

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

9 Дәріс. Операциялық күшейткіштерді тәжірибеде қолдану

Дәрістің мақсаты: Операциялық күшейткіштердің (ОК) негізгі қосылу схемаларын, олардың жұмыс істеу принциптерін және тәжірибелік қолдану салаларын түсіну; идеал және нақты ОК сипаттамаларын ажыратуды, күшейту коэффициентін есептеуді, сондай-ақ инвертирлеуші, инверттемейтін, қосындылаушы, интегралдаушы және дифференциалдаушы күшейткіштерді талдау арқылы аналогтық сигналдарды өңдеуде ОК-тің маңызын ұғыну.

1. Кіріспе

Операциялық күшейткіштер (ОК) — кеңінен қолданылатын аналогтық электрондық компоненттер. Олар сигналды күшейту, сүзу, математикалық операциялар (қосу, азайту, интегралдау, дифференциалдау) орындау сияқты әртүрлі функцияларды атқарады. Бұл элементтер автоматикада, өлшеу жүйелерінде, аудиотехникада, және медициналық құрылғыларда кең қолданылады.

2. Операциялық күшейткіштің құрылымы мен негізгі сипаттамалары

2.1 Идеал операциялық күшейткіштің сипаттамалары

Идеал операциялық күшейткіш (ОК) — бұл теориялық модель, ол нақты құрылғылардың жұмысын түсіну және есептеу жеңілдігі үшін қолданылады. Идеал ОК келесі сипаттамаларға ие:

1) Кірістік кедергі (Input resistance) — шексіз үлкен
Бұл дегеніміз, ОК кірісіне қосылған тізбектен ешқандай ток өтпейді. Яғни, ОК кірісінен ток «тартпайды» және бастапқы тізбекке әсер етпейді. Бұл — керемет сезімталдықты және сигналдың бұрмаланбауын қамтамасыз етеді.

2) Шығыстық кедергі (Output resistance) — нөлге тең
Бұл сипаттама ОК-тің кез келген жүктемені қосқанда, шығыстағы кернеуді сол қалпында ұстап тұра алуын білдіреді. Мұндай жағдайда ОК кернеу көзі секілді жұмыс істейді.

3) Ашық тізбектегі күшейту коэффициенті (Open-loop gain) — шексіз үлкен
Идеал жағдайда, кіріс дифференциалдық кернеу өте аз болса да (милливольттардан төмен), шығыс кернеу бірден үлкен мәнге жетеді. Бұл қасиет кері байланыс арқылы ОК-тің дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

4) Жиілікке тәуелсіз жұмыс
Идеал ОК кез келген жиілікте тұрақты күшейту коэффициентін сақтайды, яғни оның өткізу жолағы (bandwidth) шексіз. Бұл ОК-тің барлық жиілік ауқымында бірдей жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

5) Кіріс токтары — нөлге тең
Идеал ОК-тің кірісіндегі ток мүлдем өтпейді, себебі кірістік кедергі шексіз. Бұл қасиет датчиктер мен жоғары кедергідегі тізбектермен жұмыс істеуде өте маңызды.

6) Кіріс кернеулердің айырмасы нөлге ұмтылады (кері байланыспен жұмыс істегенде)

Кері байланыс қосылғанда, ОК кірісіндегі екі сигнал (инверттелетін және инверттелмейтін) бірдей болады — бұл принцип көптеген схемаларда қолданылады.

2.2 Нақты операциялық күшейткіштің ерекшеліктері

Нақты өмірде идеал ОК жоқ. Барлық шынайы ОК құрылғылардың сипаттамалары шектелген және төмендегідей:

1) Кірістік кедергі
Әдетте өте жоғары (мысалы, $1\text{ M}\Omega - 10\text{ G}\Omega$), бірақ шексіз емес. Бұл, әсіресе CMOS немесе FET кірісті ОК үшін өзекті.

2) Шығыстық кедергі
Толық нөл емес (әдетте ондаған Ом). Бұл жүктеме әсерінен шығыс кернеудің сәл төмендеуіне әкелуі мүмкін.

3) Ашық тізбектегі күшейту коэффициенті
Әдетте $10^5 - 10^7$ аралығында болады ($100\,000 - 10\,000\,000$). Бұл жоғары мән, бірақ шексіз емес, сондықтан өте дәл математикалық операцияларда қателіктер болуы мүмкін.

4) Жиілік шектеуі
Нақты ОК-тің күшейту коэффициенті жиілік өскен сайын төмендейді. Бұл «Gain-bandwidth product» (күшейту мен жиілік көбейтіндісі) ұғымымен өлшенеді. Мысалы, егер $GBW = 1\text{ МГц}$ болса, онда 10 есе күшейту тек 100 кГц жиілікке дейін мүмкін болады.

5) Кіріс токтары (Input bias current)
Нақты ОК кірісіне микроампер немесе наноампер шамасындағы токтар өтеді. Бұл токтар кіріс тізбектеріндегі кедергілерге байланысты кернеу ығысуын тудыруы мүмкін.

6) Кіріс ығысу кернеуі (Input offset voltage)
Бұл – кіріс кернеулер тең бола тұра, шығыста нөл кернеу алу үшін қажет болатын компенсациялық кернеу. Көбінесе $1 - 5\text{ мВ}$ шамасында болады, бірақ кейбір жоғары дәлдіктегі ОК үшін бұл көрсеткіш микровольтпен өлшенеді.

7) Температуралық және уақыттық тұрақсыздықтар
Нақты құрылғылар температура өзгерісіне сезімтал. Мысалы, кіріс ығысуы температура артқанда да өзгеруі мүмкін.

8) Шығыс кернеу шектері
Көптеген ОК шығыстағы кернеуді қоректендіру кернеуіне дейін жеткізе алмайды. Мысалы, $\pm 15\text{ В}$ қорек болса, шығыс тек $\pm 13\text{ В}$ аралығында болуы мүмкін. «Rail-to-rail» деп аталатын ОК-тер ғана толығымен $0 - V_{cc}$ аралығында шыға алады.

2.3 Ішкі құрылымы (қысқаша)

ОК-тің ішкі схемасы әдетте үш негізгі каскадтан тұрады:

1) Кіріс каскады — дифференциалдық күшейткіш (сигнал айырмасын өлшейді).

2) Аралық каскад — сигналды күшейтеді.

3) Шығыс каскады — жүктемеге сәйкес шығыс кернеу береді.

3. Операциялық күшейткіштердің негізгі қосылу схемалары

Операциялық күшейткіштердің практикалық қолданысында олардың түрлі конфигурациялары қолданылады. Бұл конфигурациялар сигналдарды күшейту, өңдеу, математикалық операцияларды (қосу, алу, интегралдау, дифференциалдау) жүзеге асыру үшін пайдаланылады. Ең жиі қолданылатын негізгі схемалар мыналар:

3.1 Инвертирлеуші күшейткіш (Inverting Amplifier)

Бұл схема операциялық күшейткіштің инверттелетін кірісіне (–) сигнал беріп, инверттелмейтін кірісін (+) жерге жалғайды.

Жұмыс принципі:

- ❖ Кіріс сигналы (V_{in}) резистор R_1 арқылы инверттелетін кіріске беріледі.

- ❖ Шығыс кернеу (V_{out}) сигналдың инверттелген (кері) көшірмесі болып табылады.

- ❖ R_2 резисторы кері байланыс үшін қолданылады.

Күшейту коэффициенті:

$$A_v = V_{out}/V_{in} = -R_2/R_1$$

- ❖ Теріс таңба — шығыс сигналы кіріске қатысты 180° фазаға ығысқанын білдіреді (инверттелген).

- ❖ Қуаттылығы: Егер $R_2=10\text{ k}\Omega$, $R_1=2\text{ k}\Omega$, онда күшейту $A_v=-5$.

Қолданылуы:

- ❖ Кернеуді кері фазаға ауыстыру.

- ❖ Дыбыс сигналдарын өңдеу.

- ❖ Айнымалы ток сигналдарын аудару.

3.2 Инверттемейтін күшейткіш (Non-inverting Amplifier)

Бұл схемада кіріс сигналы ОК-тің инверттелмейтін кірісіне (+) беріледі, ал кері байланыс инверттелетін кіріс арқылы ұйымдастырылады.

Жұмыс принципі:

- ❖ Кіріс сигналы тікелей инверттелмейтін кіріске қосылады.

- ❖ Инверттелетін кіріс кері байланыс тізбегімен байланысады (R_1 және R_2).

- ❖ Шығыс сигналы фаза бойынша кіріспен сәйкес келеді (инверттелмейді).

Күшейту коэффициенті:

$$A_v = V_{out}/V_{in} = 1 + R_2/R_1$$

- ❖ Егер $R_2=10\text{ k}\Omega$, $R_1=2\text{ k}\Omega$, онда күшейту $A_v=1+5=6$.

- ❖ Инверсиясыз күшейту қажет болғанда пайдаланылады.

Қолданылуы:

- ❖ Датчиктерден шыққан сигналдарды күшейту.

- ❖ Буферлік каскад (шамадан тыс жүктеме болмауы үшін).

- ❖ Оң фазада сигналды беру.

3.3 Қосындылаушы күшейткіш (Summing Amplifier)

Қосындылаушы күшейткіш — бірнеше кіріс сигналдарын жинақтап, бір шығыс сигнал ретінде береді. Бұл аналогтық сигналдарды математикалық қосу үшін қолданылады.

Жұмыс принципі:

- ❖ Барлық кіріс сигналдары (мысалы, V_1, V_2, V_3) сәйкес резисторлар арқылы инверттелетін кіріске беріледі.

- ❖ ОК инверттелмейтін кірісі жерге жалғанады.

- ❖ Кері байланыс резисторы арқылы сигналдар біріктіріледі.

Шығыс кернеуі:

Егер барлық кіріс резисторлар R , ал кері байланыс резисторы R_f болса:

$$V_{out} = -R_f(V_1/R + V_2/R + \dots + V_n/R)$$

Қолданылуы:

- ❖ Аналогтық микшерлер (аудио).

- ❖ Салмақталған сандық-аналогтық түрлендіргіштер (DAC).

- ❖ Басқару жүйелерінде бірнеше сигналдарды біріктіру.

3.4 Интегралдаушы және дифференциалдаушы күшейткіштер

Бұл типтер математикалық операцияларды орындау үшін қолданылады: интегралдау және дифференциалдау.

Интегралдаушы күшейткіш (Integrator)

RC тізбегі арқылы кіріс сигналының уақыт бойынша интегралын есептейді.

Схема сипаттамасы:

- ❖ Кіріс сигналы резистор арқылы инверттелетін кіріске беріледі.

- ❖ Кері байланыс ретінде резистордың орнына конденсатор қолданылады.

Шығыс кернеуі:

$$V_{out}(t) = (-1/RC) \int V_{in}(t) dt$$

Қолданылуы:

- ❖ Ағымды жинау.

- ❖ Толқын формаларын генерациялау (мысалы, үшбұрышты сигнал).

- ❖ Аналогтық есептеуіш құрылғыларда.

Дифференциалдаушы күшейткіш (Differentiator)

Кіріс сигналының уақыт бойынша туындысын есептейді.

Схема сипаттамасы:

- ❖ Кіріс сигналы конденсатор арқылы ОК-тің инверттелетін кірісіне беріледі.

- ❖ Кері байланыста резистор қолданылады.

Шығыс кернеуі:

$$V_{out}(t) = -RC \cdot (dV_{in}(t)/dt)$$

Қолданылуы:

- ❖ Шеткі өзгерістерді анықтау (Edge detection).

- ❖ Импульстік сигналдарды бөліп алу.

- ❖ Өтпелі процестерді талдау.

4. Операциялық күшейткіштерді тәжірибеде қолдану

4.1 Аналог сигналды өңдеу

- ❖ Аудио сигналды күшейту (микрофон күшейткіштері, дыбыс жүйелері)
- ❖ Аналог сүзгілер (төменгі/жоғарғы жиілікті сүзгілер)
- ❖ Сигналды қалыпқа келтіру (нормализация)

4.2 Датчиктермен жұмыс

- ❖ Датчиктерден алынған әлсіз сигналдарды күшейту
- ❖ Мысалы: температура, қысым, ток датчиктерінен шыққан сигналдарды өлшеу жүйесіне сәйкестендіру

4.3 Математикалық операциялар

- ❖ Қосынды, айырма, интеграл, туындыны есептеу
- ❖ Аналогтық есептеуіш машиналарда қолданылады

4.4 Компаратормен жұмыс

- ❖ Кіріс сигнал белгілі бір шектен асып кеткенде шығыста логикалық “1” немесе “0” пайда болады

- ❖ Автоматика мен қорғау жүйелерінде қолданылады

4.5 Аналог-цифрлық жүйелерде

- АЦП/ЦАП алдында сигнал деңгейін келтіру
- Шумды басу, компенсациялау

Қорытынды:

Операциялық күшейткіштер – аналогтық сигналдарды өңдеуде кеңінен қолданылатын әмбебап элементтер. Олардың түрлі қосылу схемалары — инвертирлеуші, инверттемейтін, қосындылаушы, интегралдаушы және дифференциалдаушы күшейткіштер — әртүрлі есептерді шешуге мүмкіндік береді.

Әдебиеттер тізімі:

1. Горяев Ю.И., Ключин В.А. Операционные усилители и их применение. — Москва: Радио и связь, 1988.
2. Гутник Л.Е. Электроника: Аналоговые и цифровые устройства. — Санкт-Петербург: Питер, 2012.
3. Седра А., Смит К. Микроэлектронные схемы. — Москва: Вильямс, 2006.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. — Москва: ДМК Пресс, 2017.
5. Трофимов В.А. Электроника. Аналоговые устройства и схемы. — Москва: Академия, 2010.
6. Franco S. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. — McGraw-Hill, 2002.
7. National Semiconductor. Application Note 31: Op Amp Circuit Collection. — Texas Instruments, 2002.
8. Sedra A.S., Smith K.C. Microelectronic Circuits. — Oxford University Press, 2015.