту үшін қолданылады.

❖ Сүзгілеу: Сигналдарды қажетті жиілік спектріне сәйкес реттеу.

❖ Аналогты сигналдар: Операциялық күшейткіштер аналогтық сигналдарды реттеу үшін аса қажет.

1.4.2. Фильтрация

Операциялық күшейткіштер жиіліктерді бөлу үшін фильтрілеу құралдары ретінде қолданылады. Олар электрлік сигналдарды белгілі бір жиіліктерде өткізу немесе кейбір жиіліктерді блоктау үшін қолданылады. Әсіресе, белсенді фильтрлерде (активті фильтрлерде) кеңінен пайдаланылады, өйткені олар шағын құрамдас бөліктермен жоғары дәлдікпен сүзу жасауға мүмкіндік береді.

Фильтрация қолдану мысалдары:

❖ Басқыш фильтрлері (low-pass): төмен жиіліктерді өткізіп, жоғары жиіліктерді бөгейді.

❖ Жоғары жиілікті фильтрі (high-pass): жоғары жиіліктерді өткізіп, төмен жиіліктерді бөгейді.

❖ Жолақты фильтрлер (band-pass): тек белгілі бір жиілік аралығын өткізіп, қалғанын бөгейді.

1.4.3. Интеграторлар мен дифференциалдар

Операциялық күшейткіштер интеграторлар мен дифференциалдар ретінде қолданылуы мүмкін. Бұл қызметтер сигналдарды математикалық өңдеуді жүзеге асырады.

❖ Интеграторлар: Сигналды уақыт бойынша интегралдау операциясын орындайды. Олар кез келген енгізілген кіріс сигналын оның уақыт бойынша интегралына ауыстырады.

❖ Дифференциалды күшейткіштер: Сигналдарды уақыт бойынша дифференциалдау арқылы олардың өзгеру жылдамдығын өлшейді. Мұндай күшейткіштер жоғары жиілікті сигналдарды анықтау және өңдеу үшін қолданылады.

1.4.4. Аналогты компьютерлер

Аналогты компьютерлерде операциялық күшейткіштерді қолдану математикалық есептеулерді шешу үшін өте маңызды. Операциялық күшейткіштер аналогтық тәсілдермен дифференциалды теңдеулерді шешуге көмектеседі. Мысалы, интеграторлар мен дифференциалдар физикалық процестерді модельдеуге мүмкіндік береді, сондықтан олар аналогты есептеу жүйелерінде кеңінен қолданылады.

2. Идеалды операциялық күшейткіштің сипаттамалары

Идеалды операциялық күшейткіш (ОК) теориялық тұрғыда сипатталған құрылғы болып табылады, ол көптеген нақты өмірде кездесетін шектеулерден еркін болады. Бұл сипаттамалар ОК-ның мінсіз жұмысын қамтамасыз етеді, және олар осы компонентті түсінуге және оның тиімді пайдалану жолдарын жобалауға негіз болады.

2.1. Шексіз күшейту ($A \rightarrow \infty$)

Идеалды операциялық күшейткіштің ең маңызды ерекшелігі оның шексіз күшейтуі. Күшейту коэффициенті, ААА, — бұл шығыс сигналының кіріс сигналдарына қатынасы. Идеалды ОК үшін күшейту коэффициенті шексіз үлкен болады, яғни:

$$A \rightarrow \infty$$

Бұл дегеніміз, кіріс сигналы өте аз өзгерген кезде шығыс сигналы айтарлықтай үлкен болады. Мысалы, егер кіріс сигналындағы айырмашылық 1 мВ болса, идеалды ОК-ның шығысында бұл айырмашылық өте үлкен болады (шығыс сигналы милливольттың бірнеше мың есе үлкен болуы мүмкін).

Нақты жағдайда, операциялық күшейткіштің күшейтуі шексіз бола алмайды. Олардың шынайы күшейту коэффициенті жоғары, бірақ ол белгілі бір мәнге шектеледі, мысалы 10^5 немесе 10^6 . Бұл шектеулер шығыс сигналының шығыс кернеуінің максималды мәндеріне немесе кернеу көзіне байланысты болады. Дегенмен, идеалды ОК үлгісі көп жағдайда есептеулер мен теориялық талдаулар үшін пайдалы.

2.2. Шексіз кіріс кедергісі ($R_{in} \rightarrow \infty$)

Кіріс кедергісі — бұл операциялық күшейткіштің кірісіне қосылған құрылғының немесе сигнал көзінің қарсылығы. Идеалды ОК-ның кіріс кедергісі шексіз болады, яғни:

$$R_{in} \rightarrow \infty$$

Бұл қасиет ОК-ның басқа компоненттерге немесе жүйеге ешқандай жүктеме түсірмейтіндігін білдіреді. Шындығында, ОК-ның кірісі өте жоғары кедергіге ие болады, бірақ ол шексіз емес. Нақты құрылғыларда кіріс кедергісі бірнеше мегоммен немесе одан жоғары болуы мүмкін.

Шексіз кіріс кедергісі идеалды ОК-ға мүмкіндік береді:

- ❖ Кіріс сигналына ешқандай ток ағымайды. Бұл өте маңызды, себебі егер кірісте ток өтсе, бұл кіріс сигналын өзгертуі мүмкін еді.

- ❖ Кіріс көзінен энергияның жүктелуі болмайды. Яғни, кіріс сигналы ешқандай қателіктер немесе шу тудырмайды.

Осы сипаттама ОК-ның кірісіне қосылған жүйенің немесе компоненттің жұмысын өздігінен бұзбауына кепілдік береді, бұл оның дәл жұмыс істей алуына мүмкіндік береді.

2.3. Нөлдік шығыс кедергісі ($R_{out} \rightarrow 0$)

Шығыс кедергісі — бұл операциялық күшейткіштің шығысындағы кедергі, яғни оның шығыс сигналының қандай да бір күшке немесе басқа құрылғыға әсер етуіне мүмкіндік беретін қарсылық. Идеалды ОК үшін шығыс кедергісі нөлге тең болады:

$$R_{out} \rightarrow 0$$

Бұл сипаттама ОК-ның шығысында ешқандай кедергі болмаған жағдайда, оны басқа құрылғыларға қосуға және қуатты тиімді түрде тасымалдауға мүмкіндік береді. Шығыс кедергісінің нөлдік мәні ОК-ға максималды қуатты беру қабілетін береді, яғни шығыс сигналы толық көлемде беріледі, ешқандай энергия жоғалтпай.

Нақты ОК-ларда шығыс кедергісі нөлге тең емес, бірақ ол өте төмен, әдетте бірнеше омы немесе одан төмен. Бұл шығыс сигналының жоғары дәлдігін қамтамасыз етеді, әрі сыртқы жүктемелерге қосылуға кедергі жасамайды.

2.4. Шексіз көлденең немесе уақытша тұрақтылық

Көлденең немесе уақытша тұрақтылық — операциялық күшейткіштің маңызды сипаттамасы, ол кіріс және шығыс сигналдары арасындағы

байланыстың үздіксіздігін білдіреді. Идеалды ОК-да бұл тұрақтылық шексіз, яғни шығыс сигналы кіріс сигналымен толық дәлдікпен сәйкес болады. Бұл жағдайда шығыс сигналында кіріс сигналының барлық өзгерістері дәл көшіруде болады, ал қосымша уақытша немесе тұрақсыздықтар болмайды.

Идеалды ОК-ның көлденең тұрақтылығы кіріс және шығыс арасындағы фазалық ауытқулардың болмауын қамтамасыз етеді. Бұл дегеніміз, шығыс сигналы мен кіріс сигналы арасындағы уақытша кідірістер немесе фазалық ауытқулар болмайды.

Шынайы әлемде ОК-лар белгілі бір деңгейде кешігулер мен фазалық ауытқуларға ұшырайды, әсіресе жоғары жиілікті сигналдармен жұмыс істегенде. Осылайша, шығыс сигналындағы ауытқулар, жиілік спектріндегі тұрақсыздықтар мен жоғары жиілікті шу сияқты мәселелер туындауы мүмкін. Алайда, идеалды ОК шексіз тұрақты болып табылады, бұл оның теориялық моделінің дұрыс жұмыс істейтініне кепілдік береді.

4. Операциялық күшейткіштерді қолдану

Операциялық күшейткіштер (ОК) — бұл әртүрлі электронды құрылғылар мен жүйелерде кеңінен қолданылатын көпфункционалды құрылғылар. ОК-нің жоғары дәлдігі мен функционалдығы оны көптеген тапсырмаларды орындауға мүмкіндік береді. Операциялық күшейткіштердің кейбір негізгі қолдану салаларына тоқталайық.

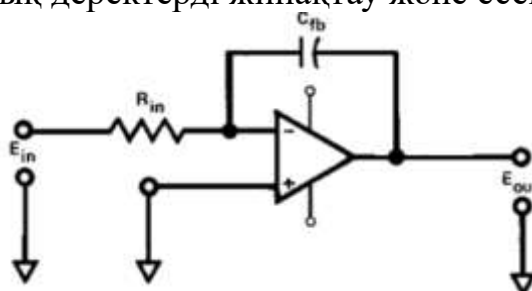
4.1. Интегратор

Интегратор — бұл ОК-ның кіріс сигналын интегралдайтын функцияны орындаушы конфигурация. ОК интегратор ретінде қолданылғанда, кіріс сигналы уақыт бойынша интегралданады, яғни оның өзгеру жылдамдығы бойынша сигналды өңдейді. Бұл схема көбінесе сигналдарды өңдеуде және кейбір физикалық жүйелерде қолданылады, мысалы, механикалық қозғалыстарды немесе температураны интегралдау үшін.

Интегратордың жұмыс істеу принципі келесідей:

- ❖ ОК-ның кірісіне сигнал беріледі.
- ❖ Сигнал кіріске қолданылғанда, ОК-ның шығысы осы сигналдың уақыт бойынша интегралы болады.
- ❖ Интегратордың шығыс сигналы ұзақ уақыт бойы жинақталған энергияны немесе ақпаратты көрсетеді.

Бұл схема интегралды функцияларды қажет ететін құрылғыларда қолданылады, мысалы, сигналдарды фильтрациялау, аналогты компьютерлерде, аналогтық деректерді жинақтау және есептеулер үшін.



4.2. Дифференциалды күшейткіш

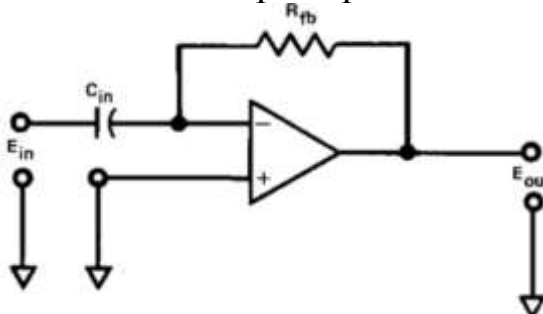
Дифференциалды күшейткіш — бұл екі кіріс сигналының айырмашылығын күшейтетін операциялық күшейткіштің схемасы. Бұл түрдегі күшейткіш екі кіріс сигналдарын қабылдап, олардың арасындағы айырмашылықты анықтайды да, күшейтеді. Дифференциалды күшейткішті қолдану арқылы екі сигналдың арақатынасын анықтауға және оларды қосымша өңдеу үшін күшейтуге болады.

Дифференциалды күшейткіштің қолдану салаларына мыналар жатады:

- ❖ Аналогты сигналдарды күшейту: Дифференциалды күшейткіштер жиі әртүрлі датчиктерден немесе қабылдағыштардан алынған сигналдарды күшейту үшін қолданылады. Бұл жағдайда кіріс сигналы арасындағы айырмашылықты анықтай отырып, қажетсіз шу мен артық сигналдарды болдырмауға болады.

- ❖ Датчиктер мен өлшеу жүйелерінде: Әсіресе, өлшеу жүйелерінде, дифференциалды күшейткіштер өте пайдалы. Мысалы, түрлі датчиктерден сигналдар алынғанда, тек қажетті ақпарат ғана өңделеді, ал басқа артық сигналдар еленбейді.

- ❖ Электрлік және механикалық жүйелердің басқару жүйелері: Дифференциалды күшейткіштер басқару жүйелерінде сигналдар арасындағы айырмашылықты сезіну үшін пайдаланылады. Бұл кіріс пен шығыс арасындағы ауытқуларды бақылайтын жүйелерде өте маңызды.



4.3. Компаратор

Компаратор — бұл екі кіріс арасындағы кернеулердің айырмашылығын салыстыратын және оған сәйкес шығыс деңгейін логикалық түрде басқаратын құрылғы. Компаратор негізінен екі сигналды салыстыру үшін қолданылады және оның шығысы тек екі мүмкін мәннің бірін қабылдайды — «жоғары» немесе «төмен» деңгейде болады.

Компаратордың жұмыс принципі:

- ❖ ОК-ның екі кірісіне сигналдар беріледі.
- ❖ Компаратор бұл екі кірісті салыстырып, шығыс деңгейін «жоғары» немесе «төмен» деп анықтайды, сәйкесінше бұл сигналдардың үлкен немесе кіші екенін білдіреді.

Компараторлар көбінесе цифрлық логикада немесе жүйелерде сигналдың шегін белгілеуде пайдаланылады. Мысалы, олар температура датчиктерінде температураның белгілі бір мәнінен жоғары немесе төмен екенін анықтау үшін қолданылады.

Компаратордың негізгі қолдану салалары:

❖ Сигналдарды шектеу және детектелеу: Компараторлар сигналды белгілі бір деңгейге дейін көтеру немесе түсіру үшін қолданылады. Мысалы, температура немесе қысым деңгейін бақылау.

❖ Цифрлық сигналдарды өңдеу: Компараторлар аналогтық сигналдарды цифрлыққа айналдыру үшін қолданылады. Бұл процесте компаратор кіріс сигналын салыстырады да, оны «0» немесе «1» сияқты цифрлық мәндерге түрлендіреді.

❖ Тұрақтылықты бақылау жүйелері: Электрлік және механикалық жүйелерде жұмыс параметрлерін салыстыру үшін компараторлар қолданылады. Мысалы, электрлік қорғаныс жүйелерінде.

4.4. Кернеу тұрақтандырғыш

Вольтажды тұрақтандырғыш — бұл ОК қолданылатын тағы бір маңызды құрылғы. ОК күшейткіштерін тұрақты шығыс кернеуін алу үшін қолдану мүмкіндігі бар. Вольтажды тұрақтандырғыштарда ОК кіріс кернеуін салыстырып, оны тұрақты шығыс кернеуге түрлендіреді. Бұл әсіресе өзгермелі қуат көздерімен жұмыс істегенде пайдалы.

❖ Тұрақты кернеу беру: Егер жүйеде кіріс кернеуі өзгеріп отырса, ОК оны тұрақтандырады, бұл басқа құрылғылардың жұмысын қамтамасыз ету үшін маңызды.

❖ Күшейтуді басқару: Егер жүйедегі кернеу тұрақсыз болса, ОК-ның күшейту деңгейі автоматты түрде реттеліп, тұрақты шығыс сигналын береді.

Бұл тәсіл көптеген қуат көздерінде пайдаланылады, мысалы, компьютерлердің қуат көздерінде немесе сенсорлық жүйелерде, онда тұрақты кернеу қажет.

4.5. Сүзгілер

Операциялық күшейткіштер жиі сүзгілеу міндеттерін орындау үшін қолданылады. Сүзгілеу — бұл белгілі бір жиіліктерді немесе сигналдардың компоненттерін өткізу немесе шығарып тастау үшін қолданылатын процестердің жиынтығы.

❖ Төмен жиілікті сүзгілер (Low-pass filters): Бұл сүзгілер тек төмен жиіліктерді өткізеді, ал жоғары жиіліктерді тосқауылдайды. Олар ОК схемаларында жиі қолданылады, әсіресе дыбыстық немесе электромагниттік сигналдармен жұмыс істеуде.

❖ Жоғары жиілікті сүзгілер (High-pass filters): Бұл сүзгілер жоғары жиіліктерді өткізеді, ал төмен жиіліктерді бөгейді.

❖ Жолақты сүзгілер (Band-pass filters): Бұл сүзгілер тек белгілі бір жиілік диапазонын өткізеді, қалғаны бөгеледі.

ОК сүзгілерінің көптеген қолданылу аймақтары бар, оның ішінде телекоммуникация, дыбыстық сигналдарды өңдеу, зертханалық құрылғылар мен медициналық құралдардағы сигналдарды сүзу.

5. Идеалды ОК және шынайы ОК арасындағы айырмашылықтар

Идеалды ОК-лар көбінесе теориялық модельдерде қолданылады, бірақ шынайы ОК-лар кейбір маңызды шектеулерге ие:

❖ Шектеулі күшейту: Шынайы ОК-лардың күшейтуі шексіз емес, бірақ өте жоғары.

❖ Кіріс токтары мен кедергілері: Шынайы ОК-лар кіріс токтары мен кедергілерінің шектеулері бар.

❖ Шығыс кедергісі: Шығыс кедергісі де нөлге тең емес, бірақ өте кіші. Бұл шектеулер практикалық қолдануда ескерілуі тиіс.

Қорытынды:

Операциялық күшейткіштер (ОК) — бұл жоғары күшейту қабілеттеріне, шексіз кіріс кедергісіне және нөлдік шығыс кедергісіне ие құрылғылар, олар көптеген электронды жүйелерде қолданылып, сигналдарды өңдеу, фильтрация, күшейту, салыстыру және тұрақтандыру сияқты әртүрлі функцияларды орындайды. ОК интеграторлар, дифференциалды күшейткіштер, компараторлар, вольтажды тұрақтандырғыштар және сүзгілер ретінде қолданылып, аналогтық және цифрлық жүйелерде жоғары дәлдікпен жұмыс істейді. Олардың қолдану салалары өнеркәсіптік жүйелерден бастап, ғылыми зерттеулер мен медициналық құрылғыларға дейін кең, бұл оларды қазіргі заманғы электроника мен автоматтандырудың негізі ретінде маңызды құрал етеді.

Әдебиеттер тізімі:

1. Г. Б. Халили. Основы операционных усилителей. М.: Радио и связь, 1988.
2. Дж. М. Миллман, Х. Хуэй. Электронные устройства и схемы. М.: Высшая школа, 2000.
3. Л. Х. Бутов, В. С. Киселев. Основы аналоговой электроники. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. А. В. Рейфман. Аналоговые схемы с операционными усилителями. М.: Радио и связь, 2002.
5. В. М. Журавлев. Основы теории операционных усилителей и их применения. М.: Высшая школа, 2003.
6. Роберт Л. Боумен, Дж. М. Миллман. Электронные приборы. М.: МИР, 1974.
7. Дэвид А. Белл. Электроника: Теория и практика. М.: Издательство «Техносфера», 2010.
8. Х. Л. Хаас. Операционные усилители: Принципы и применение. М.: Наука, 1995.
9. А. П. Шалугин. Элементы теории и применения операционных усилителей. М.: Машиностроение, 1987.
10. В. С. Демидов. Электронные схемы и устройства на операционных усилителях. М.: МГТУ, 2001.