

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

7 Дәріс. Аналогты схемалардағы кері байланыс негіздері

Дәрістің мақсаты: Аналогты электрондық схемалардағы кері байланыстың негізгі ұғымдарын, түрлерін, қасиеттерін және олардың схемаларға әсерін теориялық және практикалық тұрғыда түсіну. Сонымен қатар, кері байланыстың тұрақтылықты, сызықтылықты, күшейту коэффициентін және шуға төзімділікті қалай жақсартатынын көрсету, түрлі қолдану салаларымен таныстыру және типтік жүзеге асыру әдістерін меңгеру.

1. Кіріспе

Аналогты схемаларда кері байланыс (feedback) — бұл шығыс сигналының бір бөлігін кіріске қайта беру процесі. Кері байланыс — электрондық құрылғылардың тұрақтылығын, дәлдігін және жұмыс сапасын арттыруға мүмкіндік беретін маңызды әдіс

2. Кері байланыстың түрлері

Аналогтық схемаларда кері байланыс екі негізгі түрге бөлінеді: теріс кері байланыс және оң кері байланыс. Әрқайсысының өзіндік ерекшеліктері, қолдану салалары және жүйенің мінез-құлқына әсері бар.

2.1 Теріс кері байланыс (ТКБ)

Теріс кері байланыс дегеніміз — шығыс сигналынан алынған бір бөліктің кіріс сигналына қарсы бағытта әсер етуі. Яғни, шығыс артып кеткен кезде кері байланыс кіріс сигналын төмендетеді, ал шығыс азайғанда, кері байланыс кірісті көбейтеді. Бұл жүйені теңестіріп, тұрақты жұмыс істеуіне мүмкіндік береді.

Механизмі:

❖ Егер күшейткіштің шығысында сигнал шамадан тыс өссе, теріс кері байланыс оны басады.

❖ Егер шығыста сигнал азайса, кері байланыс оны қолдайды.

Мақсаты:

❖ Тұрақтылықты арттыру: Теріс кері байланыс схеманың жалпы тұрақтылығын күшейтеді, сыртқы әсерлерге (температура, қуат көзі тербелістері, жүктеме өзгерістері) төзімді етеді.

❖ Сызықтықты жақсарту: Күшейтілетін сигналдың бұрмалануын азайтып, шығыс пен кіріс арасындағы тәуелділікті сызықтық етеді.

❖ Күшейту коэффициентін тұрақтандыру: Ашық тізбектегі күшейткіштің күшейтуі температураға, элемент параметрлерінің өзгерісіне тәуелді болса да, жабық тізбектегі күшейту тек кері байланыс коэффициентіне байланысты болады.

❖ Шуға қарсы тұру: Сыртқы және ішкі шудың әсерін азайтады.

Қолдану мысалдары:

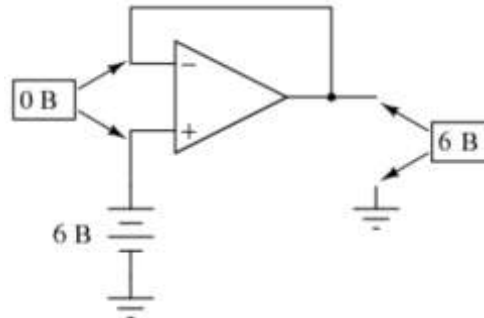
❖ Операциялық күшейткіштер (ОК): Мысалы, инвертирлеуші және бейтарап (non-inverting) күшейткіш схемалары міндетті түрде теріс кері байланысты қолданады.

❖ Транзисторлық күшейткіш каскадтары: Эмиттерлік резистор арқылы енгізілетін теріс кері байланыс күшейту тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

❖ Бақылау және реттеу жүйелері: Автоматтық басқару жүйелерінде объектінің мінез-құлқын басқару үшін қолданылады.

Теріс кері байланысты қолдану нәтижесінде:

❖ Қалыпты күшейту коэффициенті төмендейді,
❖ Бірақ жұмыс сенімділігі және схеманың сызықтық сипаттамалары артады.



2.2 Оң кері байланыс (ОКБ)

Оң кері байланыс дегеніміз — шығыс сигналынан алынған бір бөліктің кіріс сигналына сол бағытта әсер етуі, яғни кіріс сигналын одан әрі арттырады. Бұл механизм күшейткіш жүйеде өздігінен өсу процесін туындатады.

Механизмі:

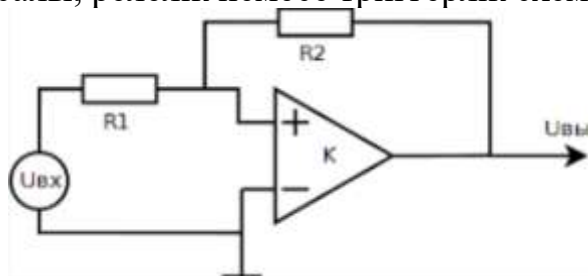
❖ Егер шығыс сигнал арта бастаса, оң кері байланыс кірісті де арттырып, шығысты одан әрі күшейтеді.

❖ Егер шығыс азайса, кері байланыс кірісті де азайтады.

Мақсаты:

❖ Генерация процесін іске қосу: Өздігінен тербеліс пайда болу үшін қажет.

❖ Қалыпты күшейткіш режимінен шығару: Жүйені екі тұрақты күйдің біріне аудару үшін (мысалы, релелік немесе триггерлік схемаларда).



Қолдану мысалдары:

❖ Генераторлар: Тербеліс көздері (мысалы, синусоидалы, төртбұрышты сигнал генераторлары) оң кері байланысты пайдаланады.

❖ Компараторлар: Кіріс сигналын екі деңгейдің біріне тез ауыстыру үшін қолданылады.

❖ Релелік және триггерлік схемалар: Шешім қабылдау және жады сақтау функцияларында оң кері байланыс қажет.

Қауіптері:

- ❖ Тұрақсыздық: Егер оң кері байланыс бақылаусыз қолданылса, схема шығысы шексіз өсіп, қанығуға (saturation) ұшырайды немесе өздігінен тербеліс тудырады.

- ❖ Бақылаудың қиындығы: Оң кері байланыс енгізілген жүйелерді жобалау және баптау аса мұқияттылықты қажет етеді.

Оң кері байланысты қолдану нәтижесінде:

- ❖ Сигнал өседі және жүйе тұрақсыз күйге ауысады,
- ❖ Бұл кейбір арнайы мақсаттарда (генерация, триггерлеу) пайдалы болуы мүмкін.

3. Кері байланыс әсерлері

Кері байланыстың жүйенің сипаттамаларына тигізетін әсері оның түріне байланысты өзгереді. Әдетте, теріс және оң кері байланыс жүйенің әртүрлі қасиеттерін өзгеше түрде өзгертеді.

Теріс кері байланыс әсерлері:

- ❖ Тұрақтылық: Теріс кері байланыс жүйенің тұрақтылығын арттырады. Бұл дегеніміз, сыртқы әсерлерге немесе элемент параметрлерінің өзгеруіне қарамастан, жүйенің жұмыс режимі орнықты болады.

- ❖ Сызықтылық: Теріс кері байланыс күшейткіштің кіріс пен шығыс арасындағы байланысын сызықтық етеді. Нәтижесінде, сигнал бұрмаланулары азаяды, және жүйе кіріс сигналына дәлірек жауап береді.

- ❖ Күшейту: Теріс кері байланыс қолданылғанда күшейту коэффициенті төмендейді. Алайда бұл төмендеу есесіне күшейткіштің параметрлері тұрақты және алдын ала есептелген мәндерге жақын болады.

- ❖ Шуға сезімталдық: Теріс кері байланыс жүйенің ішкі және сыртқы шудың әсеріне сезімталдығын төмендетеді. Бұл схеманың шу деңгейін азайтып, сигнал сапасын жақсартады.

Оң кері байланыс әсерлері:

- ❖ Тұрақтылық: Оң кері байланыс жүйенің тұрақтылығын төмендетеді. Егер кері байланыс шамадан тыс болса, жүйе бақыланбайтын тербелістерге немесе қанығуға ұшырауы мүмкін.

- ❖ Сызықтылық: Оң кері байланыс жүйенің сызықтылығын бұзады. Нәтижесінде шығыс сигналы кіріс сигналына пропорционалды емес, күрт өсетін немесе азаятын сипат алады.

- ❖ Күшейту: Оң кері байланыс күшейту коэффициентін арттырады. Бұл қасиет белгілі бір құрылғыларда (мысалы, генераторларда немесе релелік схемаларда) пайдалы болуы мүмкін.

- ❖ Шуға сезімталдық: Оң кері байланыс жүйенің шуға сезімталдығын арттырады. Себебі кез келген кішкене сыртқы немесе ішкі шуды оң кері байланыс күшейтіп, жүйенің тұрақсыз жұмыс жасауына әкелуі мүмкін.

4. Теріс кері байланыстың негізгі параметрлері

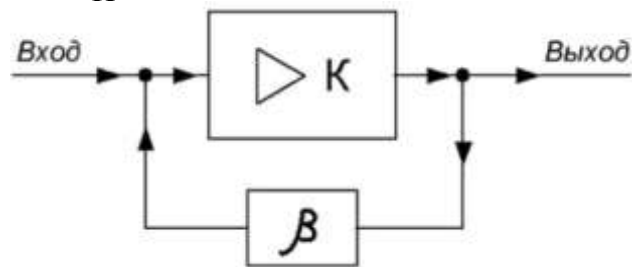
Теріс кері байланыс схемасын талдау үшін бірнеше негізгі параметрді білу қажет. Бұл параметрлер жүйенің күшейту қасиеттерін, тұрақтылығын және дәлдігін сипаттайды.

4.1 Ашық тізбекті күшейту (A)

Ашық тізбекті күшейту (немесе жай ғана A) — бұл күшейткіштің кірісі мен шығысы арасындағы кері байланыссыз жұмыс режиміндегі күшейту коэффициенті. Яғни, бұл — күшейткіштің өзінің ішкі сипаттамасына негізделген күшейту қабілеті.

Күшейткішке кіріс ретінде берілген сигнал қаншалықты күшейтіліп шығыста пайда болатынын көрсетеді. Мысалы, егер $A = 1000$, бұл дегеніміз — кіріс сигналы 1 мВ болса, шығыста 1 В сигнал алынады.

Ашық тізбекті күшейту өте үлкен болуы мүмкін, әсіресе операциялық күшейткіштерде (мысалы, 10^5 – 10^6 есе). Бірақ бұл жоғары күшейту нақты схемаларда тұрақсыздыққа және сызықсыздыққа әкелуі мүмкін, сондықтан теріс кері байланыс арқылы бұл күшейтуді бақыланатын деңгейге дейін төмендетіп, оның орнына тұрақтылық пен дәлдік аламыз.



4.2 Кері байланыс коэффициенті (β)

Кері байланыс коэффициенті (β) — бұл шығыс сигналынан кері байланыс желісі арқылы кіріске қайтып келетін сигналдың үлесі. Яғни, β — қандай үлес шығыстан алынып, кіріске қайта беріледі.

Математикалық түрде:
Егер шығыстағы кернеу V_{out} , ал кері байланыспен кіріске берілетін сигнал V_{fb} болса, онда:

$$\beta = V_{fb} / V_{out}$$

Қасиеттері:

β мәні 0 мен 1 аралығында болады.

β схеманың кері байланыс желісіндегі элементтерге (резисторлар, делительлер, т.б.) байланысты анықталады.

β неғұрлым жоғары болса, жүйенің тұрақтылығы мен дәлдігі артады, бірақ күшейту коэффициенті азаяды.

4.3 Жабық тізбекті күшейту (A_f)

Жабық тізбекті күшейту (A_f) — бұл кері байланыс енгізілгеннен кейінгі жүйенің нақты күшейту коэффициенті. Бұл — практикалық тұрғыдан маңызды көрсеткіш, өйткені ол нақты шығыс сигналдың шамасын анықтайды.

Жабық тізбекті күшейтуді есептеу формуласы:

$$A_f = A / (1 + A\beta)$$

Мұндағы:

A — ашық тізбекті күшейту,

β — кері байланыс коэффициенті,

A_f — жабық тізбекті күшейту (яғни кері байланыспен бірге жұмыс істейтін жүйенің күшейтуі).

Ерекше жағдай (жоғары күшейту жағдайында):
Егер $A\beta \gg 1$ (яғни ашық тізбекті күшейту мен кері байланыс коэффициентінің көбейтіндісі өте үлкен болса), онда формула мына түрде жуықталады:

$$A_f \approx 1/\beta$$

Бұл жағдайда жабық тізбекті күшейту тек β -ға байланысты болады және A -ның мәнінен тәуелсіз болады. Бұл — тұрақтылық пен дәлдіктің басты көрсеткіші, себебі β тұрақты және оңай бақыланатын параметр.

5. Кері байланыс түрлері (жүзеге асыру әдісі)

Кері байланыс жүйелерін классификациялаудың бір жолы — байланыс сигналының түріне және оның жүзеге асырылу бағытына байланысты бөлінуі. Бұл жіктеу күшейткіштің кірісіне қандай физикалық шаманың (кернеу немесе ток) кері байланыс ретінде берілетінін көрсетеді. Төменде кері байланыстың негізгі түрлері сипатталады.

5.1 Кернеулік кері байланыс

Бұл түрінде шығыс сигналының кернеуі өлшеніп, белгілі бір үлесі кері байланыс желісі арқылы кіріске қосылады. Мұндай байланыс көбінесе кернеулік күшейткіштерде қолданылады, себебі шығыс кернеудің тұрақтылығы маңызды болған жағдайларда тиімді.

- ❖ Байланыс сигналының түрі: Кернеу
- ❖ Байланыс бағыты: Кіріске тікелей кернеу ретінде беріледі
- ❖ Мақсаты: Шығыс кернеудің дәлдігін қамтамасыз ету, жүктеме өзгерісіне сезімталдықты азайту

5.2 Тоқтық кері байланыс

Бұл жағдайда шығыс тізбегіндегі ток өлшеніп, кері байланыс ретінде пайдаланылады. Мұндай байланыс ток күшейткіштерде немесе жүктеме тогын басқару маңызды болған схемаларда қолданылады.

- ❖ Байланыс сигналының түрі: Ток
- ❖ Байланыс бағыты: Кіріске ток немесе оған пропорционалды кернеу ретінде енгізіледі
- ❖ Мақсаты: Шығыс тогын тұрақтандыру, ток бойынша жұмысты бақылау

5.3 Кернеу-ток аралас кері байланыс

Бұл түрінде кері байланыс сигналы бір мезетте кернеу мен ток компоненттерін қамтиды. Мұндай жүйелерде байланыс желісі күрделірек болады, бірақ соның арқасында екі параметрді бірден басқаруға болады.

- ❖ Байланыс сигналының түрі: Кернеу және ток
- ❖ Байланыс бағыты: Кіріске аралас түрде (кернеу және ток түрінде) беріледі
- ❖ Мақсаты: Толық басқару мен жоғары тұрақтылықты қамтамасыз ету

6. Кері байланысты қолдану салалары

Кері байланыс – аналогтық схемаларда кеңінен қолданылатын негізгі құралдардың бірі. Ол әртүрлі құрылғылардың тұрақтылығын, дәлдігін және функционалдығын арттыру үшін қолданылады. Кері байланысты қолданудың маңызды салалары төмендегідей:

6.1 Күшейткіштерде

Күшейткіштер – кіріс сигналының қуатын, кернеуін немесе тогын арттыруға арналған құрылғылар. Бұл құрылғыларда теріс кері байланыс жиі қолданылады, себебі:

- ❖ Ол күшейту коэффициентін тұрақтандырады, яғни сыртқы факторларға тәуелділігін азайтады (температура, жүктеме өзгерістері және т.б.).

- ❖ Сызықтылықты арттырады, яғни күшейткіш шығысы кіріске пропорционалды болып, сигналдың бұрмалануы азаяды.

- ❖ Шуға төзімділікті жақсартады, себебі ішкі және сыртқы кедергілерге сезімталдық төмендейді.

- ❖ Жиілік жолағын кеңейтеді, бұл жоғары жиілікті сигналдарды дәл жеткізуге мүмкіндік береді.

Мысалы, операциялық күшейткіш схемаларында теріс кері байланыс арқылы нақты және дәл күшейту коэффициенті беріледі.

6.2 Фильтрлерде

Фильтрлердің негізгі мақсаты – белгілі бір жиілік диапазондарын өткізу немесе бөлету. Кері байланыс бұл құрылғыларда жиілік сипаттамаларын басқару және оңтайландыру үшін қолданылады.

- ❖ Белгіленген жиіліктегі күшейтуді реттеу, мысалы, күшейту белгілі бір жиілікте ең үлкен мәнге жетуі мүмкін (резонанстық фильтрлерде).

- ❖ Жиілік өткізу жолағын анықтау – төменгі, жоғары немесе жолақты өткізу фильтрлерін құруда пайдаланылады.

- ❖ Кері байланыс көмегімен фазалық сипаттаманы басқаруға да болады, бұл кейбір жүйелерде маңызды (мысалы, фазалық компенсация).

6.3 Осцилляторларда (тербеліс генераторларында)

Осцилляторлар – сыртқы сигналсыз да үздіксіз тербелістер (синусоидалы, тікбұрышты және т.б.) өндіретін схемалар. Мұндай схемаларда оң кері байланыс қолданылады:

- ❖ Шығыс сигналының бір бөлігі кіріске беріледі және сигналды күшейтеді, нәтижесінде тұрақты тербеліс туындайды.

- ❖ Бұл жүйелердің мысалына RC, LC генераторлары, Вина генераторы, мультивибраторлар жатады.

- ❖ Оң кері байланыс арқылы тербеліс басталу және оның тұрақтылығы қамтамасыз етіледі.

6.4 Автоматтық реттеу жүйелерінде (АРЖ)

Автоматтандырылған басқару және реттеу жүйелерінде кері байланыс жүйе динамикасын басқару үшін өте маңызды рөл атқарады.

- ❖ Теріс кері байланыс жүйенің шығу сигналына негізделіп, басқарушы әсерді түзетеді. Бұл қателікті азайтып, жүйені дәл әрі тұрақты етеді.

❖ Қозғалыстағы объектіні басқаруда (мысалы, робототехникада, өндірістік механизмдерде) жүйенің күйін нақты бақылап, сол бойынша әрекет ету маңызды.

❖ Температуралық, қысымдық, жылдамдық және басқа параметрлерді реттейтін жүйелер кері байланыссыз жұмыс істей алмайды.

❖ Мұндай реттеуші құрылғылардың мысалдарына PID-регуляторлар, серво-жүйелер, стабилизаторлар жатады.

Қорытынды:

Кері байланыс аналогты схемалардың тұрақтылығын, дәлдігін және сенімділігін қамтамасыз ететін негізгі құрал болып табылады. Теріс кері байланыс күшейткіштердің жұмысын тұрақтандыру, сызықтылықты арттыру және шудың әсерін азайту үшін пайдаланылады, ал оң кері байланыс генераторлар мен компараторлар сияқты схемаларда тербеліс алу және шешім қабылдау мақсатында қолданылады. Жүйенің тиімділігін арттыру үшін кері байланыстың түрін, бағытын және жүзеге асыру тәсілдерін дұрыс таңдау маңызды. Сондықтан кері байланыс аналогты электроникада теориялық қана емес, практикалық маңызы зор іргелі элемент болып саналады.

Әдебиеттер тізімі:

1. Гончаренко, Л.И. Основы электроники. — М.: Высшая школа, 2012..
2. Sedra, A.S., Smith, K.C. Microelectronic Circuits, 7th Edition. — Oxford University Press, 2014.
3. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Том 1: Аналоговая электроника. — М.: ДМК Пресс, 2020.
4. Мануйлов В.Л., Колесников А.А. Основы электроники и схемотехники. — М.: Энергия, 2011.
5. Razavi, B. Fundamentals of Microelectronics, 2nd Edition. — Wiley, 2013.
6. Зайцев Д.А. Электроника. Аналоговые и цифровые устройства. — СПб.: БХВ-Петербург, 2015.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 2009.
8. Millman, J., & Halkias, C.C. Integrated Electronics: Analog and Digital Circuits and Systems. — McGraw-Hill, 1972.