

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

11 Дәріс. Аналогты сигналдарды сүзгілер

Дәрістің мақсаты: Аналогты сүзгілердің теориялық негіздерімен, түрлерімен, жұмыс істеу принциптерімен және қолдану салаларымен танысу.

1. Кіріспе

1.1 Аналогты сигнал

Аналогты сигнал — бұл амплитудасы уақыт бойынша үздіксіз өзгеретін сигнал. Мұндай сигналдар нақты физикалық процестерді бейнелейді:

- ❖ Адам дауысы (дыбыс тербелісі)
- ❖ Температура (уақытпен өзгеруі)
- ❖ Электр кернеуі немесе тогы

Мысалы: Егер біз кернеу өлшейтін датчиктен сигнал алсақ, ол 0-ден 5 В-қа дейін бірқалыпты өзгеріп отыруы мүмкін.

1.2 Сүзгілердің маңыздылығы

Аналогты сигналдарды өндеген кезде оларда жиі қажетсіз элементтер болады:

- ❖ Жоғары жиілікті шу
- ❖ Жиілік спектрінің қажетсіз бөліктері
- ❖ Басқа сигналдардың кедергісі

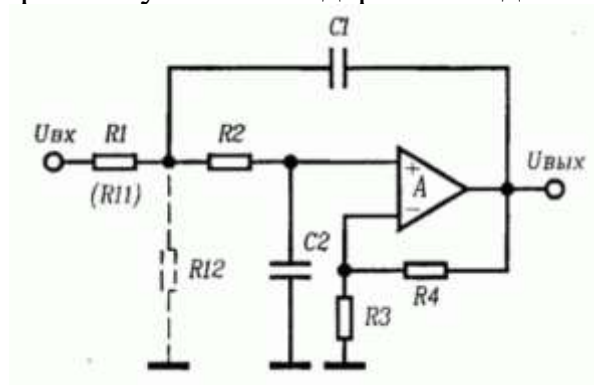
2. Аналогты сүзгілердің түрлері

Аналогты сүзгілер — сигналды жиілік спектрі бойынша өндеуге арналған құрылғылар. Олар кіріс сигналдан белгілі бір жиіліктегі компоненттерді өткізіп, қалғандарын басу арқылы жұмыс істейді. Мұндай сүзгілердің жұмыс істеу принципі резистор (R), конденсатор (C), индуктивтік катушка (L) секілді пассивті элементтерге, немесе операциялық күшейткіштерге (ОК) негізделеді.

Аналогты сүзгілер жиілікке байланысты келесі төрт негізгі түрге бөлінеді:

2.1 Төменгі жиілікті сүзгі (Low Pass Filter, LPF)

Бұл сүзгі төмен жиіліктегі сигналдарды еркін өткізеді, ал жоғары жиіліктерді басады. Яғни, ол тек қажет сигналдың баяу өзгеретін бөлігін қалдырып, жылдам өзгеретін шу немесе кедергіні жояды.



Қолданылуы:

- ❖ Аудиожүйелерде: Дыбыстық сигналдан жоғары жиілікті шуды жояды.

❖ Аналогты-цифрлық түрлендіргіш (АЦП) алдында: Сигналдың өткір шеттерін тегістейді (антиалиасинг фильтрі).

❖ Температура немесе қысым датчиктерінде: Сигналды баяулатып, нақты өлшем мәнін шығарады.

Пассивті LPF сұлбасы резистор мен конденсатордан тұрады:

❖ R — резистор

❖ C — конденсатор

❖ Кіріс сигналы R арқылы беріледі, C — жерге қосылған

Беріліс функциясы (Transfer Function):

$$H(s) = 1/(1+sRC)$$

Мұндағы $s=j\omega$ — Лаплас айнымалысы.

Кесетін жиілік (cutoff frequency) келесідей анықталады:

$$f_c = 1/(2\pi RC)$$

2.2 Жоғарғы жиілікті сүзгі (High Pass Filter, HPF)

Жоғарғы жиіліктерді өткізеді, ал төменгі жиіліктерді басады. Бұл сүзгі баяу өзгертін компоненттерді (мысалы, тұрақты токты немесе гулді) шектейді.

Қолданылуы:

❖ Акустикада: Микрофон сигналдарынан төмен жиілікті гул мен шуылдарды алып тастау.

❖ Импульстік жүйелерде: Жылдам өзгертін сигналдарды бөліп алу.

❖ ЭКГ жүйелерінде: Жүрек соғысы графигінен негізсіз тербелістерді жою.

Жоғарғы жиілікті сүзгі төменгі жиілікті сүзгінің айнасы сияқты:

❖ Кіріс сигнал алдымен конденсаторға беріледі

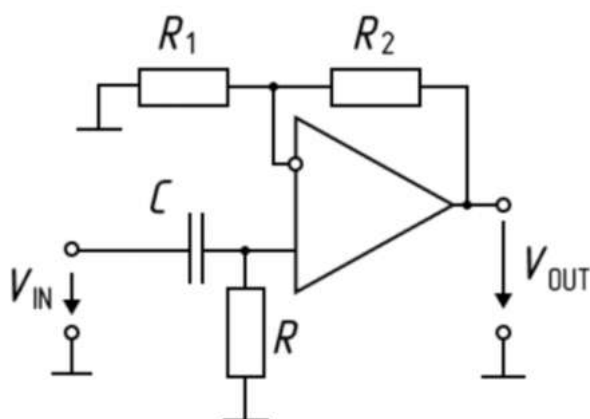
❖ Резистор жерге қосылған

Беріліс функциясы:

$$H(s) = sRC/(1+sRC)$$

Кесетін жиілік:

$$f_c = 1/(2\pi RC)$$



2.3 Жолақты сүзгі (Band Pass Filter, BPF)

Бұл сүзгі тек белгілі бір жиілік аралығындағы сигналдарды өткізеді, ал осы диапазоннан тыс жиіліктерді басып тастайды.

Қолданылуы:

❖ Радио қабылдағыштарда: Белгілі бір жиіліктегі радиотолқындарды қабылдау.

❖ Музыкалық жабдықтарда: Арнайы дыбыс диапазондарын (мысалы, бас, орташа, жоғары дыбыс) бөліп шығару.

❖ Сейсмикалық өлшеулер: Белгілі жиіліктегі діріл сигналдарын сүзу.

Мысал:

- 100 Гц–1 кГц диапазонында ғана сигналдарды өткізу.

Яғни:

❖ Төменгі шекара: $f_{low} = 100 \text{ Гц}$

❖ Жоғарғы шекара: $f_{high} = 1\,000 \text{ Гц}$
 $= 1000 \text{ Гц}$

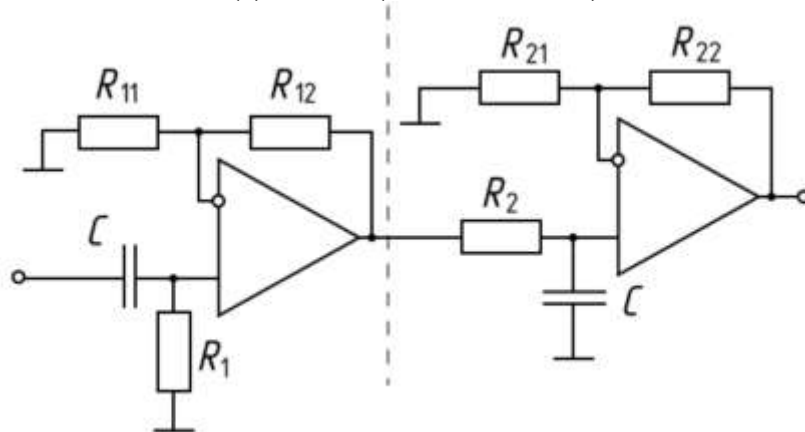
Сұлбалар:

❖ Бірнеше сүзгіні қатар қосу арқылы жасалады: LPF + HPF

❖ Сондай-ақ белсенді BPF сүзгілерде ОК (операциялық күшейткіш) қолданылады.

Беріліс функциясы (екі ретті сүзгі үшін мысал):

$$H(s) = sRC / (s^2LC + sRC + 1)$$



2.4 Жолақты бөгейтін сүзгі (Band Stop Filter, BSF немесе Notch Filter)

Белгілі бір тар жиілік диапазонын басып, ал қалған барлық жиіліктерді өткізіп жібереді. Бұл сүзгі ең қажет кезде дәл бір жиілікті ғана басу үшін қолданылады.

Қолданылуы:

❖ Желілік қуат сүзгілеу: 50 Гц немесе 60 Гц жиілікті шуылдарды жою (мысалы, медициналық ЭКГ құрылғыларында).

❖ Электронды құралдарда: Белгілі бір жиіліктегі гармоникаларды немесе кедергілерді басу.

❖ Акустикалық жүйелерде: Жоғары резонансты алып тастау.

Мысал:

❖ Егер құрылғыда 60 Гц кедергі болса, онда 59–61 Гц аралығындағы жиіліктерді басатын сүзгі пайдаланылады.

Сұлба:

BSF сүзгілер көбінесе BPF-тің инверсиясы ретінде жасалады. RC немесе LC тізбектер қолданылады.

Беріліс функциясы (екі ретті сүзгі үшін мысал):

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

Мұндағы:

- ❖ ω_0 — орталық жиілік
- ❖ Q — сапа коэффициенті (filter sharpness)

3. Аналогты сүзгілердің сипаттамалары

Аналогты сүзгілердің жұмысы тек олардың өткізетін немесе басатын жиілік диапазонына ғана емес, сонымен қатар жиіліктік сипаттамаларға, реттілігіне, және математикалық жобалануының типіне де байланысты. Бұл параметрлер сүзгінің сигналға қалай әсер ететінін – мысалы, амплитуданың әлсіреуін, фазалық бұрмалануды, және өткізу аймағындағы тегістікті анықтайды.

3.1 Жиілік жауабы (Frequency Response)

Жиілік жауабы — бұл сүзгінің әр түрлі жиіліктегі сигналдарды қалай өңдейтінін сипаттайтын график. Ол амплитудалық және фазалық сипаттамалардан тұрады. Көбіне амплитудалық жауап (gain vs frequency) қарастырылады.

Негізгі бөліктері:

❖ Passband (өткізу жолағы):
Бұл диапазонда сигнал амплитудасы аз өзгеріспен өтеді. Мысалы, төменгі жиілікті сүзгіде — төмен жиіліктер осы аймақта болады.

❖ Stopband (басу жолағы):
Бұл жиілік аймағында сүзгі сигналды өте қатты басып тастайды (мысалы, -40 дБ немесе одан да төменге дейін).

❖ Transition band (ауысу жолағы):
Өткізу және басу аймақтарының арасындағы өтпелі кезең. Бұл жерде сигнал біртіндеп әлсірейді.

❖ Cutoff frequency (fc):
Сүзгінің өткізуі максималды мәнінен 3 дБ-ге төмендеген жиілік нүктесі. Басқаша айтқанда, бұл шекара сигналының қуаты жартылай азаятын нүкте.

3.2 Сүзгінің реттілігі (Order of Filter)

Сүзгінің реттілігі (order) — бұл оның математикалық теңдеуіндегі ең жоғарғы дәрежелі туынды немесе полином дәрежесі. Практикада бұл сүзгідегі энергия сақтау элементтерінің (конденсатор мен индуктивтік) санына байланысты.

❖ 1-ретті сүзгі: 1 конденсатор немесе 1 индуктивтік элемент. Жиілік жауабы баяу өзгереді.

❖ 2-ретті сүзгі: Шекара жиілігіне жақындағанда сигналды күрт баса алады.

❖ Жоғары ретті сүзгілер (3-ретті, 4-ретті, ...):
Ауысу жолағы тар болады, басу деңгейі терең, және өткізу-басу арасындағы өтпелі шекара күрт болады.

Мысал:

- ❖ 1-ретті LPF:
Амплитуда баяу төмендейді (шамамен -20 дБ/декада).
- ❖ 2-ретті LPF:
Амплитуда тезірек төмендейді (-40 дБ/декада).
- ❖ 4-ретті сүзгі:
-80 дБ/декада дейін шұғыл басады.

3.3 Сүзгі типтері (тұрақты коэффициенттер бойынша)

Аналогты сүзгілерді жобалау кезінде әр түрлі математикалық тәсілдер қолданылады. Бұл тәсілдер сүзгінің жиіліктік сипаттамасын — атап айтқанда, өткізу жолағындағы амплитуда өзгерісі (тегіс немесе толқындалған), ауысу жолағының шұғылдығы (қаншалықты тез басылады), фазалық бұрмалану деңгейі және сүзу тиімділігі секілді параметрлерді анықтайды.

Сүзгілердің негізгі типтерінің әрқайсысының өзіндік ерекшеліктері, артықшылықтары мен кемшіліктері бар.

Butterworth сүзгісі өткізу жолағында толқынданусыз өте тегіс амплитудалық сипаттамасымен ерекшеленеді. Ол қарапайым әрі сенімді болғандықтан көптеген жалпы мақсаттағы қолданбаларда кеңінен қолданылады. Алайда, оның ауысу жолағы салыстырмалы түрде баяу, яғни жиіліктер арасындағы сүзу шекарасы жұмсақ.

Chebyshev сүзгісінің I типі өткізу жолағында пульсация (ripple) болғанымен, өте шұғыл ауысу жолағын қамтамасыз етеді. Бұл сүзгі қысқа диапазонда жиілікті өте тез басып тастау қажет болғанда қолданылады. Оның басты артықшылығы — өткізу мен басу аймақтары арасындағы ауысудың шапшаңдығы, алайда ол толқындануға байланысты сигналды аздап бұрмалауы мүмкін.

Chebyshev сүзгісінің II типі, керісінше, өткізу жолағында амплитудасы тегіс, бірақ басу жолағында пульсация бар. Ол өткізу жолағында сигнал сапасын сақтау маңызды болғанда пайдаланылады. Бұл сүзгі шұғыл сүзуді қамтамасыз етеді, бірақ оның синтезі мен есептелуі I типке қарағанда күрделірек.

Bessel сүзгісі фазалық бұрмаланудың ең аз деңгейін қамтамасыз етеді және сигналдың бастапқы формасын сақтауға мүмкіндік береді. Бұл оның group delay көрсеткішінің тұрақты болуымен байланысты. Мұндай сүзгілер әсіресе дыбыстық сигналдарды немесе импульстік формаларды өңдегенде қолайлы. Дегенмен, оның ауысу шекарасы өте баяу және өткір сүзу қажет болғанда жеткіліксіз болуы мүмкін.

Elliptic (немесе Cauer) сүзгісі — ең шұғыл сүзуді қамтамасыз ететін сүзгі түрі. Ол әрі passband-та, әрі stopband-та пульсацияға ие, бірақ берілген сипаттамаларға ең аз реттілікпен жетуге мүмкіндік береді. Бұл сүзгінің басты артықшылығы — жоғары тиімділік, яғни өте кішкентай реттілікпен өткізу және басу аймақтары арасында күрт өтуді қамтамасыз етуі. Бірақ ол күрделі құрылымға ие және фазалық бұрмалануы басқа сүзгі түрлеріне қарағанда көбірек болуы мүмкін.

4. Аналогты сүзгі элементтері

Аналогты сүзгілердің жұмыс істеуі электрлік компоненттердің өзара әрекеттесуіне негізделген. Бұл элементтер сигналдың жиілігіне байланысты ток пен кернеудің өту жолын өзгертіп, қажетсіз жиіліктерді басады немесе өткізеді.

1) Резистор (R) – токқа қарсыласу көрсететін элемент. Жиіліктен тәуелсіз әрекет етеді және сигналдың деңгейін реттеуге көмектеседі.

2) Конденсатор (C) – сыйымдылық элементі. Жоғары жиілікті сигналды оңай өткізеді, ал төмен жиіліктерді тежейді. Осы қасиеті сүзгілерде жиілікке байланысты реакция жасау үшін пайдаланылады.

3) Индуктивтік катушка (L) – жиілігіне байланысты токты тежейтін элемент. Төмен жиілікте аз кедергі көрсетеді, ал жоғары жиілікте үлкен реактивті кедергі тудырады. Бұл оны жоғары жиілікті басу үшін тиімді етеді.

4) Операциялық күшейткіш (ОК) – бұл актив элемент, ол кернеуді күшейтіп, сигналдың формасын өзгертпей қажетті сүзу қасиетін қамтамасыз етеді. Актив сүзгілерде жиі қолданылады, себебі ол сыртқы қуат көзінің көмегімен сигналды күшейтуге мүмкіндік береді.

5. Сүзгілердің құрылымдық түрлері

Аналогты сүзгілер құрылымы мен құрамына қарай пассив және актив түрлерге бөлінеді. Әр түрдің өз артықшылықтары мен шектеулері бар.

5.1 Пассив сүзгілер

Пассив сүзгілер тек пассив элементтерден — резисторлар (R), конденсаторлар (C), индуктивтіктер (L) — тұрады. Олардың жұмыс істеуі үшін сыртқы қуат көзі қажет емес, себебі олар сигналды тек әлсіретіп, белгілі бір жиіліктерді өткізеді немесе басады.

Артықшылықтары:

- ❖ Қарапайым құрылым;
- ❖ Қуат көзі қажет емес;
- ❖ Сенімді және ұзақ жұмыс істейді.

Кемшіліктері:

- ❖ Сигналды күшейтпейді, тек әлсірету мүмкіндігі бар;
- ❖ Индуктивтіктер көлемді және ауыр болуы мүмкін;
- ❖ Жоғары ретті сүзгілер жасау қиынырақ.

5.2 Актив сүзгілер

Актив сүзгілерде пассив элементтермен қатар операциялық күшейткіштер (ОК) де қолданылады. Бұл оларға сигналды күшейтуге, формасын бұзбай сүзуге және жоғары тиімділікпен жұмыс істеуге мүмкіндік береді.

Артықшылықтары:

- ❖ Сигналды күшейту мүмкіндігі бар;
- ❖ Индуктивтіктерсіз күрделі сүзгілер жасауға болады (RC + ОК);
- ❖ Жиіліктік сипаттамаларды нақты басқаруға болады;
- ❖ Өлшемі шағын, заманауи электроникаға ыңғайлы.

Кемшіліктері:

- ❖ Қуат көзі қажет;

❖ Жоғары жиілікті қолданбаларда шектеулер болуы мүмкін (ОК сипаттамасына байланысты).

6. Аналогты сүзгілердің қолдану салалары

Аналогты сүзгілер көптеген инженерлік және ғылыми салаларда қолданылады. Әр салада олардың нақты міндеті болады — сигналды тазарту, қалаулы диапазонды таңдау немесе кедергілерді басу.

1) Аудио техника:

Аналогты сүзгілер дыбыстық сигналдарды өңдеуде қолданылады. Төменгі жиілікті сүзгілер арқылы төмен жиіліктегі шуды жою, жолақты сүзгілер арқылы музыкалық сигналды әр түрлі жиілік диапазондарына бөлу (мысалы, бас, орта, жоғары) жүзеге асады.

2) Байланыс жүйелері:

Модуляция және демодуляция кезінде сүзгілер сигналдың белгілі бір жиілігін бөліп алады. Мысалы, радио қабылдағыштарда нақты жиілікті алу үшін жолақты сүзгілер қолданылады. Сонымен қатар, аралас сигналдардан қажетті жиілікті бөліп алуға мүмкіндік береді.

3) Өлшеу жүйелері:

Датчиктер мен сенсорлардан алынатын сигналдар жиі шуды қамтиды. Бұл шуды жою үшін аналогты сүзгілер қолданылады. Мысалы, температура немесе қысым өлшегіштерінің сигналдарын АЦП-ге дейін тазалау қажет болады.

4) Электр жабдықтары:

Электронды құрылғыларда сүзгілер электрлік желідегі жоғары жиілікті кедергілерді басу үшін қолданылады. Сондай-ақ, қуат көздерінде, инверторларда және түрлендіргіштерде сигналдарды тұрақтандыру үшін сүзгілер қолданылады.

5) Медицина:

Медициналық құрылғылар, мысалы ЭКГ (жүрек сигналдарын) және ЭЭГ (ми белсенділігін) тіркейтін жабдықтар өте әлсіз сигналдармен жұмыс істейді. Бұл сигналдарда жиі шу болады. Сондықтан оларды дәл өлшеу үшін төменгі жиілікті және жолақты сүзгілер арқылы тазарту қажет.

Қорытынды:

Аналогты сүзгілер – сигналдарды өңдеуде маңызды рөл атқаратын электрондық құрылғылар. Олар сигналдың қажетсіз жиіліктерін басып, тек қажетті бөлігін өткізуге мүмкіндік береді. Сүзгілердің негізгі сипаттамалары – жиілік жауабы, реттілігі және типі – олардың тиімділігін және қолдану саласына сәйкестігін анықтайды.

Пассив және актив сүзгілердің әрқайсысының артықшылықтары бар: пассив сүзгілер қарапайым әрі қуат көзіне тәуелсіз болса, актив сүзгілер сигналды күшейтіп, дәлірек сүзуге мүмкіндік береді. Сүзгі типтерінің әрқайсысы – Butterworth, Chebyshev, Bessel, Elliptic – түрлі талаптарға сәйкес таңдалады: біреуінде тегіс өткізу жолағы маңызды болса, енді бірінде шұғыл сүзу немесе фазалық дәлдік шешуші рөл атқарады.

Аналогты сүзгілердің қолдану салалары өте кең: аудиожүйелерден бастап байланыс, медициналық құрылғылар мен өндірістік автоматтандыруға дейін. Бұл олардың әмбебаптығы мен маңыздылығын көрсетеді. Болашақта да аналогты сүзгілер цифрлық өңдеумен қатарласа отырып, нақты уақыттағы сигналдарды сапалы өңдеу үшін қолданыла береді.

Әдебиеттер тізімі:

1. Седра А., Смит К. Микроэлектрондық схемалар. – М.: Вильямс, 2022.
2. Хоровиц П., Хилл У. Электроника өнері. 1, 2 том. – М.: ДМК Пресс, 2020.
3. А. С. Мызров. Электрлік сүзгілер теориясы. – Алматы: ҚазҰТЗУ, 2019.
4. А. Титов. Фильтры в аналоговой электронике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018.
5. Б. Б. Бахарев. Сигналдарды өңдеу негіздері. – М.: Радио и связь, 2017.
6. К. Оразбаев. Электроника негіздері (оқулық). – Алматы: Білім, 2021.
7. Allen, P.E., Holberg, D.R. CMOS Analog Circuit Design. – Oxford University Press, 2016.
8. Williams, A. & Taylor, F. Electronic Filter Design Handbook. – McGraw-Hill, 2014.