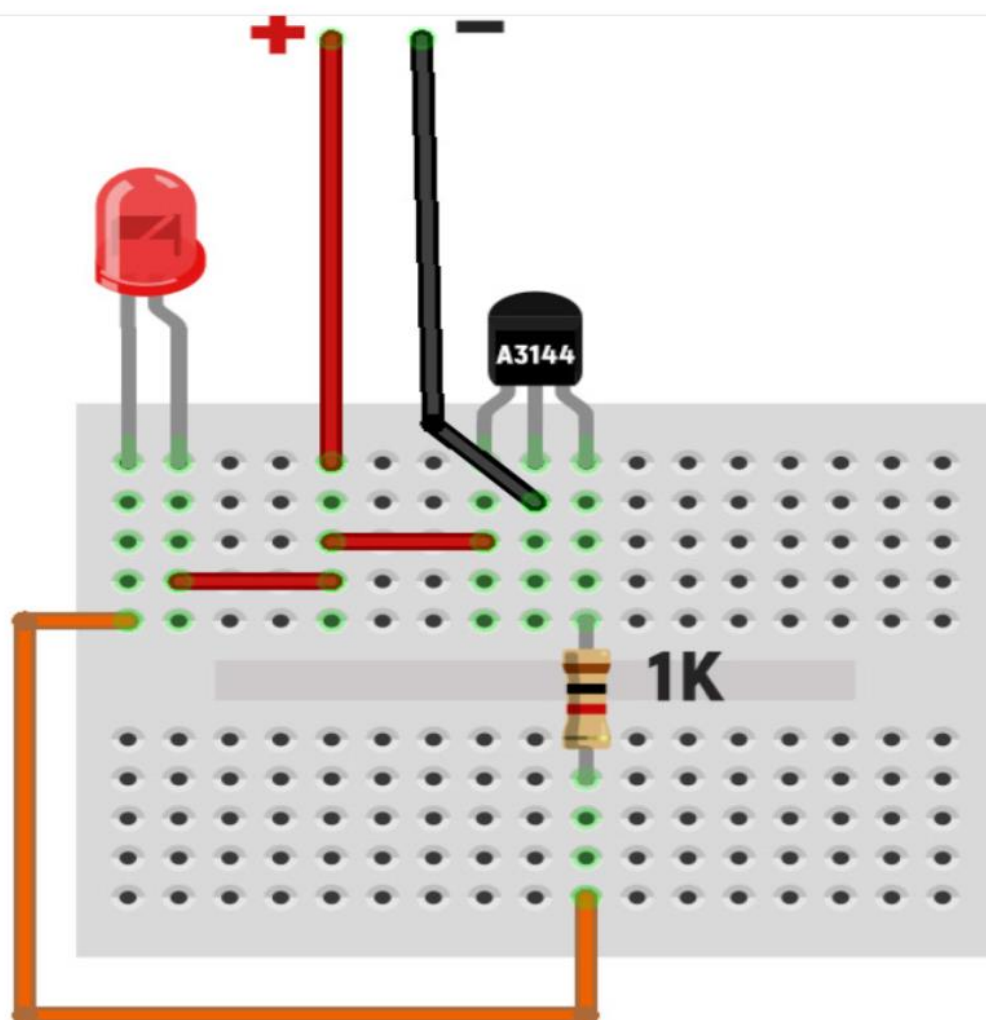


А.М. Жандарбекова
Ю.П. Мартынюк

ЭЛЕКТРОНИКА ЖӘНЕ СҰЛБАТЕХНИКА НЕГІЗДЕРІ



Қостанай, 2024

Қазақстан Республикасы білім және ғылым министрлігі
А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университеті
Машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультеті
Математика және физика кафедрасы

А.М. Жандарбекова
Ю.П. Мартынюк

Электроника және сұлбатехника негіздері

Оқу – әдістемелік құрал

Қостанай, 2024

ӘӨЖ 621.38
КБЖ 32.85
Ж 26

Авторлары:

Жандарбекова Айдана Мешитбаевна – А.Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультетінің математика және физика кафедрасының оқытушысы;

Мартынюк Юрий Петрович - А.Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультетінің математика және физика кафедрасының аға оқытушысы.

Рецензенттер:

Шаяхметов Амангельды Булатович – техника ғылымдарының кандидаты, М.Дулатов атындағы ҚИнЭУ профессоры;

Нупирова Арайлым Маратовна - А.Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің Ө. Сұлтанғазин атындағы педагогикалық институтының физика, математика және цифрлық технология кафедрасының аға оқытушысы;

Поезжалов Владимир Михайлович - ф.-м.ғ.к., А.Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің машина жасау, энергетика және ақпараттық технологиялар факультетінің математика және физика кафедрасының профессоры.

Жандарбекова А.М., Мартынюк Ю.П.

Электроника және сұлбатехника негіздері: Оқу – әдістемелік құрал. - Қостанай: А.Байтұрсынұлы атындағы ҚӨУ, 2024.- 66 б.

ISBN 978-601-356-355-8

Оқу құралы радиоэлектрондық компоненттер туралы негізгі мәліметтерді, аналогтық және сандық технологияның негізгі компоненттерін қамтиды. Радиоэлектрондық құрылғылардың режимдерін есептеу тапсырмалары назар аударылды, электрондық құрылғылардың принциптік схемалары нұсқаулыққа енгізілді, олардың жұмыс принципі қарастырылды.

5В060400-Физика мамандығының студенттеріне арналған. Оқу құралын жоғары оқу орындарының оқытушылары «электроника және сұлбатехника негіздері» пәні бойынша сабақтар өткізу кезінде, сондай-ақ студенттер оқу сабақтарына дайындық кезінде пайдалана алады.

ӘӨЖ 621.38
КБЖ 32.85

А. Байтұрсынұлы атындағы Қостанай өңірлік университетінің оқу-әдістемелік кеңесімен бекітіліп, басылымға ұсынылды, 27.03.2024 ж., хаттама № 2

ISBN 978-601-356-355-8

© А.Байтұрсынұлы атындағы
Қостанай өңірлік университеті, 2024
© Жандарбекова А.М., 2024
© Мартынюк Ю.П., 2024

Мазмұны

Кіріспе	4
1 Радиоэлементтердің шартты графикалық белгілері	6
2 Қуат көздері	11
2.1 Қуат көздерінің жіктелуі	11
2.2 Екінші қуат көздерінің сұлбасы	13
2.3 Түзеткіштер	13
2.4 Тегістейтін сүзгілер	16
2.5 Кернеу тұрақтандырғыштары	20
3 Электрондық күшейткіштер	23
3.1 Биполярлық транзисторлардағы күшейткіштер	23
3.2 Дифференциалдық және операциялық күшейткіштер	32
3.3 Операциялық күшейткіштердің қолданылуы	39
4 Сигнал генераторлары	49
4.1 Сигналдардың негізгі түрлері	49
4.2 Трансформатордың кері байланысы бар LC генераторы	52
4.3 Вин-Робинсон көпірі негізіндегі генератор	53
4.4 Мультивибратор	54
4.5 Функционалды генератор	55
5 Сандық техника құрылғылары	56
5.1 Логикалық элементтер	56
5.2 Тізбек типтегі логикалық құрылғылар	60
Қорытынды	65
Пайдаланған әдебиеттер тізімі	656

Кіріспе

Радиоэлектрониканың күнделікті өмірде, ғылым мен техникада кеңінен қолданылуы және студенттердің радиотізбектерге деген зор қызығушылықтары болашақ маман – физиктің радиотехника саласында жеткілікті түрде терең даярлығын талап етеді.

Қазіргі радиоэлектроника – ақпаратты генерациялауға, беруге, қабылдауға және түрлендіруге, сақтауға байланысты ғылым мен техниканың бірқатар салаларының жиынтық атауы. [1]. Олардың негізгілері радиотехника және электроника, сонымен қатар ақпарат тасымалдаушысы ретінде көп өлшемді сигналды пайдаланатын опто және микроэлектроника және функционалды микроэлектроника болуы мүмкін. Радиоэлектроника радио диапазонының электромагниттік тербелістерімен шектелмейді. Гамма диапазонына дейінгі қысқа толқындар да қолданылады, яғни радиоэлектроника да толық толқынға айналды. Радиоэлектроника құрылғыларының көмегімен шешілетін негізгі тапсырма - шартты сигналдар арқылы берілетін ақпаратты беру, қабылдау, өңдеу және сақтау әдістері мен құрылғыларын жасау. Ақпараттық процесс сигналдарды беру, түрлендіру және сақтау ретінде жүреді. Радиоэлектрониканың ақпараттық бағыттылығы ғылым мен техниканың жаңа салаларының, атап айтқанда техникалық кибернетиканың, есептеуіш техниканың және ақпараттық технологиялардың пайда болуына негіз болды.

Екінші жағынан, электронды құрылғылардың өте кең таралуына қарамастан, студенттер теориялық материалды оқуда әртүрлі мәселелерге жиі кездеседі. Бұл арнайы әдебиеттерде осы сұрақтардың жеткілікті түрде толық қамтылмауымен байланысты емес. Ұсынылып отырған оқу-әдістемелік құрал осы кемшіліктерді жоюға арналған.

Бұл оқу құралының **мақсаты** – теория және жұмыс істеу принциптері, сондай-ақ электронды құрылғылардың негізгі құрамдас бөліктерінің есептеулері саласындағы білімдерді меңгеруге және жүйелеуге көмектесу.

Міндеті: теориялық материалды игеруге ықпал ету, студенттерді электронды құрылғылардың электр сұлбаларын оқуға, электр сигналдарының негізгі түрлерін ажыратуға, күшейткіш пен генератордың тізбектерін, қоректену схемаларын есептеуге үйрету, студенттерді цифрлық технология негіздерімен таныстыру.

1 Радиоэлементтердің шартты графикалық белгілері

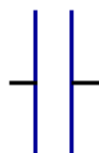
Резистор – токты кернеуге және кернеуді токқа сызықты түрлендіруге, токты шектеуге, электр энергиясын жұтуға арналған электр кедергісінің белгілі бір тұрақты немесе айнымалы мәні бар электр тізбектерінің пассивті элементі. Резисторлар электронды құрылғылардың ең көп таралған элементтері болып табылады. Резистордың шартты графикалық белгіленуі 1-суретте көрсетілген.



Сурет 1 - Резистордың шартты белгісі

Бұл белгілеуді әртүрлі элементтермен толықтыруға болады (мысалы, резистордың максималды мүмкін болатын қуат шығынын көрсететін тіктөртбұрыштың ішіндегі соққылар). Резистордың негізгі параметрлері тұрақты токтың кедергісі, максималды қуат шығыны, максималды рұқсат етілген кернеу болып табылады. Өнеркәсіпте жүздеген Ом-ның жүздеген гигаом-ға дейінгі кедергісі бар резисторлар шығарылады, олар ватт үлесінен мегаватт бірлігіне дейін таратылатын қуатқа арналған (мысалы, тепловоздар мен электровоздардың тежегіш резисторлары).

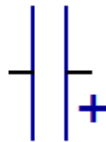
Радиоэлектрондық құрылғылардың екінші ең көп таралған элементі конденсаторлар. Конденсатор-бұл электр өрісінің заряды мен энергиясын сақтауға арналған электр сыйымдылығының белгілі бір тұрақты немесе айнымалы мәні және төмен өткізгіштігі (үлкен тұрақты ток кедергісі) бар екі терминал. Конденсатор пассивті электронды компонент болып табылады. Ең қарапайым түрде конструкция пластиналардың өлшемімен салыстырғанда қалыңдығы шағын диэлектрикпен бөлінген пластиналар деп аталатын екі пластина тәрізді электродтардан тұрады. Іс жүзінде қолданылатын конденсаторларда диэлектрлік және көпқабатты электродтардың көптеген қабаттары немесе төрт дөңгелек жиігі бар цилиндрге немесе параллелепипедке оралған айнымалы диэлектрик пен электродтардың жолақтары бар (орауға байланысты). Конденсатордың шартты графикалық белгіленуі 2-суретте көрсетілген.



Сурет 2 - Конденсатордың шартты белгісі

Дәстүрлі конструкциядағы конденсаторлар диэлектрик ретінде әртүрлі органикалық материалдарды (қағаз, политетрафторэтилен, лавсан,

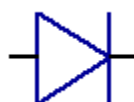
полипропилен), бейорганикалық материалдарды (слюданы, керамиканы) пайдаланады, сондай-ақ вакуумды диэлектригі бар конденсаторлар болады. Дәстүрлі материалдардың жеткілікті төмен диэлектрлік өтімділігіне байланысты салмағы мен өлшемінің қолайлы көрсеткіштеріне ие бола отырып, жоғары сыйымдылықты конденсаторларды (ондаған микрофарадтан астам) өндіру іс жүзінде өте қиын. Сондықтан оксидті конденсаторлар әзірленді, онда диэлектрик ретінде қышқыл ерітіндісімен сіңген қағаз төсемімен байланыста болатын алюминий оксидінің жұқа қабаты пайдаланылады. Мұндай конденсаторлар Фарад бірліктеріне жететін өте үлкен сыйымдылыққа ие. Дегенмен, олар қалыпты жұмыс істеуі үшін тұрақты поляризациялық кернеуді, сонымен қатар белгілі бір полярлықты қажет етеді. Сондықтан оксидті конденсатордың қалыпты жұмысы қамтамасыз етілетін кернеудің полярлығы 3-суретте келтірілген оның шартты графикалық белгілеуінде («+» белгісі) көрініс тапты.



Сурет 3 - Оксидті конденсатордың шартты белгісі

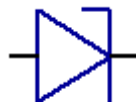
Оксидті конденсаторлар полярлық немесе электролиттік деп те аталады. Айта кету керек, оксид конденсаторына қарама-қарсы полярлық кернеу қолданылған кезде оксид диэлектригі жойылады, кейде оның жарылғыш сипаттағы корпусының қысымының төмендеуімен бірге жүреді.

Ең маңызды және жиі қолданылатын жартылай өткізгіш құрылғы - диод. Диод, ең көп таралған жағдайда, электр тогының бағытына байланысты әр түрлі өткізгіштігі бар электронды элемент болып табылады. Диод электродтары анод және катод деп аталады. Егер диодқа тікелей кернеу берілсе (яғни анод катодқа қатысты оң потенциалға ие болса), онда диод ашық болады (ол арқылы тікелей ток өтеді, оның кедергісі төмен). Керісінше, егер диодқа кері кернеу берілсе (катодтың анодқа қатысты оң потенциалы болса), онда диод жабық (оның кедергісі үлкен, кері ток аз және көптеген жағдайларда нөлге тең деп санауға болады). Жартылай өткізгішті диодтың шартты графикалық белгіленуі 4-суретте көрсетілген.



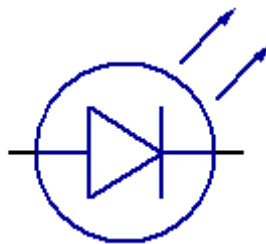
Сурет 4 - Жартылай өткізгіш диодтың шартты белгісі

Жартылай өткізгішті диодтардың ерекше түрі стабилитрондар болып табылады. Жартылай өткізгішті стабилитрон - бұзылу режимінде кері ығысу кезінде жұмыс істейтін жартылай өткізгішті диод. Бұзылу басталғанға дейін стабилитрон арқылы шамалы ағып кету токтары өтеді және оның кедергісі өте жоғары. Бұзылу басталған кезде стабилитрон арқылы ток күрт артады, ал оның дифференциалды кедергісі әртүрлі құрылғылар үшін Ом үлесінен жүздеген омға дейін төмендейді. Сондықтан, бұзылу режимінде стабилитрондағы кернеу кері токтардың кең диапазонында берілген дәлдікпен сақталады. Стабилитрондардың негізгі мақсаты - кернеуді тұрақтандыру. Стабилитронның шартты графикалық белгіленуі 5-суретте көрсетілген.



Сурет 5 - Стабилитронның шартты белгісі

Жарық диодтары индикация және жарықтандыру құрылғыларында кеңінен қолданылады. Жарықдиодты немесе жарық шығаратын диод-бұл электр тогын тікелей бағытта өткізген кезде оптикалық сәуле шығаратын, электронды тесігі бар жартылай өткізгіш құрылғы. Жарық диоды шығаратын жарық спектрдің тар диапазонында жатыр. Жарық диодының сәуле шығару толқынының диапазоны мен ұзындығы пайдаланылған жартылай өткізгіштердің физикалық қасиеттеріне, мысалы, тыйым салынған аймақтың еніне байланысты. Жарық диодтың әдеттегі графикалық белгіленуі 6-суретте көрсетілген.

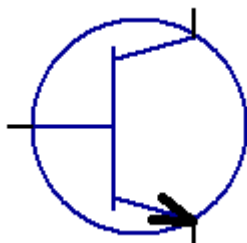


Сурет 6 - Жарық шығаратын диодтың шартты белгісі

Жарық диодты белгілеу шеңбер тәріздес корпус белгісімен және оптикалық сәулелену символымен толықтырылған жартылай өткізгіш диодтың белгілеуінен тұрады.

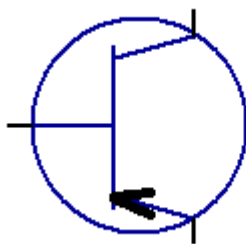
Электронды құрылғылардың негізгі белсенді элементі транзистор болып табылады. Транзистор – жартылай өткізгіш материалдан жасалған, әдетте үш шығысы бар, кіріс сигналына электр тізбегіндегі токты басқаруға мүмкіндік беретін электрондық компонент. Әдетте электрлік сигналдарды күшейту, генерациялау және түрлендіру үшін қолданылады. Транзисторлар биполярлы болып бөлінеді – олардың жұмысына заряд тасымалдаушылардың екі түрі де

қатысады – электрондар да, тесіктер де, өрістер де (немесе униполярлы), олардың жұмысында заряд тасымалдаушылардың тек бір түрі ғана негізгі болып табылады, ал электр өрісінің көмегімен құрылғы арқылы өтетін ток күштерін басқарады. 7-суретте n-p-n құрылымының биполярлық транзисторының шартты графикалық белгісі көрсетілген.



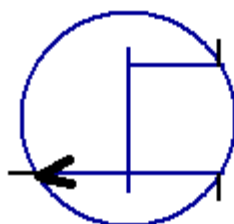
Сурет 7 - n-p-n құрылымды биполярлы транзисторының шартты белгісі

n-p-n құрылымының транзисторларымен қатар p-n-p құрылымының транзисторлары пайдаланылады. Мұндай транзистордың шартты графикалық белгісі 8-суретте көрсетілген.



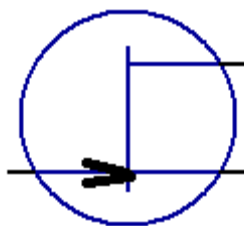
Сурет 8 - p-n-p құрылымының биполярлы транзисторының шартты белгісі

Жоғары жиілікті және күшейткіш құрылғылардағы өрістік транзисторлардың ең көп тараған түрі арналық өрістік транзистор болып табылады. p-типті арнасы бар өрістік транзистордың шартты графикалық белгіленуі 9-суретте көрсетілген.



Сурет 9 - p-типті арнасы бар өрістік транзистордың шартты белгісі

n-типті арнасы бар өрістік транзисторлар да шығарылады. Мұндай транзистордың шартты белгісі 10-суретте көрсетілген.



Сурет 10 - n-типті арнасы бар өрістік транзистордың шартты белгісі

Қоректендіруді қосу және ажырату және радиоэлектрондық құрылғылардың әртүрлі режимдерін ауыстырып қосу үшін әртүрлі конструкциядағы ажыратқыштар мен ауыстырып қосқыштарды қолданады. Ажыратқыш - кем дегенде өзінің байланыстарының («қосылған» және «ажыратылған») тіркелген екі жағдайы бар және сыртқы күштердің әсерімен осы жағдайды байланыстардың басқа жағдайына өзгерте алатын («қосылған» немесе «ажыратылған») коммутациялық аппарат. Қосқыштың шартты графикалық белгісі 11-суретте көрсетілген.



Сурет 11 – Ауыстыру контактінің шартты белгісі

2 Қорек көздері

2.1 Қорек көздерінің жіктелуі

Көптеген электрондық құрылғылардың жұмысы қорек көзінен тұтынылатын энергияны пайдаланып әртүрлі сигналдарды түрлендіру немесе алу болып табылады.

Қорек көзі – электронды құрылғыларды электр қуатымен қамтамасыз етуге арналған құрылғы.

Барлық қорек көздерін 2 топқа бөлуге болады:

1. Біріншілік қорек көзі.
2. Екіншілік қорек көздері.

Біріншілік қорек көздері оның басқа түрлерін электр энергиясына түрлендіреді: жылулық, химиялық, механикалық және т.б.

Біріншілік қорек көздері

Бұл топқа жататын қорек көздері:

1. Химиялық қорек көздері (галваникалық элементтер, батарея және аккумуляторлар);
2. Термобатареялар;
3. Термоэлектронды түрлендіргіштер;
4. Фотоэлектрлік түрлендіргіштер;
5. Отынды элементтер;
6. Биохимиялық қорек көздері;
7. Атомды элементтер;
8. Электромашиналы генераторлар.

Химиялық қорек көздері - автономды қоректі талап ететін, аз қуатты құрылғылар мен аппаратураларды топпен қоректендіру үшін кеңінен қолданылады. Батареялар мен аккумуляторлар санымен қатар қосымша және резервті қорек көзі ретінде пайдаланылады. Мұндай қорек көздерінің шығыс керенуінің айнымалы құраушысы жоқ десе де болады.

Термобатареялар – бұл тізбектегі қосылған термопаралар. Термобатареялар аз қуатты қорек көзі ретінде пайдаланылады. Мысалы: радиоқабылдағыштар.

Термоэлектронды түрлендіргіштер - қатты қызатын катоды бар вакуумды немесе газды аспаптар. Жылу энергиясын электр энергиясына айналдыру бұл құрылғыларда термоэлектронды эмиссия құбылысының арқасында жүзеге асады.

Фотоэлектрлік түрлендіргіш – жылу және күн энергиясын электр энергиясына түрлендіреді. Фотоэлектронды түрлендіргіштер аз қуатты қажет ететін радиоэлектрлік, спутниктегі техникаларда қолданылады.

Отынды элементтер – химиялық реакцияның энергиясын электрлік энергияға түрлендіреді. Жұмыс істеу принципі заттың тотықтануына негізделген.

Биохимиялық ток көздері отындық қорек көздері сияқты химиялық реакция энергиясын электр энергиясына түрлендіреді.

Атомды элементтер аз қуатты қажет ететін радиоэлектронды аппаратураларды қоректендіру үшін қажет. Жұмыс істеу принципі атомды элемент 2 электродтан тұрады. Екі электродтын арасында диэлектрик немесе вакуум болады. Электродтың біреуіне радиоактивті стронций орнатылады. Стронций β сәулесін шығарады. Осының арқасында 2 электродтың арасында кернеулер айырымы пайда болады.

Электромашиналы генераторлар механикалық энергияны электрлік энергияға түрлендіреді. Олар тұрақты және айнымалы ток генераторлары болып екіге бөлінеді.

Екіншілік қорек көздері жоғарыда айтып өткендей радиоэлектронды аппаратуралардың құрамдас бөлігі болып табылады. Ол біріншілік қорек көзінен алынған электр энергиясын қоректендірілуі керек болған радиоэлектронды аппаратуралардың талабына сәйкес түрлендіріп береді.

Екіншілік қорек көздері электр энергиясының әртүрлі формаларын өзара түрлендіруге арналған. Олар кернеуді жоғарылатуға немесе азайтуға, ток жиілігін өзгертуге, айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіруге, кернеуді тұрақтандыруға қабілетті.

Екіншілік қорек көздерінің классификациясы

Екіншілік қорек көздерінің төмендегі параметрлеріне сәйкес классификациялауға болады:

1. Қоректендіретін тізбектің түрлеріне байланысты

1. Бір фазалы айнымалы ток желісінің электр энергиясын пайдаланатын қорек көздері;
2. Үш фазалы айнымалы ток желісін электр энергиясын пайдаланатын қорек көздері;
3. Автономды тұрақты ток көзінің энергиясын пайдаланатын қорек көздері;

2. Жүктемеге түсетін кернеуге байланысты:

1. Төмен кернеулі қорек көздері 100 В – қа дейін;
2. Орташа кернеулі қорек көздері 100 В – 1000 В дейін;
3. Жоғары кернеулі қорек көздері 1000 В – тан жоғары;

3. Жүктеменің қуатына байланысты:

1. Аз қуатты қорек көздері 100 В – қа дейін;
2. Орташа қуатты қорек көздері 100 В – 1000 В дейін;
3. Жоғары қуатты қорек көздері 1000 В – тан жоғары;

4. Жүктеменің тогының түріне байланысты:

1. Шығысындағы тогы айнымалы қорек көздері;
2. Шығысындағы тогы тұрақты қорек көздері;
3. Шығысындағы тогы тұрақты айнымалы қорек көздері;

5. Шығысының санына байланысты:

1. Бір шығысы бар;
2. Көп каналды шығысы бар;

6. Жүктемедегі кернеудің тұрақтылығына байланысты:

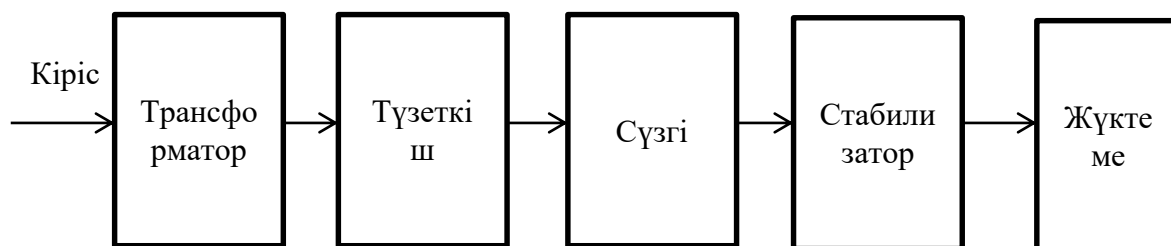
1. Тұрақтандырылған қорек көздері;
2. Тұрақтандырылмаған қорек көздері;

Тәжірибеде біріншілік қорек көздері құрылғыны электр желісіне қосу мүмкін болмаған немесе қауіпсіз жағдайда ғана пайдаланылады (негізінен - тасымалды құрылғыларда). Көп жағдайда стандартты айнымалы ток электр желісінің кернеуін берілген электрондық құрылғы үшін қажеттіге түрлендіретін екіншілік қорек көздерін қолданған жөн.

Электрондық құрылғылардың басым көпшілігі қоректену үшін тұрақты кернеуді талап етеді, оның үстіне электр желісінің номиналды кернеуі - 220В-ден едәуір аз. Мәселен, мысалы, сандық микросұлбаларға негізделген құрылғылар әдетте 3,3-5 В, аналогтық электронды құрылғылар - 9-12 В, азырақ - 50 В дейін (мысалы, қуатты төмен жиілікті күшейткіштер) қоректендіру кернеуін пайдаланады. Бұдан басқа, жиі қоректендіретін кернеуге кейбір қосымша талаптар қойылады: тұрақтылық, пульсацияның белгілі бір кернеуі.

2.2 Екіншілік қорек көздерінің сұлбатехникасы

Екіншілік қорек көздері бірнеше түйіндерден тұрады, олардың әрқайсысы өз функцияларын орындайды. Трансформаторлық қорек көзінің құрылымдық схемасын қарастырайық (12 суретте көрсетілген).



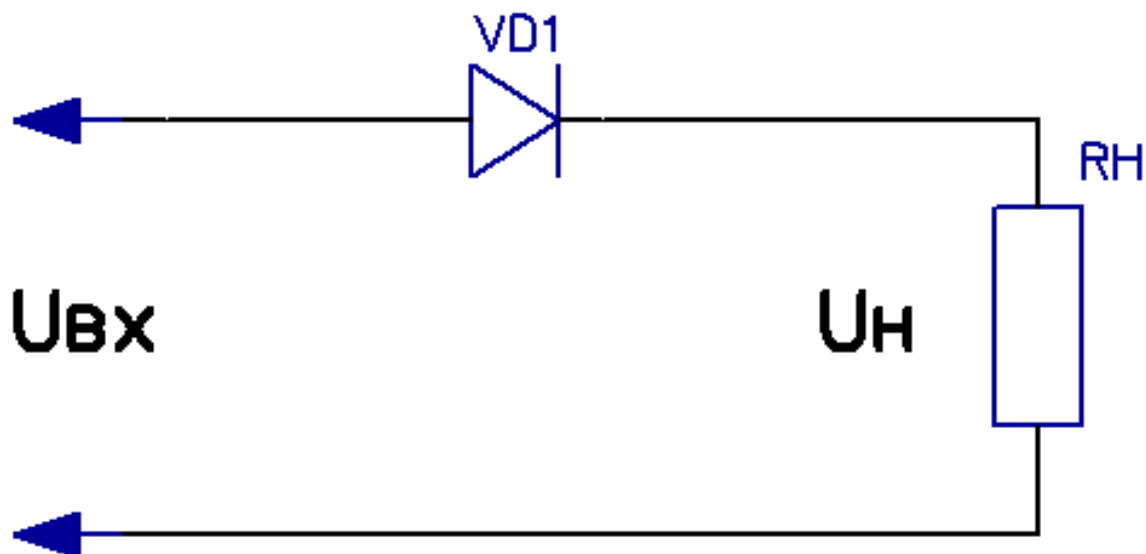
Сурет 12 – Трансформаторлық қуат көзінің құрылымдық сұлбасы

Қорек көзінің кірісіне электр желісінің айнымалы кернеуі беріледі. Трансформатор кернеуді қажетті мәнге дейін төмендетуге қызмет етеді (күшейткіш трансформаторлар жиі емес қолданылады - желіден жоғары кернеуді алу қажет болған жағдайда). Түзеткіш трансформатордың екінші орамасынан алынған айнымалы кернеуді пульсацияға айналдырады, сүзгі түзетілген кернеудің пульсациясын тегістейді. Содан кейін алынған тұрақты кернеу қосымша түйінге - стабилизаторға беріледі, ол жүктеме қоректендіру кернеуінің ауытқуына сезімтал болған кезде ғана қажет.

2.3 Түзеткіштер

Түзеткіш - айнымалы токты тұрақты немесе пульсирленген токқа түрлендіруге арналған құрылғы. Қазіргі заманғы электроникадағы түзеткіштердің көпшілігі әртүрлі жартылай өткізгіш диодтарға негізделген.

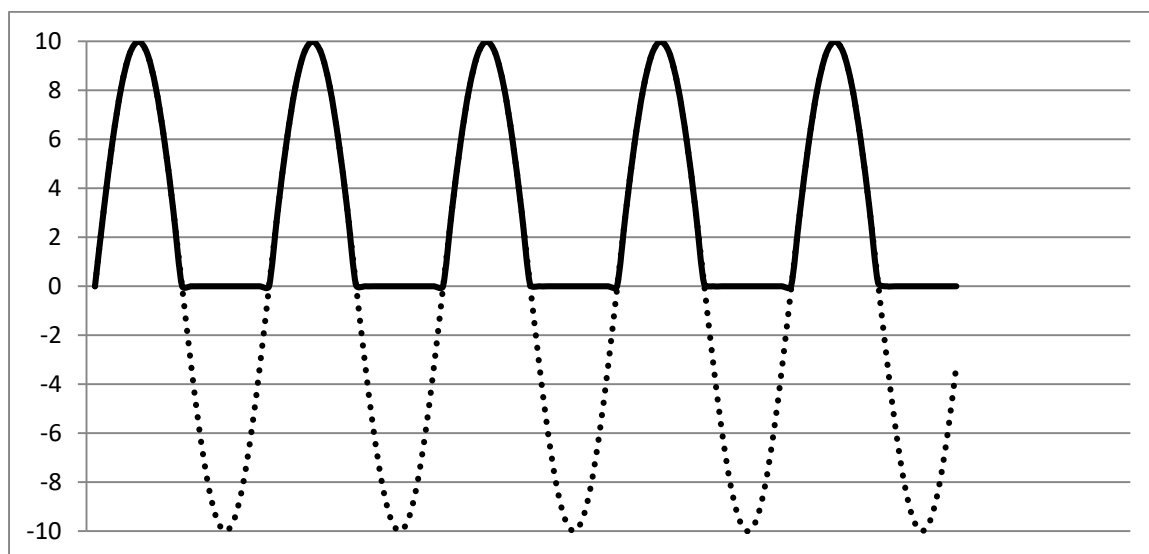
Түзеткіштің қарапайым түрі – жартылай периодты түзеткіш. Оның құрамында бір ғана диод бар. Мұндай түзеткіштің сұлбасы 13-суретте көрсетілген.



Сурет 13 – Жартылай периодты түзеткіштің принципіалды сұлбасы.

Жартылай периодты түзеткіштің жұмысы келесідей: Жоғарғы (сызбаға сәйкес) кіріс клеммасы оң және төменгісі теріс болса, VD1 диоды ашық, өйткені оның аноды катодқа қарағанда оң болады. Бұл жағдайда кірістен кернеу жүктемеге еркін өтеді. Кіріс кернеуінің полярлығы өзгерген кезде диод жабылады және кіріс кернеуінің теріс жартылай периодын жүктемеге жібермейді. Осылайша, жүктеменің жоғарғы (сұлба бойынша) шығысына әрқашан оң потенциал беріледі.

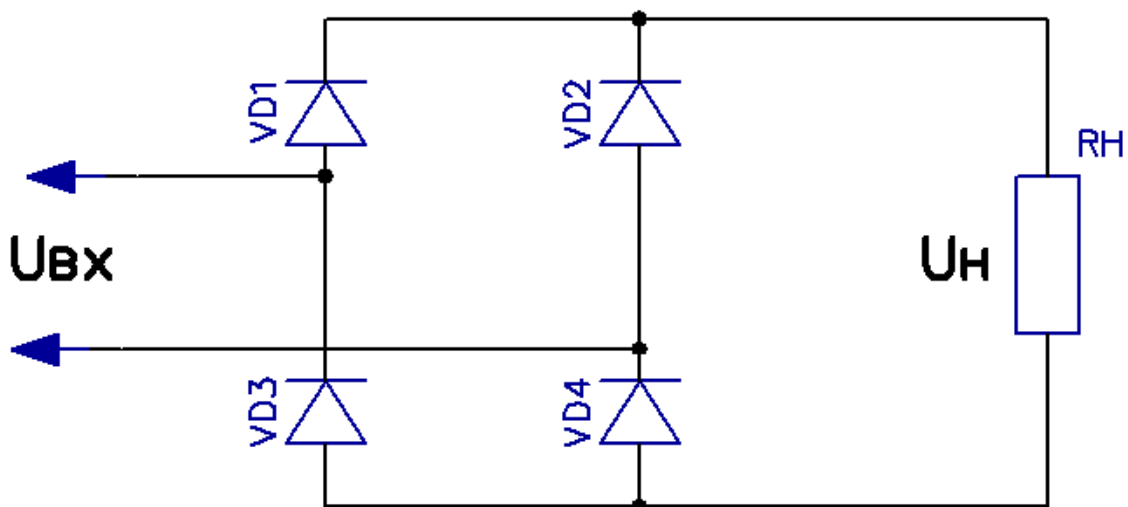
Бұл түзеткіштің жұмысы 14-суретте көрсетілген графикпен суреттелген.



Сурет 14 – бір жартылай периодты түзеткіштің жұмысы

Нүктелі сызық кіріс айнымалы кернеуді, үздіксіз шығыс кернеуін көрсетеді. Көріп отырғаныңыздай, айнымалы кернеудің оң жартылай периоды ғана жүктемеге түседі, бұл осы типтегі түзеткіштің негізгі кемшілігі: айнымалы кернеудің әрбір екінші жартылай периоды ғана пайдалы жұмыс жасайды. Бұл қажет болғаннан жоғары қуатты трансформаторды қолдануға мәжбүр етеді, сонымен қатар трансформатордың екінші орамасынан өтетін тұрақты жүктеме тогы магнит өткізгіштің магниттелуіне әкеледі, бұл трансформатордың тиімділігін төмендетеді, шамадан тыс қызуды тудырады. Дегенмен, бір жартылай периодты түзеткіш өте қарапайым және жүктеме аз қуат алатын жерде қолданылады. Сонымен қатар, ол қазіргі заманғы импульстік қуат көздерінде қолданылады, өйткені мұндай көздердегі трансформатордың екінші реттік орамасындағы ток формасы симметриялы емес: пайдаланылмаған жартылай периодтардың амплитудасы әлдеқайда аз (ұзақ уақытқа байланысты), сондықтан оларды жүктемені қуаттандыру үшін қолданудың мағынасы жоқ. Өкінішке орай, берілген оқу құралының шектеулі көлемі қуат көздерінің бұл түрін қарастыруға мүмкіндік бермейді, импульстік қуат көздері толығырақ [2] әдебиетте сипатталған.

Қарастырылған кемшіліктерді жою үшін екі жартылай периодты түзеткіштер жасалды. Олардың ең көп таралған нұсқасы 15-суретте көрсетілген көпір сұлбасы бойынша жиналған түзеткіш.



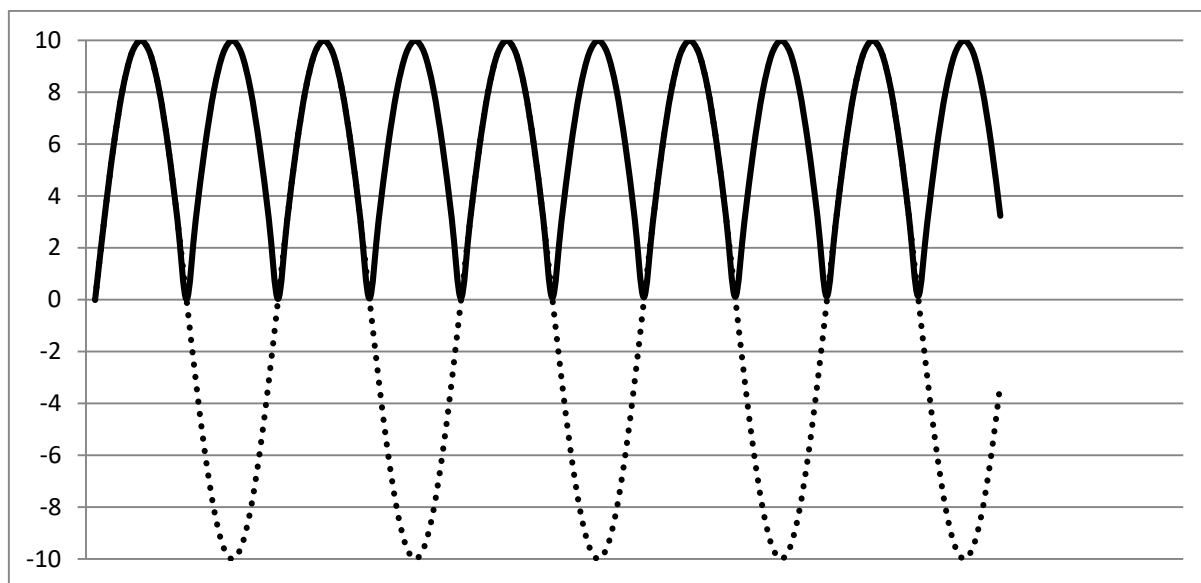
Сурет 15 – Екі жартылай периодты түзеткіштің принципіалды сұлбасы.

Көріп отырғаныңыздай, ол төрт диодтан тұрады. Бір жартылай периодты түзеткіштің жұмысы келесідей: Жоғарғы (сызбаға сәйкес) кіріс клеммасы оң, ал төменгісі теріс болса, VD1 және VD4 диодтары ашық болады. Кіріс кернеуінің оң полюсі ашық диод VD1 арқылы жүктеменің жоғарғы (схема бойынша) шығысына, ал теріс полюсі - VD4 диоды арқылы - төменгіге беріледі. VD2 және VD3 диодтары жабық және тізбектің жұмысына әсер етпейді.

Жоғарғы (сызбаға сәйкес) кіріс клеммасы теріс, ал төменгісі оң болғанда, VD2 және VD3 диодтары ашық болады. Кіріс кернеуінің оң полюсі ашық диод

VD2 арқылы жүктеменің жоғарғы (сызба бойынша) шығысына, ал теріс полюсі - VD3 диоды арқылы - төменгіге беріледі. VD1 және VD4 диодтары жабық және тізбектің жұмысына әсер етпейді.

Осылайша, кіріс кернеуінің полярлығы қандай болса да, оның оң полюсі әрқашан жүктеменің шығыс тізбегіне сәйкес жоғарғыға, ал терісі төменгіге жалғанған болып шығады. Мұндай түзеткіштің жұмысын графикте көрсетуге болады.



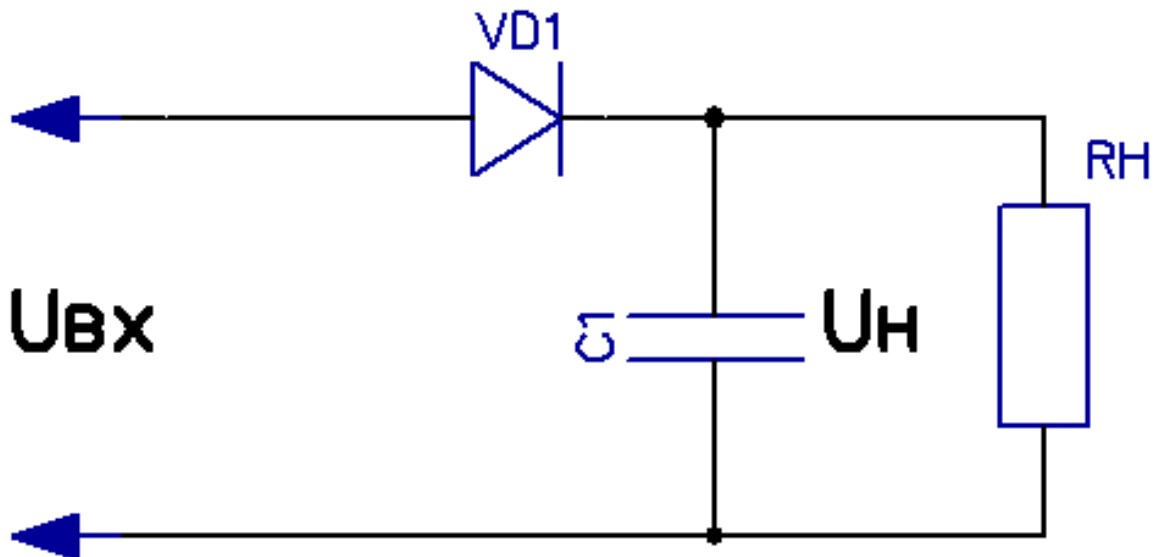
Сурет 16 – Екі жартылай периодты түзеткіштің жұмысы

Нүктелі сызық кіріс айнымалы ток кернеуін, тұтас сызық шығысты көрсетеді. Көріп отырғаныңыздай, кіріс кернеуінің оң және теріс жартылай периодтары жүктемеге өтеді (теріс жартылай периоды уақыттың көлденең осіне қатысты айна түрінде «шағылысады»).

2.4 Тегістейтін сүзгілер

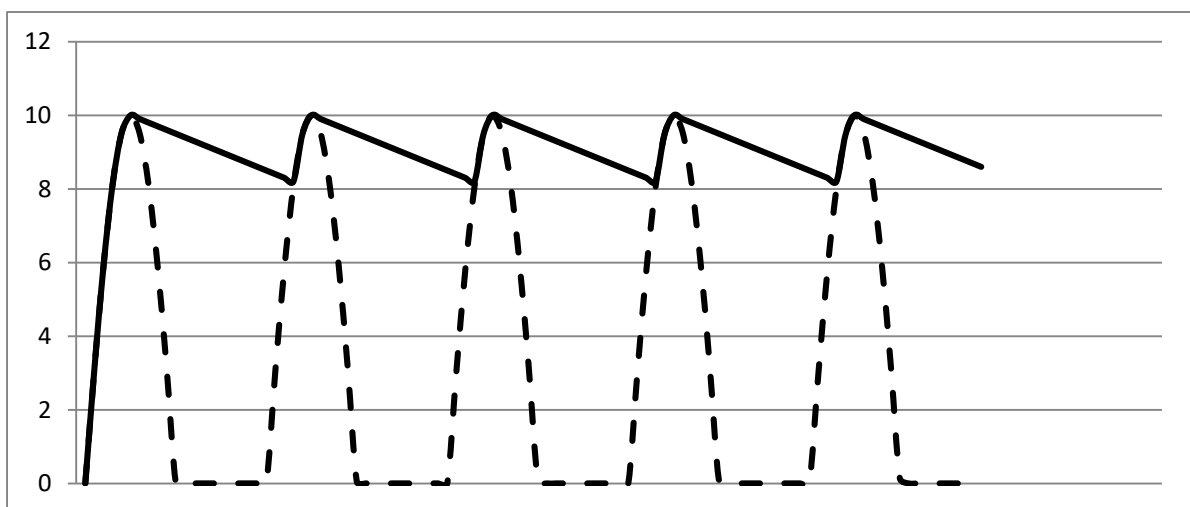
Екі жартылай периодты түзеткіш айнымалы кернеудің екі жартылай периодында қолдануға мүмкіндік беретініне қарамастан, ол жұмыс істеген кезде жүктемедегі кернеу кезең ішінде екі рет нөлге айналады (мұндай кернеу әдетте пульсирленген деп аталады). Бұл үлкен кемшілік және электронды құрылғыларды түзеткіштен тікелей қуаттандыруға мүмкіндік бермейді. Түзетілген кернеудің пульсациясын тегістеу үшін әдетте конденсатор сүзгілері қолданылады.

Конденсатор сүзгісі сүзгінің ең қарапайым түрі болып табылады, ол көбінесе жүктемемен параллель қосылған бір конденсатордан тұрады, мысалы, бір жартылай периодты түзеткіш жағдайында 17-суретте көрсетілген.



Сурет 17 – Сүзгісі бар бір жартылай периодты түзеткіш

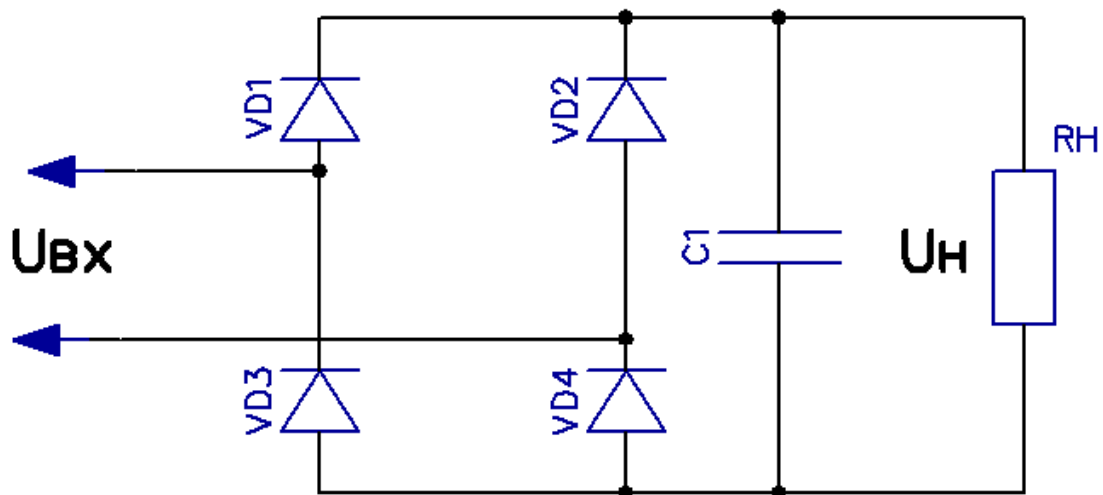
Кіріс кернеуі конденсатордағы кернеуден жоғары болған кезде ол зарядталады, ал түзеткіш кірісіндегі кернеу конденсатордағыдан аз болғанда, жүктеме одан қуат алады (бұл жағдайда диод жабылады, бұл конденсатордың трансформатор орамасы арқылы зарядсыздануына жол бермейді). Бұл сүзгінің жұмысы 18-суретте көрсетілген.



Сурет 18 – Бір жартылай периодты түзеткіштің конденсатор сүзгісінің жұмысы

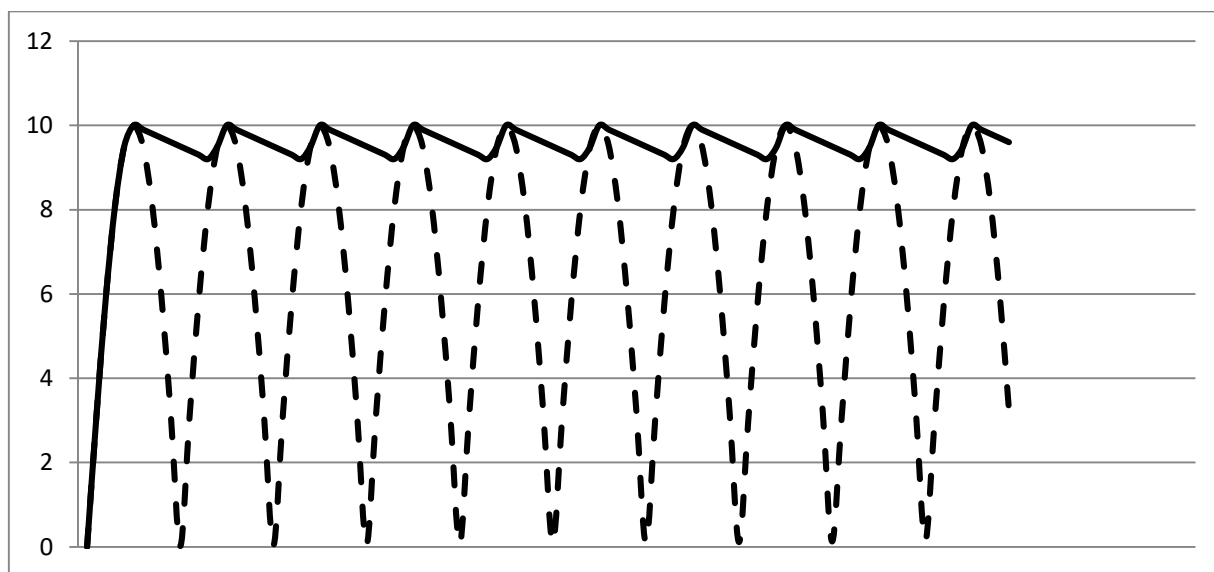
Графикте тұтас сызық жүктемедегі кернеуді, нүктелі сызық түзетілген кернеуді көрсетеді. Түзеткіштің шығысында кейбір кернеу ауытқулары (толқындар) әлі де бар екенін байқау оңай, бірақ бұл пішіннің кернеуі электронды құрылғыларды қуаттандыруға жарамды.

Конденсатор сүзгісі бар екі жартылай периодты түзеткіштің сұлбасы 19-суретте көрсетілген.



Сурет 19 – Сүзгісі бар екі жартылай периодты түзеткіш

Екі жартылай периодты түзеткіш жағдайында сүзгінің жұмысы 20-суретте көрсетілген.



Сурет 20 – Екі жартылай периодты түзеткіш жағдайында сүзгінің жұмысы

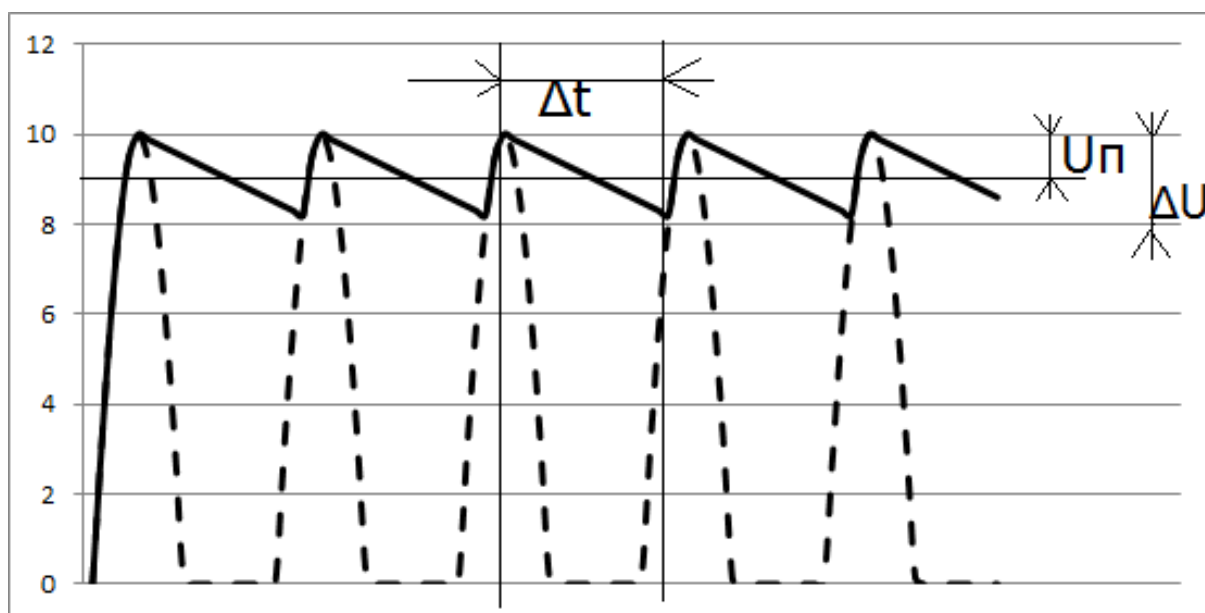
Екі жартылай периодты түзеткіш жағдайында пульсация амплитудасы шамамен екі есе аз екенін байқау қиын емес.

Қуат көздерін жобалау кезінде туындайтын міндеттердің бірі-сүзгі конденсаторын есептеу.

Есептеу үшін біз келесі деректерді береміз:

- $U_{\text{п}}$ - пульсация кернеуі
- $I_{\text{н}}$ – жүктеме арқылы тұтынылатын ток
- f – айнымалы кернеу жиілігі

21-суретте көрсетілген кейбір қосымша айнымалыларды енгізейік.



Сурет 21 – Сүзгіні есептеу

ΔU – жүктемеге энергия беретін конденсатор разрядталатын кернеу болып табылады. Бұл шамамен пульсацияның екі еселенген кернеуіне тең.

$$\Delta U = 2U_{п} \quad (1)$$

Бұл шамада конденсатор Δt уақыт ішінде разрядталады. Бұл уақытты дәл анықтау өте қиын, өйткені ол үшін екі қисықтың қиылысу нүктесіне қатысты есепті шешу қажет. Алайда, практикалық есептеулер үшін бұл уақытты бір жартылай периодты түзеткіш үшін период ұзақтығына тең деп қабылдауға болады:

$$\Delta t = \frac{1}{f} \quad (2)$$

немесе екі жартылай период үшін жарты периодтың ұзақтығы:

$$\Delta t = \frac{1}{2f} \quad (3)$$

Конденсатор үшін келесі өрнек дұрыс:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\Delta q}{\Delta U} \quad (4)$$

Екінші жағынан, жүктеме тогы және оның Δt уақытында тұтынатын электр энергиясының мөлшері келесі өрнекпен байланысты:

$$I_H = \frac{q}{t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (5)$$

Екі өрнектен де Δq және оларды теңестіру арқылы біз аламыз:

$$C \Delta U = I_H \Delta t \quad (6)$$

Біз конденсатордың сыйымдылығы үшін өрнек аламыз:

$$C = \frac{I_H \Delta t}{\Delta U} \quad (7)$$

Бір жартылай периодты түзеткіш үшін:

$$C = \frac{I_H}{2U_{\Pi} f} \quad (8)$$

Екі жартылай периодты түзеткіш үшін:

$$C = \frac{I_H}{4U_{\Pi} f} \quad (9)$$

2.5 Кернеу стабилизаторы

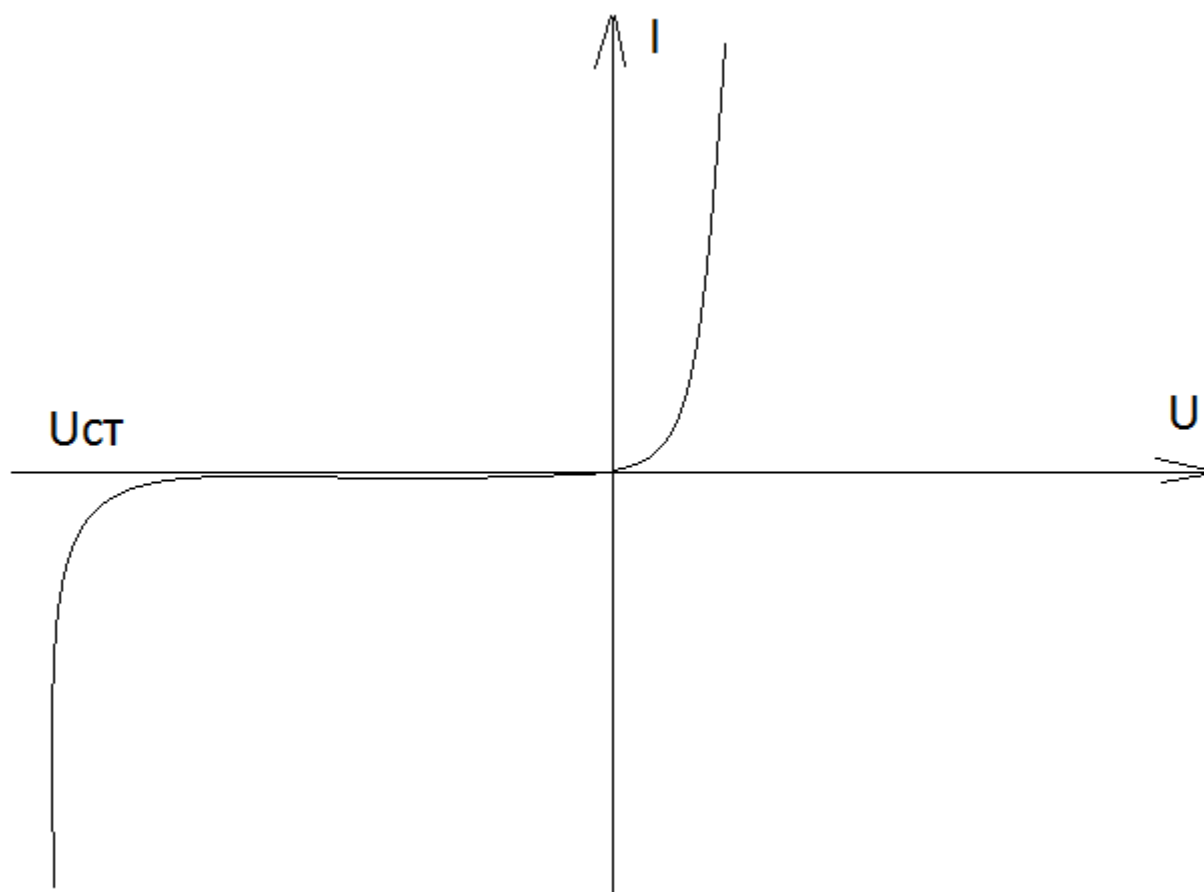
Көбінесе электронды құрылғылар қуат кернеуін қажет етеді, бұл көздің кіріс кернеуі (желі кернеуі) және жүктеме тогы сияқты факторларға тәуелді емес.

Өкінішке орай, біз бұрын қарастырған қуат көздерінің түйіндері шығыс кернеуінің жеткілікті тұрақтылығын қамтамасыз ете алмайды.

Сондықтан әртүрлі кернеу стабилизаторларын қолдану керек. Стабилизатордың кең таралған түрлерінің бірі стабилитронға негізделген параметрлік стабилизатор болып табылады.

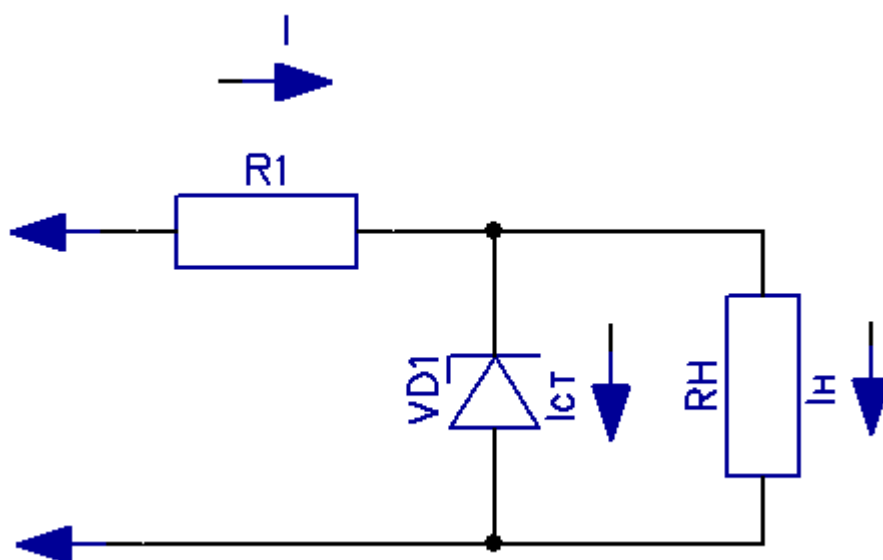
Стабилитрон (Зенер диоды) – өзі арқылы өтетін электр тогы өзгергенде (белгілі шектерде) оған түсетін кернеу іс жүзінде тұрақты болып қалатын екі электродты газоразрядты немесе шалаөткізгіш аспап.

Стабилитронның ток кернеуінің сипаттамасы 22-суретте көрсетілген. Бұл сипаттаманың тікелей тармағы жартылай өткізгіш диодпен бірдей, ал кері тармақ аймағында зарядтарының көшкіндік көбеюі арқылы тұрақтандыру кернеуінде зенер диоды арқылы токтың айтарлықтай өсуі байқалады.



Сурет 22 – Стабилитронның вольт-амперлік сипаттамасы

Кері тесіп өту негізінде жұмыс істегенде стабилитрон оның бойындағы кернеудің шамалы өзгеруімен ток күшінің үлкен өзгерістерімен сипатталады. Бұл сипаттама оны кернеу стабилизаторында пайдалануға мүмкіндік береді. Мұндай стабилизатордың сұлбасы 23-суретте көрсетілген.



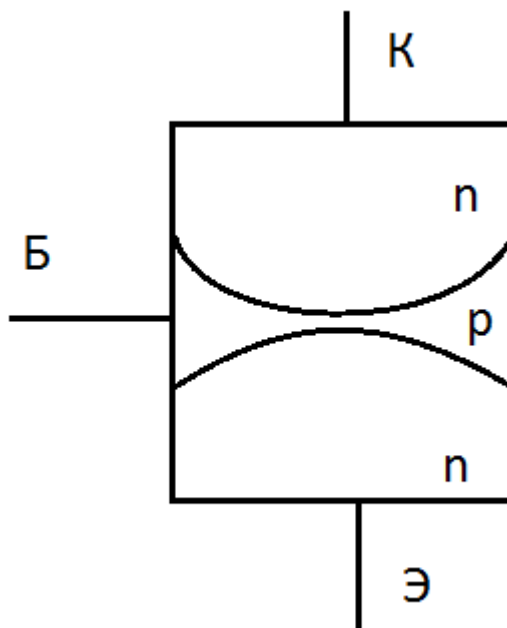
Суретте 23 – Стабилитрондағы параметрлік стабилизатор

Бұл сұлбада стабилитрон жүктемеге параллель қосылады, ал R_1 резисторы олармен тізбектей қосылады. Стабилизатордың жұмысын келесі мысалда түсіндіруге болады. Жүктеме тогы өсті делік. Бұл R_1 резисторындағы кернеудің төмендеуінің жоғарылауына және стабилитрон арқылы токтың сәйкесінше төмендеуіне әкеледі, бұл жүктеме тогының азаюына тең. Алайда, жүктемедегі кернеу шамалы ғана өзгереді. Жүктеме арқылы тұтынылатын ток азайған кезде кері процесс жүреді. Сол сияқты стабилизатор кіріс кернеуінің өзгеруіне жауап береді.

3 Электрондық күшейткіштер

3.1 Биполярлық транзисторлардағы күшейткіштер

Электр сигналдарының күшеюі әдетте қуат көзінен тұтынылатын энергия есебінен олардың қуатын арттыру деп аталады [3]. Электрондық күшейткіштердің негізгі элементі әртүрлі типтегі транзисторлар болып табылады: биполярлық және өрістік. Схемалық түрде биполярлық транзистордың құрылымы 24-суретте көрсетілген.



Сурет 24 – Биполярлық транзистордың құрылымы

Ол p және n өткізгіштік жартылай өткізгіштің үш қабатынан түзілген екі p - n өткелден тұрады. Жартылай өткізгіштің әрбір қабатына шығыс қосылған. Транзистор үш электродты құрылғы болып табылады. База құрылымның ортаңғы қабаты деп аталады. Эмиттер - жартылай өткізгіштің аймағымен байланысты электрод, ол базаға аз заряд тасымалдаушыларды енгізеді, ал коллектор - база арқылы өткен заряд тасымалдаушыларды жинайтын қалған аймақпен байланысты.

Бұл суретте NPN құрылымының транзисторы көрсетілген, бірақ қарама-қарсы өткізгіштік қабаттары бар транзисторлар (PNP құрылымдары) бар және кеңінен қолданылады. Олардың жұмыс істеу принципі мен қосылу схемалары NPN транзисторларына ұқсас, тек транзисторға қолданылатын барлық токтар мен полярлықтардың бағыттары керісінше өзгереді. Базалық қабат эмиттер-база мен коллектор-базаның өткелдері қабаттасатындай етіп жеткілікті жұқа (ондаған микрометр) жасалады. NPN құрылымының транзисторы жұмыс істеген кезде коллекторға эмиттерге қатысты оң потенциал беріледі (ондаған вольт). Базаның қалыңдығы өте аз екенін ескере отырып, онда жеткілікті жоғары беріктіктегі электр өрісі пайда болады.

Сондай-ақ, базаға эмиттерге қатысты шағын оң потенциал беріледі, бұл базалық аймаққа электрондардың инжекциясын тудырады, олар ондағы шағын заряд тасымалдаушылар болып табылады. Алайда, базалық аймаққа енген кезде электрондардың көпшілігі ол жасаған электр өрісінің әсерінен коллектор аймағына асығады. Ал электрондардың аз ғана бөлігі (пайызға жуық) базалық токты құруға қатысады, ондағы тесіктермен рекомбинацияланады. Процестің тиімділігіне базадағы қоспалардың концентрациясы жеткілікті түрде аз болуы да ықпал етеді.

Осылайша, шағын базалық токтың болуы коллекторлық токтың ондаған және жүздеген есе көп пайда болуын тудырады. Транзистордың күшейткіш қасиеттері осыған негізделген.

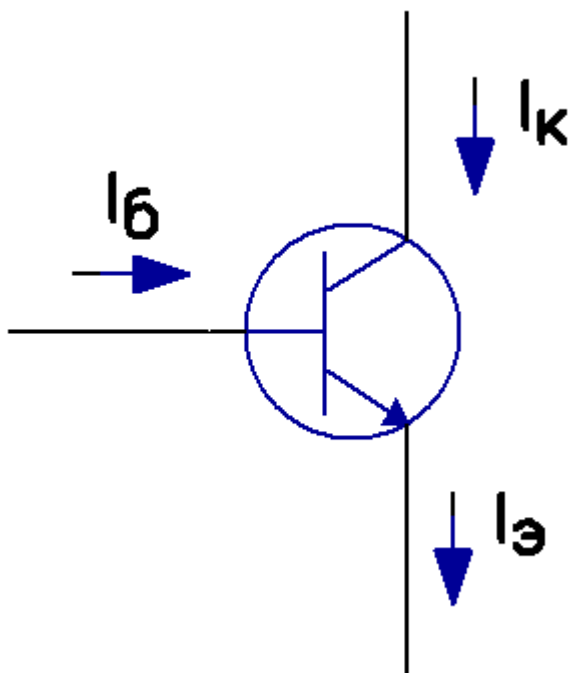
Транзистордың коллекторлық және эмиттер өткелдерінің ашық немесе жабық болуына байланысты оның жұмыс істеуінің төрт режимі бар: қиылу режимі, қанықтыру режимі, белсенді және инверсті режимдер.

Қиылу режимінде транзистордың екі өткелі де жабық, транзистор арқылы өтетін ток күші (коллектор мен эмиттер тізбегінде) минималды. Қанықтыру режимінде транзистордың екі өткел де ашық және коллектор тогы максималды. Белсенді режимде коллекторлық өткел жабық, ал эмиттерлі ашық. Бұл режим сигналдарды күшейту үшін қолданылады. Бұл режимдегі транзистордың күшейту қасиеттері қанағаттанарлықсыз болғандықтан, кері режим (эмиттерлік өткел жабық, коллекторлық өткел ашық) практикада қолданылмайды.

Биполярлық транзисторды тізбекке үш жолмен қосуға болады: жалпы эмиттермен (кіріс сигналы база мен эмиттер арасында қолданылады, шығыс коллектор мен эмиттер арасында алынады), жалпы коллектормен (кіріс сигналы база мен коллектор арасында қолданылады, шығыс коллектор мен эмиттер арасында алынады), жалпы базамен (кіріс сигналы база мен эмиттер арасында қолданылады, шығыс коллектор мен база арасында алынады).

Жалпы базалық схема төмен кіріс және жоғары шығыс кедергісімен, жалпы коллектормен – жоғары кіріс және төмен шығыс кедергісімен, жалпы эмиттермен – төмен кіріс және жоғары шығыс кедергісімен сипатталады. Жалпы коллекторы бар схеманың кернеуі бойынша күшейту коэффициенті бірлікке жақын, бірақ ол айтарлықтай ток күшіне ие. Жалпы базасы бар схема, керісінше, ток күшейту коэффициенті бірлікке жақын, бірақ кернеудің жоғары коэффициентіне ие. Жалпы эмиттері бар схемадағы транзистор ток пен кернеуді айтарлықтай күшейтеді [1].

Транзисторларды қамтитын электрондық құрылғылардың түйіндерін есептеу үшін олардың әртүрлі математикалық модельдерін қолдану қажет. Транзистор тізбектің сызықтық емес элементі болып табылады, дегенмен көптеген қосымшалар үшін транзистордың сызықтық моделін қолдануға болады. Біз қолданатын модель коллектордың, эмиттердің және базаның токтарын (активті режимдегі транзистор үшін токтардың типтік бағыты 25-суретте көрсетілген) және базаның, коллектордың және эмиттердің потенциалдарын байланыстырады.



Сурет 25 – активті режимдегі биполярлық транзистордың токтары

Биполярлық транзисторлар үшін эмиттерлік ауысу арқылы өтетін ток эмиттер мен коллектор арасындағы белгілі бір потенциалдар айырмашылығынан басталады деп шамамен қабылдауға болады $U_{б-э} = const$ (Кремний транзисторлары үшін 0,6 В және германий транзисторлары үшін 0,2 В). Коллектордың тогы базалық токқа байланысты және келесі қатынаспен анықталады:

$$I_k = I_б \beta \quad (10)$$

мұндағы β – коллектор тогының өзгеруінің оларды тудырған базалық токтың өзгеруіне қатынасын сипаттайтын базалық токтың статикалық берілу коэффициенті. Эмиттер тогы коллектор мен базалық токтардың қосындысы болғандықтан, ол үшін өрнек келесідей болады:

$$I_э = I_k + I_б = I_б(\beta + 1) \quad (11)$$

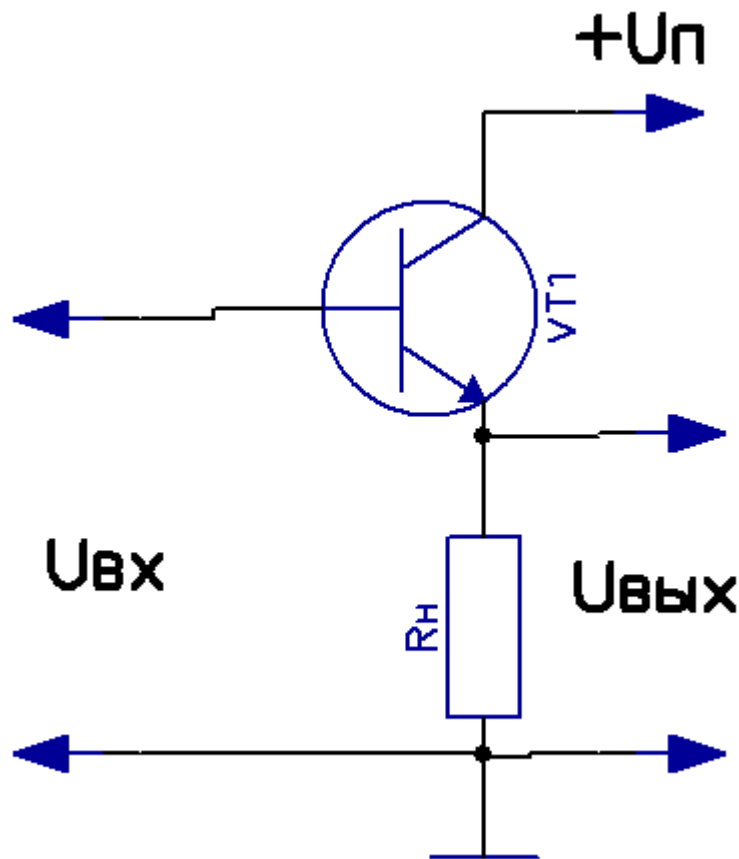
Базалық токты базалық және эмиттер потенциалдар айырмашылығымен келесі өрнекпен байланыстыруға болады:

$$I_б = \frac{U_б - U_э - U_{б-э}}{R_э} \quad (12)$$

мұндағы $R_э$ – эмиттер ауысуының дифференциалды кіріс кедергісі. Ол коллекторлық токпен келесі өрнекпен байланысты:

$$R_э = \frac{25}{I_к} \quad (I_к - \text{в мА}) \quad (13)$$

Жалпы коллекторы бар тізбектегі транзистордың жұмысын толығырақ қарастырамыз. Каскадқа сәйкес сұлбасы 26 суретте көрсетілген.



Сурет 26 – Биполярлы транзистордағы каскад

Берілген каскадтың шығыс кернеуі транзистор эмиттерінің потенциалы. Бұрын қарастырылған модельді қолдану және $U_б = U$ кір ал $U_э = U_{шығу}$ біз аламыз:

$$U_{шығу} = I_э R_H = I_б (\beta + 1) R_H = (U_{кіру} - U_{шығу} - U_{бэ}) \frac{(\beta + 1) R_H}{R_э} \quad (14)$$

Өрнектің бір бөлігін (15) формуламен берілген осы өрнектегі a коэффициентіне ауыстыру арқылы:

$$\frac{(\beta + 1) R_H}{R_э} = a \quad (15)$$

аламыз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{бэ}})a = aU_{\text{ВХ}} - aU_{\text{ВЫХ}} - aU_{\text{бэ}}, \quad (16)$$

$$U_{\text{ВЫХ}}(1 + a) = aU_{\text{ВХ}} - aU_{\text{бэ}}, \quad (17)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{a}{1+a}U_{\text{ВХ}} - \frac{a}{1+a}U_{\text{бэ}} \quad (18)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx U_{\text{ВХ}} - U_{\text{бэ}} \quad (19)$$

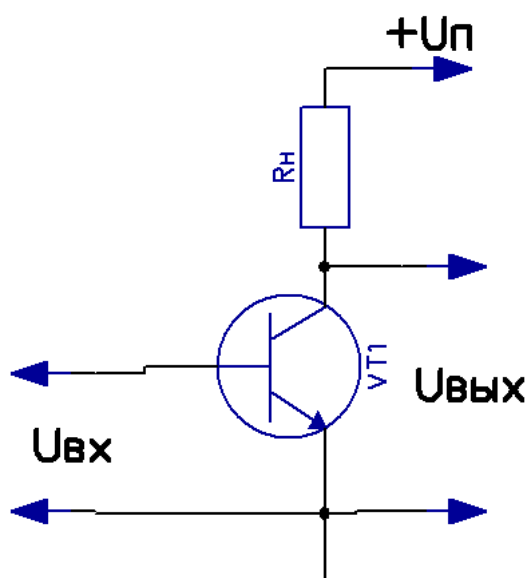
Бұл каскадтың кернеуі күшейткіш коэффициенті бірлікке жақын екенін байқау қиын емес:

$$K_{\text{КК}} \approx 1 \quad (20)$$

Екінші жағынан, шығыс тогының (коллекторлық токтың) кіріс тогына (базалық токқа) қатынасы бізге транзистор моделінен белгілі:

$$K_{\text{ТК}} \approx \beta \quad (21)$$

Осылайша, жалпы коллекторы бар биполярлы транзистордағы каскад кернеуді күшейтпейді, бірақ токты күшейтеді. Бұл оның қолдану саласына байланысты: қуат күшейткіштеріндегі ток күшейткіштері, сондай-ақ жоғары ішкі кедергі сигнал көздерін жүктемемен немесе кіріс кедергісі төмен басқа күшейткіш сатылармен үйлестіру. Жалпы эмиттермен күшейткіш каскадты қарастырайық. Оның сұлбасы 27-суретте көрсетілген.



Сурет 27 - OE бар биполярлы транзистордағы каскад

Бұл каскадтың шығыс кернеуі жүктеме резисторындағы кернеу мен кернеудің төмендеуі арасындағы айырмашылық ретінде көрсетіледі:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} - I_{\text{К}} R_{\text{Н}} \quad (22)$$

Екінші жағынан, коллектор тогы базалық токпен келесі өрнекпен байланысты екенін білеміз (23)

$$I_{\text{К}} = \beta I_{\text{б}} \quad (23)$$

Дәл сол базалық ток үшін өрнек келесідей жазылады:

$$I_{\text{б}} = \frac{(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{б-э}})}{R_{\text{э}}} \quad (24)$$

(24) - ті (23) өрнектерді алмастыру арқылы біз аламыз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{П}} - \beta \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{б-э}}}{R_{\text{э}}} R_{\text{Н}} \quad (25)$$

Бұл өрнекті кіріс кернеуі бойынша есептей отырып, біз кернеуді күшейту коэффициентін аламыз:

$$K_{\text{КК}} = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dU_{\text{ВХ}}} = - \frac{\beta R_{\text{Н}}}{R_{\text{э}}} \quad (26)$$

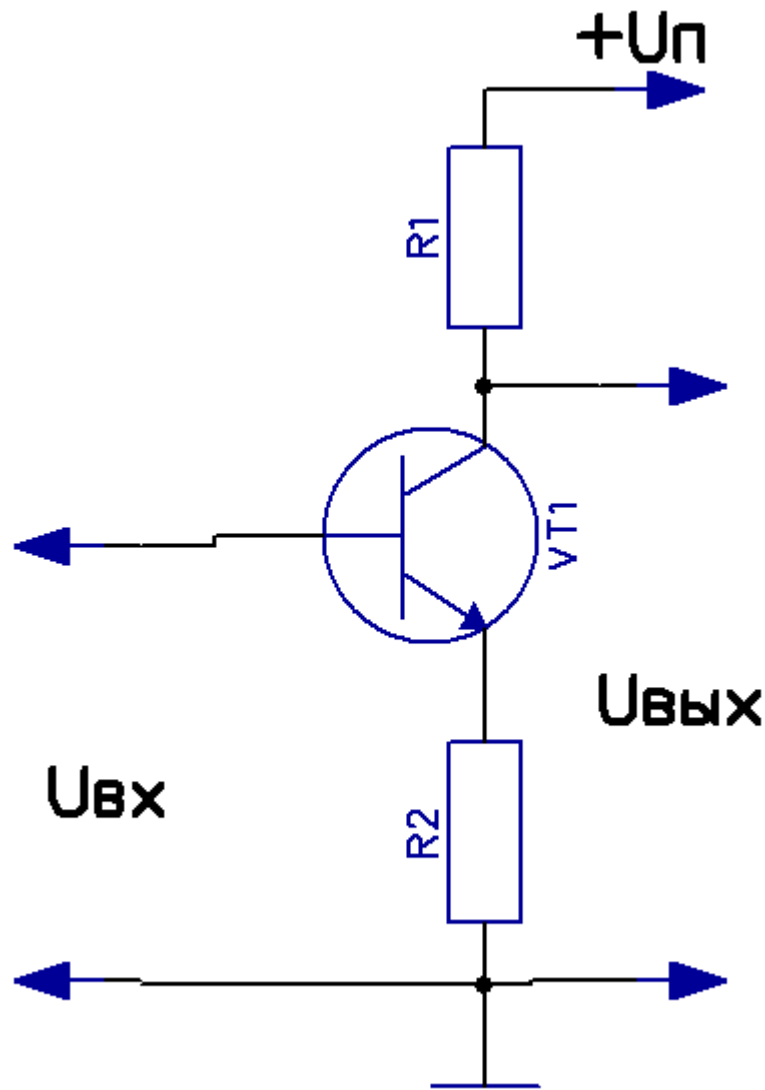
Кіріс кернеуі бойынша коэффициенті алдыңғы өрнек секілді болады:

$$K_{\text{ТК}} = \frac{dI_{\text{ВЫХ}}}{dI_{\text{ВХ}}} = \beta \quad (27)$$

(27) формуласынан кернеудің жоғарылауы транзистордың ток беру коэффициентіне өте тәуелді екендігі байқалады.

Екінші жағынан, бұл коэффициент температураға өте тәуелді және транзисторлардың әртүрлі даналарында айтарлықтай өзгеруі мүмкін, іс жүзінде дисперсия 7-8 есеге дейін жетеді. Себебі транзисторларды өндірудің қолданыстағы технологиясы бірдей құрылғыларды шығаруға мүмкіндік бермейді, әсіресе ток беру коэффициенті тәуелді болатын базаның тұрақты қалыңдығына төтеп беруі қиын. Сондықтан қарастырылған транзисторлық каскадтың пайда болуы тұрақты бола алмайды [2].

Кірісті тұрақтандыру мақсатында эмиттер тізбегі 28-суретте көрсетілгендей кері байланыс резисторын қамтиды.



Сурет 28 - ОЖ резисторы бар жалпы эмиттері бар сұлба бойынша күшейткіш каскады

Бұл күшейткіш каскад R_2 резисторы тұрғысынан эмиттерлік қайталағыш ретінде жұмыс істейтінін және осы резистордағы сигнал кірісті толығымен қайталайтынын байқау қиын емес. Бұл эмиттер тогының белгілі бір өзгерістерін және коллектор тогының бірдей өзгеруін тудырады. Осыны ескере отырып:

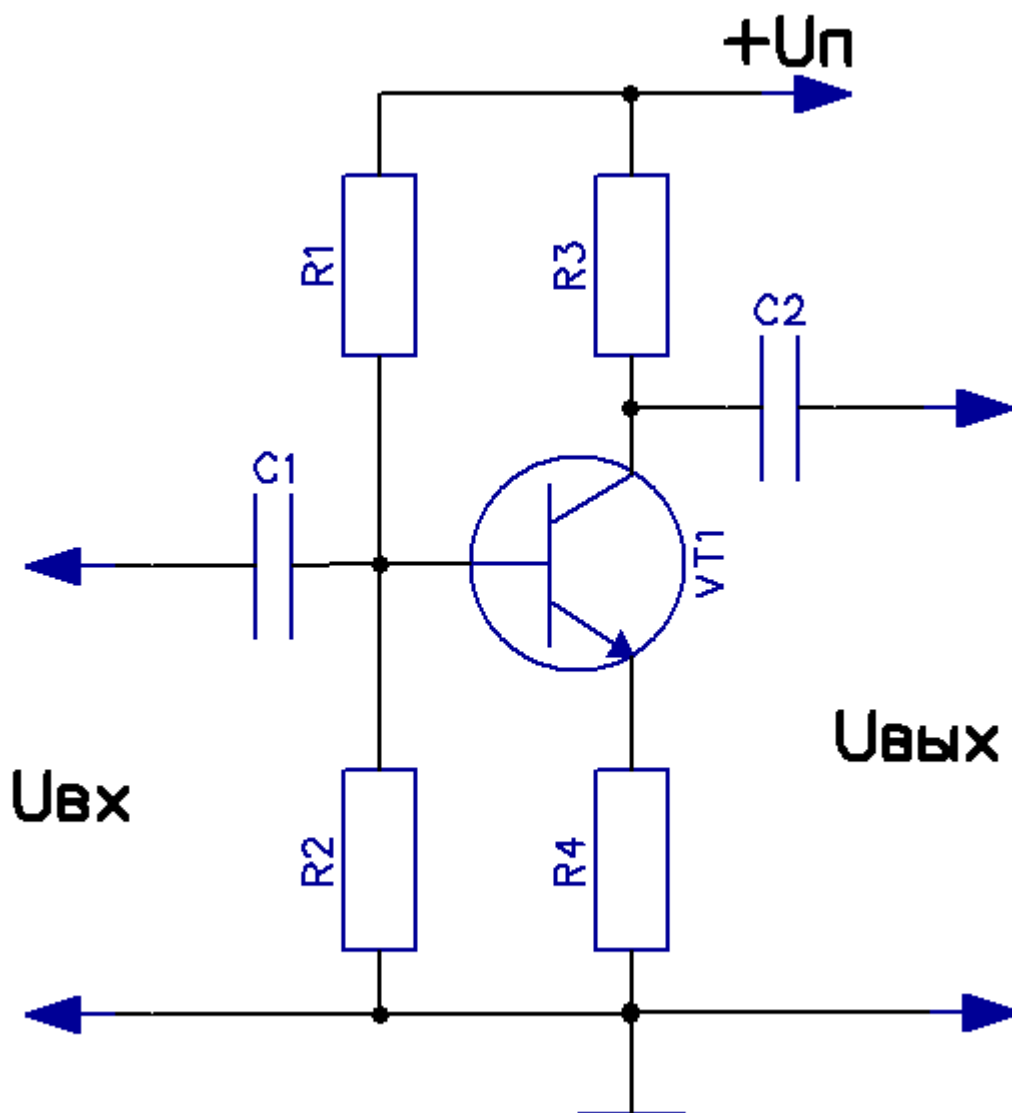
$$R_2 \gg R_{\text{э}} \quad (28)$$

Бұл тізбектің күшейту коэффициенті өрнек арқылы берілетінін көрсету оңай:

$$K_{\text{к}} = \frac{R_1}{R_2} \quad (29)$$

Іс жүзінде бұл күшейткіш каскад сонымен қатар сигнал көзі арқылы базалық токтың тұрақты компонентінің, ал коллекторлық токтың жүктеме

арқылы өтуіне жол бермейтін тізбектерімен және өтпелі конденсаторлармен толықтырылады. Биполярлық транзистордағы күшейткіш каскадтың типтік схемасы 29-суретте көрсетілген.



Сурет 29 - ОЕ бар күшейткіш каскадтың типтік сұлбасы

Бұл күшейткіш каскадта төрт резистор және екі конденсатор бар, олардың параметрлері белгілі бір жұмыс жағдайларына сәйкес есептеледі.

R_3 резисторының кедергісі әдетте жүктеме кедергісінен бірнеше (мысалы, бес) есе аз таңдалады:

$$R_3 = \frac{R_H}{5} \quad (30)$$

Күшейткіш каскад күшейтілген сигналдың оң және теріс жарты толқындарын беру үшін, тыныштық режиміндегі коллектордағы кернеу әдетте қуат кернеуінің жартысына тең таңдалады:

$$U_K = \frac{U_{\Pi}}{2} \quad (31)$$

Содан кейін коллектордың тыныштық тогын формула бойынша есептеу мүмкіндігі пайда болады:

$$I_K = \frac{U_{\Pi} - U_K}{R_3} \quad (32)$$

Қажетті күшейту коэффициенті бойынша біз R_3 резисторының кедергісін табамыз:

$$R_4 = \frac{R_3}{K_y} \quad (33)$$

Эмиттер тогы коллектордың тогына тең екенін ескере отырып, біз эмиттердегі кернеуді тыныштық режимінде табамыз:

$$U_3 = I_K R_3 \quad (34)$$

Транзистордың базалық және эмиттерлік потенциалдары іс жүзінде бірдей мәнге ие екенін біле отырып, біз базаның потенциалын табамыз:

$$U_6 = U_3 + U_{63} \quad (35)$$

Теңдеулер жүйесін шеше отырып, R_1 R_2 кернеуінің бөлгішін есептейміз:

$$\begin{cases} \frac{U_{\Pi} R_2}{R_1 + R_2} = U_6 \\ \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 5\beta R_4 \end{cases} \quad (36)$$

Бізге тек конденсаторлардың сыйымдылығын есептеу ғана қалды. Мұны істеу үшін біз f_{\min} күшейткіш каскадының көмегімен берілуі қажет сигналдың минималды жиілігін анықтаймыз және келесі теңсіздіктерді шеше отырып, сыйымдылықты табамыз:

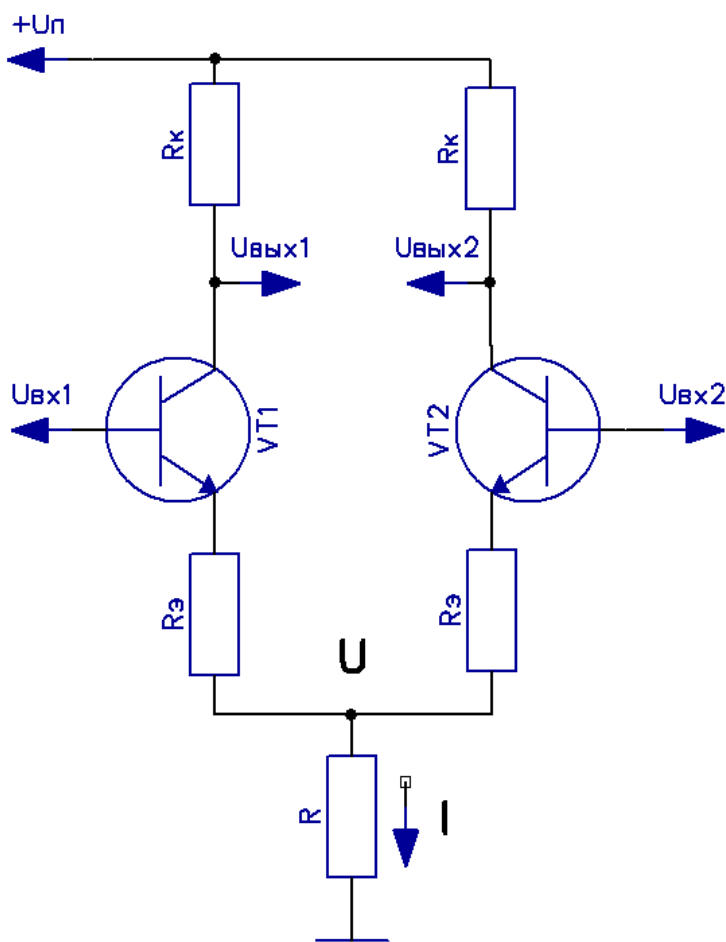
$$2\pi f_{\min} C_1 > \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_{\text{ист}}, \quad (37)$$

$$2\pi f_{\min} C_2 > R_H \quad (38)$$

Дифференциалдық және операциялық күшейткіштер

Транзисторлық күшейткіштерді есептеу өте күрделі процесс екенін байқадық. Сондай-ақ, біз қарастырған биполярлық транзисторлардағы күшейткіш каскадтардың айтарлықтай кемшілігі бар екенін атап өткен жөн - нөлдік дрейф, бұл шығыс кернеуі (тұрақты, транзистор коллекторында) көптеген факторлардың (транзистордың температурасы, ток беру коэффициенті және басқалары) әсерінен өзгертіндігінде көрінеді. Бұл ұқсас каскадтарды тек айнымалы токты күшейту үшін пайдалануға болатындығына әкеледі [1].

Бұл кемшіліктер тұрақты ток күшейткіштері деп аталады, олардың бір түрі дифференциалды күшейткіш болып табылады. Мұндай күшейткіштің сұлбасы 30-суретте көрсетілген.



Сурет 30 - дифференциалды күшейткіш

Бұл күшейткіште кіріс кернеуі транзисторлардың негіздері арасында қолданылады, ал шығыс коллекторлар арасында (немесе коллекторлардың бірінен) алынады. Осы күшейткіштің жұмысын толығырақ қарастырыңыз. VT1 және VT2 транзисторлары R_e және R резисторлары түріндегі жүктемесі бар эмиттерлік қайталағыштармен жұмыс істейді, сондықтан олар үшін келесі өрнектер жарамды:

$$U_{\text{э1}} = U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{бэ}} , \quad (39)$$

$$U_{\text{э2}} = U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{бэ}} \quad (40)$$

Содан кейін коллектор мен эмиттердің токтарының өрнектері келесідей болады:

$$I_{\text{к1}} = I_{\text{э1}} = \frac{U_{\text{э1}} - U}{R_3} , \quad (41)$$

$$I_{\text{к2}} = I_{\text{э2}} = \frac{U_{\text{э2}} - U}{R_3} \quad (42)$$

Мұндағы и-резисторлардың қосылу нүктесіндегі потенциал (30-суретте көрсетілген). U мәнін табыңыз:

$$U = (I_{\text{э1}} + I_{\text{э2}})R = \frac{R}{R_3} (U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}} - 2U) , \quad (43)$$

$$U + \frac{2R}{R_3}U = \frac{R}{R_3} (U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}}) , \quad (44)$$

$$U \left(\frac{R_3 + 2R}{R_3} \right) = \frac{R}{R_3} (U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}}) , \quad (45)$$

$$U = \frac{R}{R_3 + 2R} (U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}}) \quad (46)$$

$$I_{\text{к1}} = \frac{U_{\text{э1}}}{R_3} - \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} U_{\text{э1}} - \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} U_{\text{э2}} , \quad (47)$$

$$I_{\text{к1}} = U_{\text{э1}} \frac{R_3 + R}{R_3(R_3 + 2R)} - U_{\text{э2}} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} , \quad (48)$$

$$I_{\text{к1}} = U_{\text{ВХ1}} \frac{R_3 + R}{R_3(R_3 + 2R)} - U_{\text{бэ}} \frac{R_3 + R}{R_3 R_3 + 2R} - U_{\text{ВХ2}} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} + U_{\text{бэ}} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} \quad (49)$$

$$I_{\text{к1}} = U_{\text{кір1}} \frac{R_3 + R}{R_3(R_3 + 2R)} - U_{\text{шығ2}} \frac{R_3}{R_3 R_3 + 2R} - U_{\text{бэ}} \frac{R}{R_3(R_3 + 2R)} \quad (50)$$

Енді VT1 коллекторындағы кернеу мен $U_{\text{кір1}}$ және $U_{\text{кір2}}$ кіріс кернеулері арасындағы байланысты табу оңай болады:

$$U_{\text{шығ1}} = U_{\text{п}} - I_{\text{к1}} R_{\text{к}} \quad (51)$$

$$U_{\text{шығ1}} = U_{\text{п}} - U_{\text{кір1}} \frac{R_{\text{к}}(R_{\text{э}}+R)}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)} + U_{\text{кір2}} \frac{R_{\text{к}}R}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)} - U_{\text{бэ}} \frac{R}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)} \quad (52)$$

(52) өрнектен $U_{\text{кір1}}$ және $U_{\text{кір2}}$ оған әр түрлі коэффициенттермен (модуль бойынша) енетінін көруге болады. Алайда, екі коэффициент R -ге ұмтылатындығын көрсету оңай $\frac{R_{\text{к}}}{2R_{\text{э}}}$ кезінде $R \gg R_{\text{э}}$.

Сұлбаның симметриясына байланысты U_2 өрнегін оңай табуға болады:

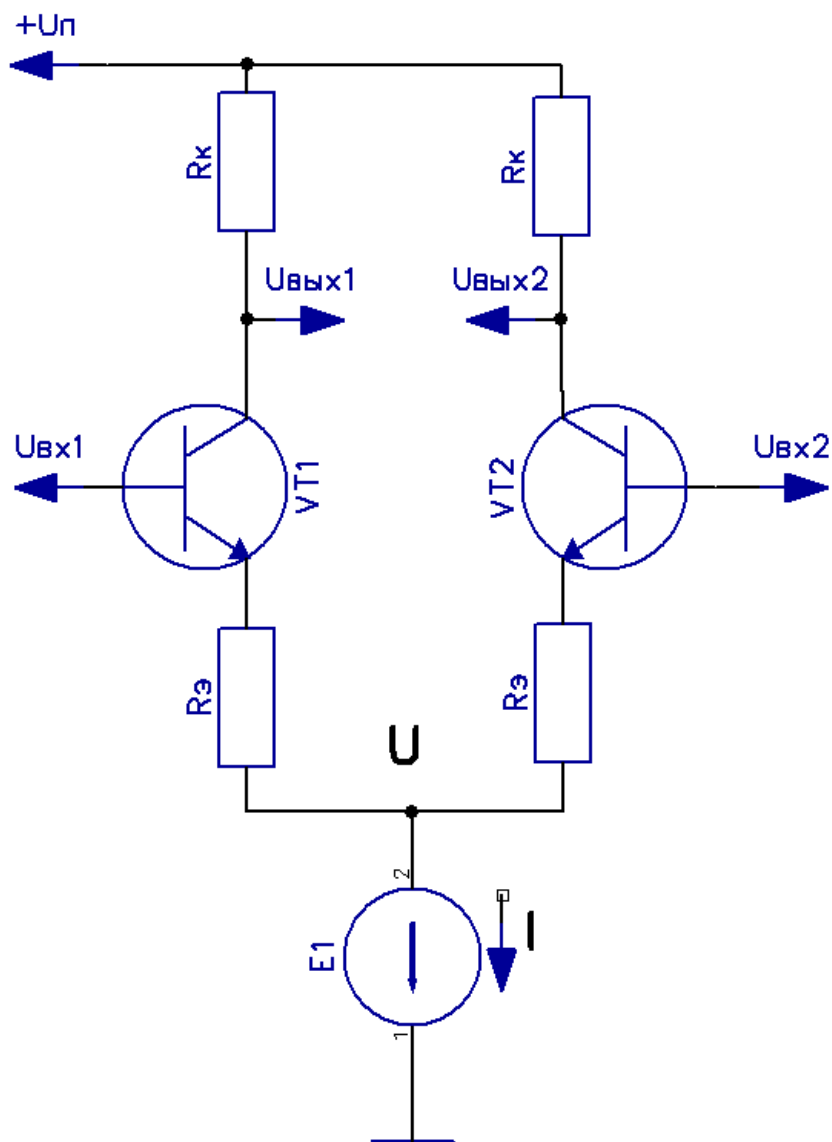
$$U_{\text{вых2}} = U_{\text{п}} - U_{\text{вх2}} \frac{R_{\text{к}}(R_{\text{э}}+R)}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)} + U_{\text{вх1}} \frac{R_{\text{к}}R}{R_{\text{э}}R_{\text{э}}+2R} - U_{\text{бэ}} \frac{R}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)} \quad (53)$$

Одан U -ны алып тастаймыз, егер ол транзисторлық коллекторлар арасында алынып тасталса, шығыс кернеуінің өрнегін аламыз:

$$U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}} = U_{\text{вх1}} \frac{R_{\text{к}}R + R_{\text{к}}(R_{\text{э}}+R)}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)} + U_{\text{вх2}} \frac{R_{\text{к}}(R_{\text{э}}+R) + R_{\text{к}}R}{R_{\text{э}}(R_{\text{э}}+2R)}, \quad (54)$$

$$U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}} = (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}) \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{э}}} \quad (55)$$

Біз екі жағдайда да берілген күшейткіштің шығыс кернеуі кіріс кернеуінің айырмашылығына байланысты екенін көрсеттік, сондықтан күшейткіш дифференциалды деп аталады. Бұл жағдайда екі кіріс үшін де пайда болатын кейбір шарттарды сақтау қажет (жоғарыдан қараңыз). Алайда, іс жүзінде $R \gg r_e$ қамтамасыз ету өте қиын, бірақ транзисторлық коллекторлар арасындағы шығыс сигналын алу ыңғайсыз. Екі кіріс үшін де бірдей күшейту коэффициенттерін қамтамасыз ету үшін 31-суретте көрсетілгендей күшейткіштің ток көзінен қоректенуі қолданылады. Ток көзі әдетте екі транзистордағы ағымдағы айна сұлбасы бойынша орындалады, бірақ оны бір транзисторда да орындауға болады. Айта кету керек, ток көзі бар дифференциалды каскад үшін біз бұрын алған барлық формулалар R -ді шексіздікке ауыстырған кезде жарамды.



Сурет 31 - ток көзі бар дифференциалды күшейткіш

Егер күшейткіштің қуаты тұрақты токпен жүзеге асырылса, онда эмиттердің токтары үшін келесі өрнек қолданылады:

$$I_{э1} + I_{э2} = I = \text{const} \quad (56)$$

Әлбетте, бұл:

$$\frac{U_{э1} - U}{R_э} + \frac{U_{э2} - U}{R_э} = I \quad (57)$$

$$\frac{U_{э1} + U_{э2}}{R_э} - \frac{2U}{R_э} = I \quad (58)$$

$$-\frac{2U}{R_3} = I - \frac{U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}}}{R_3} \quad (59)$$

Содан кейін резисторлардың қосылу нүктесіндегі U кернеуі R_3 формуламен көрсетіледі:

$$U = \frac{U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}} - IR_3}{2} \quad (60)$$

Оны (41) ауыстыра отырып, біз VT1 транзисторының коллекторлық тогын табамыз:

$$I_{\text{к1}} = \frac{U_{\text{э1}}}{R_3} - \frac{U_{\text{э1}} + U_{\text{э2}} - IR_3}{2R_3} = \frac{U_{\text{э1}} - U_{\text{э2}} - IR_3}{2R_3}, \quad (61)$$

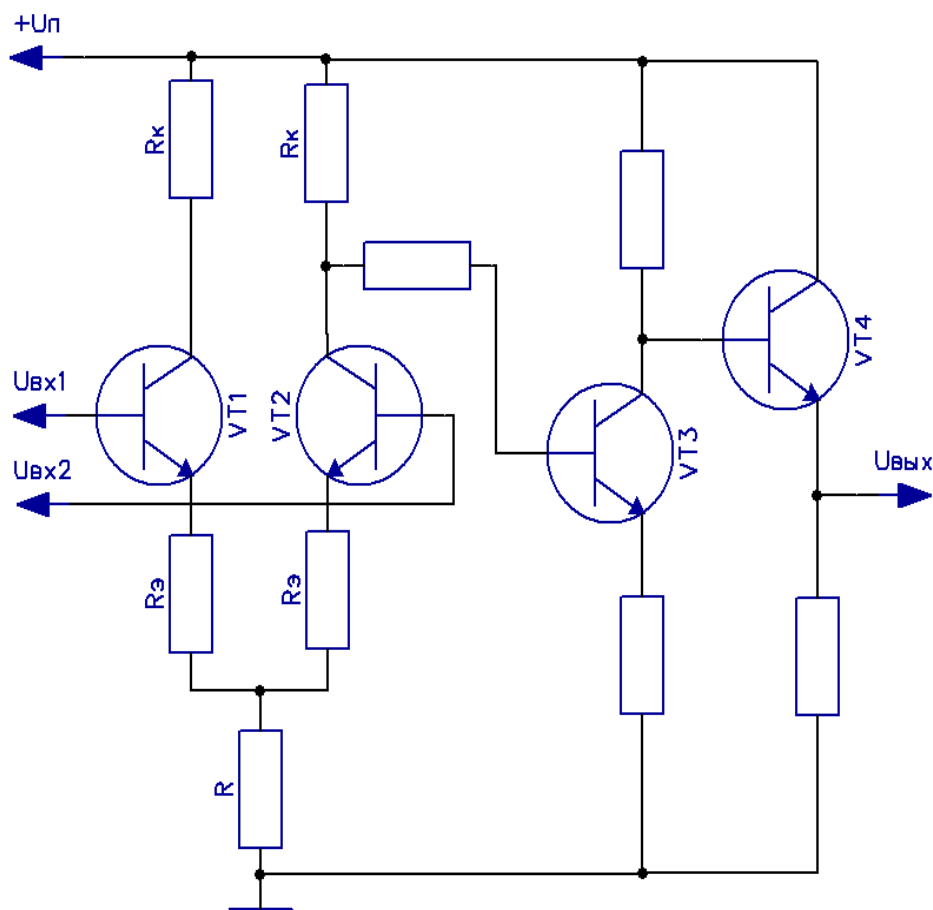
$$I_{\text{к1}} = \frac{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}} - 2U_{\text{бэ}} - IR_3}{2R_3} \quad (62)$$

Содан кейін біз VT1 коллекторындағы кернеуді табамыз:

$$U_{\text{шығ1}} = U_{\text{п}} - \frac{R_{\text{к}}}{2R_3} (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}} - U_{\text{бэ}} - IR_3) \quad (63)$$

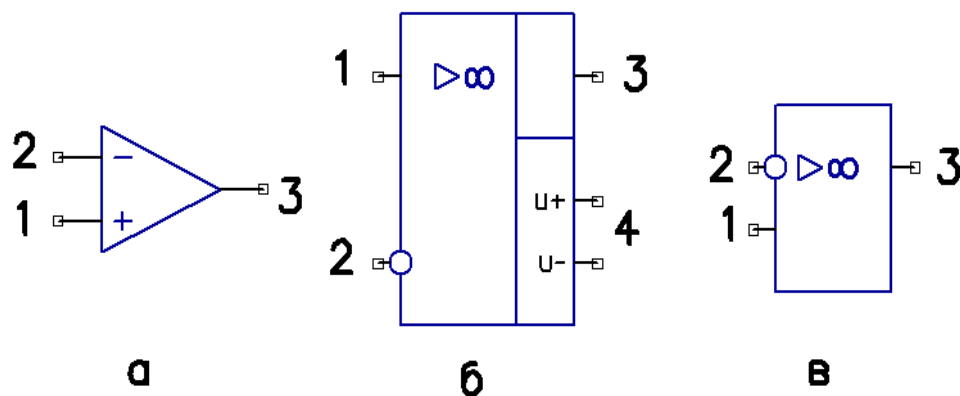
Көріп отырғандай, бұл жағдайда екі кіріс үшін де пайда бірдей.

Іс жүзінде дифференциалды күшейткіштер кернеуді күшейту (күшейту үшін) және Ток (жүктеме қабілетін арттыру үшін) каскадтарымен толықтыра отырып қолданылады, мысалы, 32-суретте көрсетілгендей.

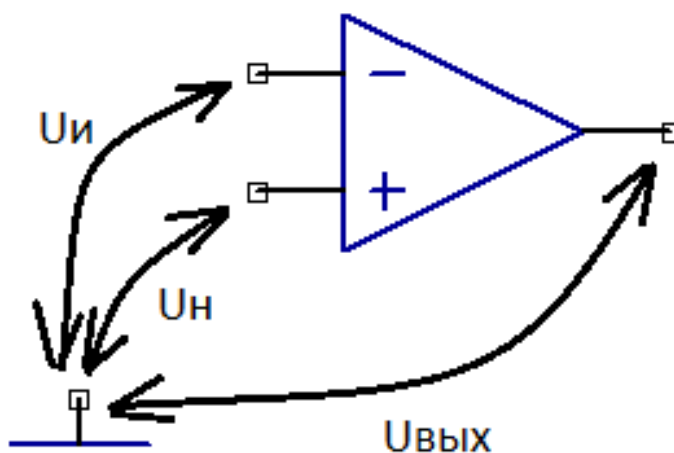


Сурет 32 - Операциялық күшейткіш

Мұндай күшейткіш операциялық (оп) деп аталады. Олар әдетте интегралды микросұлбалар түрінде шығарылады. Операциялық күшейткіштер қазіргі заманғы электроникада соншалықты кең қолданысқа ие болды (бұл қисынсыз болар еді, өйткені операциялық күшейткіштер көбінесе олар жұмыс істейтін схемаларға қарағанда күрделі), бірақ 33-суретте көрсетілген арнайы шартты белгілерді қолданады. 33 (а) суретте көрсетілген белгі Операциялық күшейткіш үшін тарихи бірінші болып табылады. Қазіргі уақытта бұл графикалық белгі негізінен шетелдік әдебиеттерде қолданылады, дегенмен оның 33 (б) және 33 (в) суреттерінде көрсетілген кейінгі нұсқаға қарағанда белгілі бір артықшылықтары бар. Көріп отырғаныңыздай, операциялық күшейткіштің белгілеуінде қуат сымдары болуы да, болмауы да мүмкін. Болашақта бұл нұсқаулықта 33 (а) суретте көрсетілгенге ұқсас шартты белгілер қолданылады.



Сурет 33 - Операциялық күшейткіштің шартты графикалық белгісі



Сурет 34 - ОК шығысындағы потенциалдар

- 1-инверттелмейтін кіріс
- 2-инверттелетін кіріс
- 3-шығу
- 4-тамақтану қорытындылары

Операциялық күшейткіштердегі электрондық құрылғылардың түйіндерін есептеу үшін қарапайым сызықтық ОК моделі қолайлы. Ол ои шығысындағы потенциалды оның кірістеріндегі потенциалдар айырмашылығымен байланыстырады (жалпы сымға қатысты). Потенциалдар өлшенетін нүктелер 34-суретте көрсетілген.

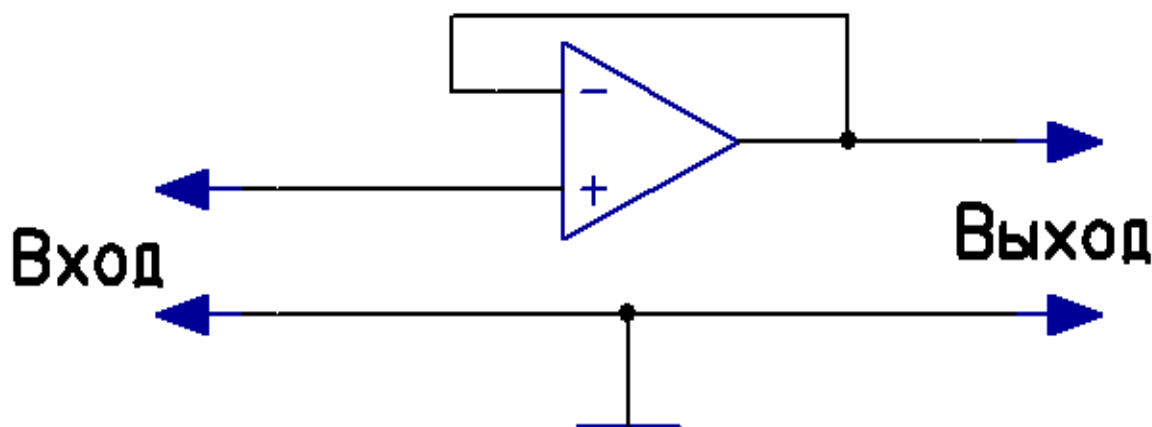
Көптеген ОК үшін келесі модель жарамды:

$$U_{\text{вых}} = k(U_{\text{н}} - U_{\text{и}}) \tag{64}$$

Мұндағы k-дифференциалды сигналдың күшейту коэффициенті ОУ (әдетте 103 – тен 106 – ға дейін), $U_{\text{вых}}$ – шығыс кернеуі, $U_{\text{н}}$ -инверттелмейтін кірістегі кернеу, $U_{\text{и}}$ -инверттелетін кірістегі кернеу.

3.3 Операциялық күшейткіштерді қолдану

ОК қайталағыш ең қарапайым түйінді қарастырамыз, оның сұлбасы 35-суретте көрсетілген.



Сурет 35 - ОК-тегі қайталағыштың сұлбасы

Көріп отырғандай, кіріс кернеуі жалпы сым мен инверттелмейтін кіріс арасында қолданылады, ал инверттелетін кіріс ОК шығысына қосылады. Онда кейін мыналар пайда болады:

$$U_H = U_{ВХ} ; U_{и} = U_{ВЫХ} \quad (65)$$

Мұны ОК математикалық моделінің өрнегіне ауыстыра отырып, біз мына формуланы аламыз:

$$U_{ВЫХ} = k(U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) \quad (66)$$

Жақшаларды ашып, біз аламыз:

$$U_{ВЫХ} = kU_{ВХ} - kU_{ВЫХ} \quad (67)$$

Біз құрамында $U_{ВЫХ}$ бар барлық терминдерді сол жаққа, ал $U_{ВХ}$ бар барлық терминдерді оң жаққа береміз:

$$U_{ВЫХ} + kU_{ВЫХ} = kU_{ВХ} \quad (68)$$

Жақшадан $U_{ВЫХ}$ шығарамыз:

$$U_{ВЫХ} (1 + k) = kU_{ВХ} \quad (69)$$

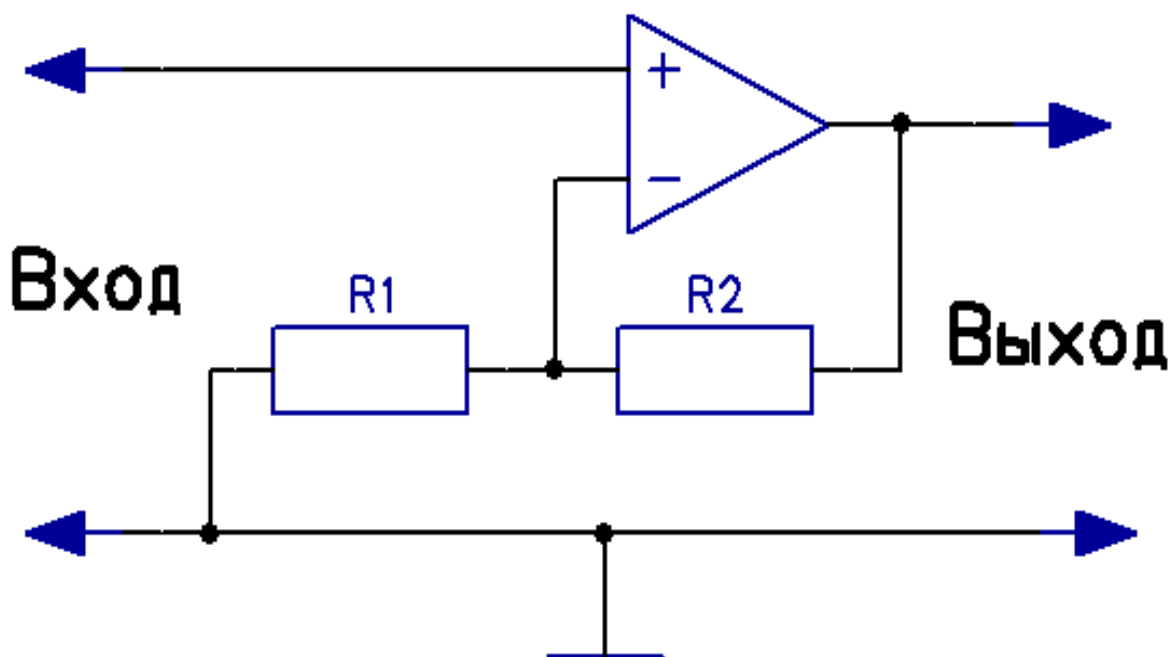
Біз $U_{ВЫХ}$ түрлендірсек:

$$U_{ВЫХ} = \frac{kU_{ВХ}}{1+k} \quad (70)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \quad (71)$$

Яғни, операциялық күшейткіштегі бұл түйін оған берілген сигналды қайталайды және біреуіне тең күшейту коэффициентіне ие.

Күшейткішті алу үшін ОЖ-ге 36-суретте көрсетілгендей резистор бөлгіштен тұратын ООС тізбегін қосамыз.



Сурет 36 - Ож -дағы инверттелмейтін күшейткіш.

Көріп отырғандай, кіріс кернеуі әлі де инверттелмейтін кіріске қолданылады, ал ои шығысы оны инверттелетін кіріске жібермес бұрын R1R2 бөлгішімен әлсіреді. Бұл сұлба үшін келесі өрнек жарамды:

$$U_{\text{И}} = U_{\text{ВХ}}; \quad U_{\text{И}} = U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (72)$$

Оны ОК үшін бұрыннан белгілі өрнекке ауыстыра отырып, біз аламыз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}) \quad (73)$$

Жақшаларды ашып, біз аламыз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = kU_{\text{ВХ}} - kU_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (74)$$

Формуланы орнына қойсақ

$$U_{\text{ВЫХ}} + kU_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1+R_2} = kU_{\text{ВХ}} \quad (75)$$

Өрнекті түрлендіретін болсақ:

$$U_{\text{ВЫХ}} \left(1 + k \frac{R_1}{R_1+R_2}\right) = kU_{\text{ВХ}} \quad (76)$$

$U_{\text{ВЫХ}}$ аламыз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{kU_{\text{ВХ}}}{1 + k \frac{R_1}{R_1+R_2}} \quad (77)$$

Жеткілікті үлкен k -мен оны елемеуге болады, содан кейін өрнек форманы алады:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\frac{R_1}{R_1+R_2}} \quad (78)$$

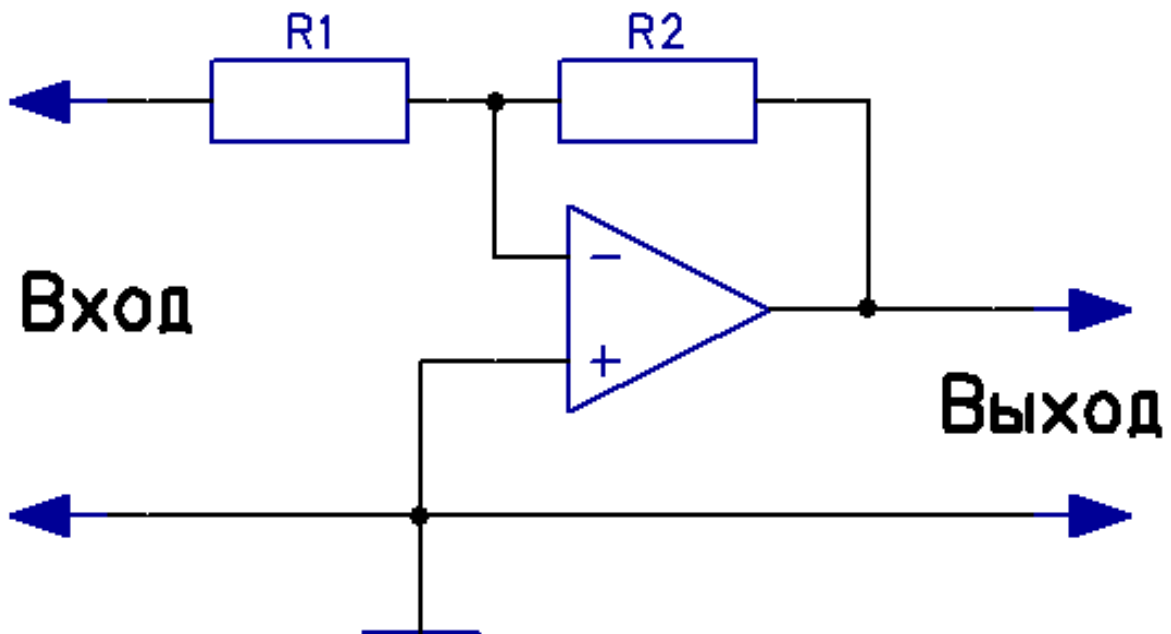
Немесе:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}(R_1+R_2)}{R_1} \quad (79)$$

$U_{\text{ВЫХ}}$ -ді $U_{\text{ВХ}}$ -ге бөлу арқылы пайда табу оңай:

$$k_y = \frac{R_1+R_2}{R_1} \quad (80)$$

Операциялық күшейткішке негізделген тағы бір типтік түйін – бұл инвертор күшейткіші, оның сұлбасы 37-суретте көрсетілген.



Сурет 37 – Оқ-дағы инвертор күшейткіші

Схемалық инверттеуші күшейткіш инверттелмейтін күшейткішке ұқсайды, тек айырмашылығы-кіріс сигналы кері байланыс кернеуін бөлгіш резисторлардың біріне беріледі, ал инверттелмейтін ОК кірісі жерге тұйықталған, яғни оған нөлдік потенциал беріледі. Бұл күшейткіштің өрнектері келесідей болады:

$$U_H = 0; \quad U_{и} = U_{ВХ} + (U_{ВЫХ} - U_{ВХ}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (81)$$

Біз оларды біз қарастырған ОК моделіне ауыстырамыз:

$$U_{ВЫХ} = -k(U_{ВХ} + (U_{ВЫХ} - U_{ВХ}) \frac{R_1}{R_1 + R_2}) \quad (82)$$

Жақшаларды ашып:

$$U_{ВЫХ} = -kU_{ВХ} - kU_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} + kU_{ВХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (83)$$

Өрнекті түрлендіріп:

$$U_{ВЫХ} + kU_{ВЫХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = kU_{ВХ} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - kU_{ВХ} \quad (84)$$

Жақшадан $U_{ВЫХ}$ және $U_{ВХ}$ шығарамыз:

$$U_{ВЫХ} \left(1 + k \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = kU_{ВХ} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - 1 \right) \quad (85)$$

Жақшаларды қосуды орындаймыз:

$$U_{\text{ВЫХ}}(R_1 + R_2 + kR_1) = kU_{\text{ВХ}}(R_1 - R_1 - R_2) \quad (86)$$

Алынған өрнекті жеңілдетеміз:

$$U_{\text{ВЫХ}}(R_1(k + 1) + R_2) = -kU_{\text{ВХ}}R_2 \quad (87)$$

$U_{\text{ВЫХ}}$ арқылы $U_{\text{ВХ}}$ табамыз:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{-kU_{\text{ВХ}}R_2}{(R_1(k+1)+R_2)} \quad (88)$$

Жеткілікті үлкен болған кезде k өрнек форманы алады:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{-U_{\text{ВХ}}R_2}{R_1} \quad (89)$$

Күшейткіш коэффициентін табамыз:

$$k_y = -\frac{R_2}{R_1} \quad (90)$$

Көріп отырғаныңыздай, ол теріс, сондықтан бұл күшейткіш инвертор деп аталады.

Жоғарыда айтылғандай, дифференциалды сигналының пайда болуы жеткілікті үлкен. Бұл күшейткіштің шығысындағы, әдеттегі кернеу мәндерінде (шамамен 10-20 В) күшейткіштің кірістері арасындағы потенциалдар айырмасы милливольт бірліктерін құрайды дегенді білдіреді. Тиісінше, біз қарастырған инвертор күшейткішінің тізбегіндегі R_1 және R_2 резисторларының қосылу нүктесінің потенциалы нөлге жақын, яғни іс жүзінде барлық кіріс кернеуі R_1 резисторына қолданылады, ал шығыс кернеуі осы резистор арқылы өтетін токқа байланысты, оны формула бойынша оңай анықтауға болады:

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} \quad (91)$$

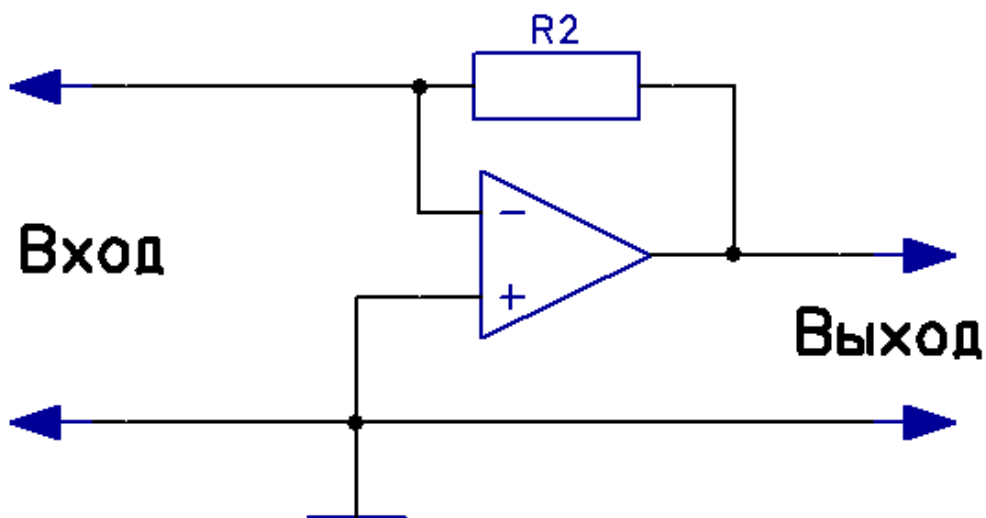
Тиісінше:

$$U_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}}R_1 \quad (92)$$

Бұл өрнекті инвертор күшейткіші үшін (89) формуласына ауыстыра отырып, біз аламыз:

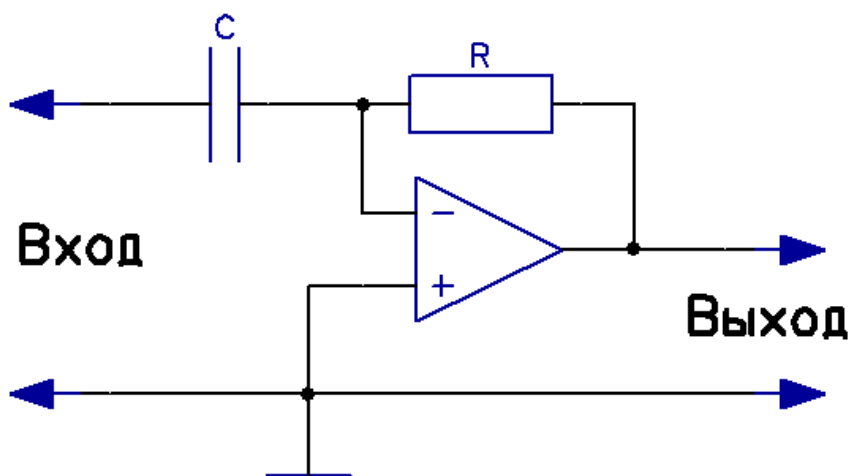
$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}}R_2 \quad (93)$$

R1 резисторын алып тастауға болады, содан кейін біз ток күшін кернеуге түрлендіретін құрылғыны аламыз, сонымен бірге кіріс кедергісі аз болады. Оның сұлбасы 38-суретте көрсетілген.



Сурет 38 - ОЖ-дағы ток-кернеу түрлендіргіші

Ток - кернеу түрлендіргішінің негізінде дифференциатор құруға болады. Оның сұлбасы 39-суретте көрсетілген.



Сурет 39 - дифференциатордың электр тізбегі

Есептеулер үшін біз токтан кернеуге түрлендіргіш үшін бұрыннан белгілі формуланы қолданамыз (94)

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}} R \quad (94)$$

Конденсатор үшін формула:

$$C = \frac{dq}{dU_{\text{ВХ}}} \quad (95)$$

Екінші жағынан, электр энергиясының мөлшерін конденсатор мен уақыт арқылы ток күші арқылы көрсетуге болады:

$$I_{\text{ВХ}} = \frac{dq}{dt} \quad (96)$$

Соңғы екі DQ формуласынан өрнектеп, оларды теңестіре отырып, біз аламыз:

$$CdU_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}} dt \quad (97)$$

I_{ВХ} түрлендірсек:

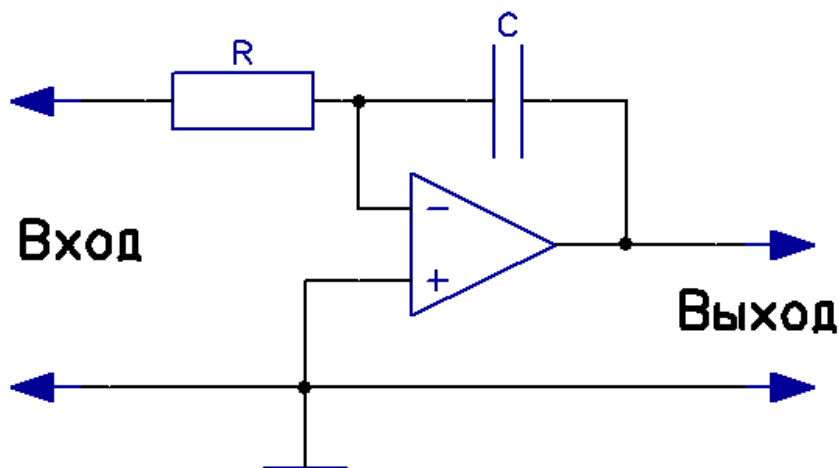
$$I_{\text{ВХ}} = C \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} \quad (98)$$

I_{ВХ} формуланы қойсақ (94):

$$U_{\text{ВЫХ}} = -RC \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} \quad (99)$$

Шығыс кернеуі кіріс өзгеру жылдамдығына пропорционалды екенін байқау қиын емес. Басқаша айтқанда, бұл құрылғы дифференциалдаудың математикалық операциясын жүзеге асырады.

Резистор мен конденсаторды ауыстырып, схемасы 40-суретте көрсетілген интеграторды алуға болады.



Сурет 40 - интегратордың электр тізбегі

Біз осы түйінді есептейміз.

Оп-ның инверторлық кірісі іс жүзінде токты тұтынбайтындықтан, резистор мен конденсатор арқылы өтетін токтардың қосындысы нөлге тең болуы керек:

$$I_R + I_C = 0 \quad (100)$$

Резистор арқылы өтетін токты түйіннің кіріс кернеуі арқылы білдірейік:

$$I_R = \frac{U_{BX}}{R} \quad (101)$$

Ал конденсатор арқылы өтетін ток электр сыйымдылығын анықтаудан оңай көрінеді:

$$I_C = C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} \quad (102)$$

Токтар үшін алынған өрнектерді теңестіріңіз:

$$\frac{dU_{BX}}{RC} = \frac{dU_{ВЫХ}}{dt} \quad (103)$$

dt-ді сол жаққа беру арқылы өрнектің екі бөлігін де біріктіреміз:

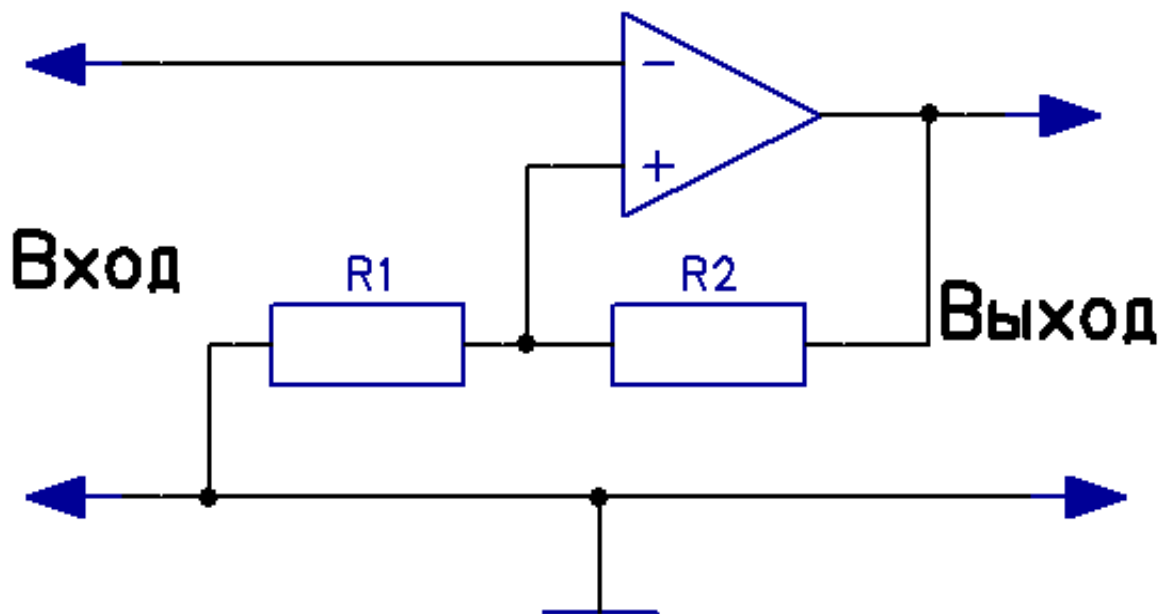
$$\frac{-1}{RC} \int U_{BX} dt = \int dU_{ВЫХ} \quad (104)$$

Нәтижесінде аламыз:

$$U_{ВЫХ} = \frac{-1}{RC} \int U_{BX} dt + U \quad (105)$$

Біз қарастырылып отырған құрылғының математикалық интеграция операциясын орындайтынын дәлелдедік.

Біз бұрын қарастырған ОК-дағы электронды құрылғылардың негізгі түйіндері теріс кері байланыспен жұмыс істеді (яғни, шығыс кернеуі немесе оның бір бөлігі ОК-нің инвертелетін кірісіне қолданылған). Сондай-ақ оң кері байланыс схемалары бар, олардың бірі - Шмитт триггері. Оның сұлбасы 41-суретте көрсетілген.



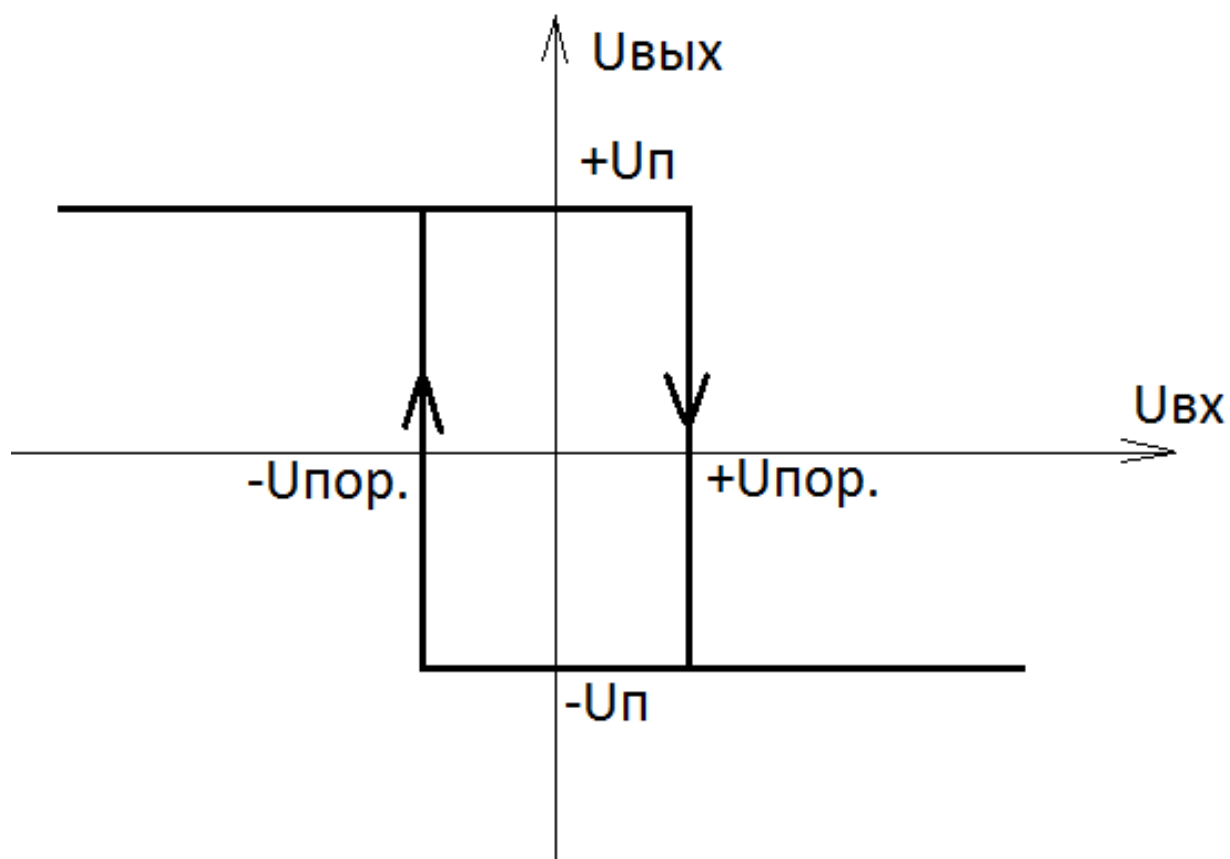
Сурет 41 - ОК -дағы Шмитт триггері

Көріп отырғандай, кері байланыс бөлгіші инверттелмейтін ОК кірісіне қосылған және кіріс сигналы инверторға беріледі. Осы схеманың жұмыс принципін қарастырыңыз. Триггер екі тұрақты күйдің бірінде болуы мүмкін: олардың бірінде шығу потенциалы қуат көзінің оң полюсінің потенциалына жақын, екіншісінде теріс полюстің потенциалына жақын ($+U_{п}$ және $-U_{п}$ 42 – суретте). Бұл жағдайда күшейткіштің инверттелмейтін кірісіне формула бойынша анықталған кернеу әсер етеді

$$U_{пор} = \pm \frac{U_{п}R1}{R1+R2} \quad (106)$$

Бұл өрнектегі белгі триггер орналасқан күйге байланысты.

Ол оң күйде болды делік ($U_{вых} = +U_{п}$). Кез-келген кіріс кернеуі $+U_{пор}$ аз болса, ОК күйді сақтайды, өйткені біз бұрын қарастырған математикалық модельге қарамастан, ол $+U_{п}$ -ден артық кернеу бере алмайды. Енді кіріс кернеуін нөлден $+U_{пор}$ -ға дейін арттырамыз. Кіріс кернеуі шекті мәннен ($u_{пор}$) сәл асып кеткенде, шығыс кернеуі төмендей бастайды, бұл инверттелмейтін кіріс кернеуінің төмендеуіне әкеледі. Бұл өз кезегінде Шығыс кернеуінің төмендеуіне әкеледі. Процесс шығыс кернеуі $-U_{п}$ болғанша қар көшкіні түрінде дамиды. Ол шығысындағы кернеуді одан әрі азайту оның дизайн ерекшеліктеріне байланысты мүмкін емес. Бұл жағдайда триггер дәл осылай жұмыс істейді, бірақ шекті кернеуде басқа белгі бар және ол u күйіне оралу үшін $u_{біз} = +U_{п}$, кіріс кернеуін $-U$ дейін азайту керекпор. Бұл процестер 42-суретте көрсетілген.



Сурет 42 - Шмитт триггерінің берілу сипаттамасы

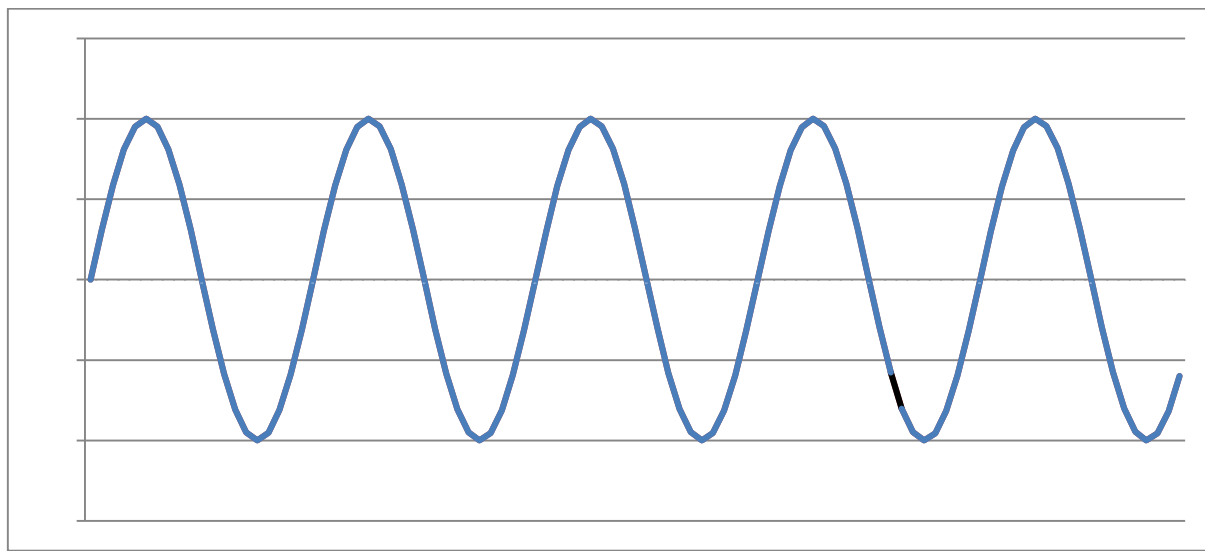
Біз қарастырып отырған триггерде сәйкесінше екі тұрақты күй және кіріс шекті (коммутациялық) кернеудің екі түрлі деңгейі бар.

4 Сигнал генераторлары

4.1 Сигналдардың негізгі түрлері

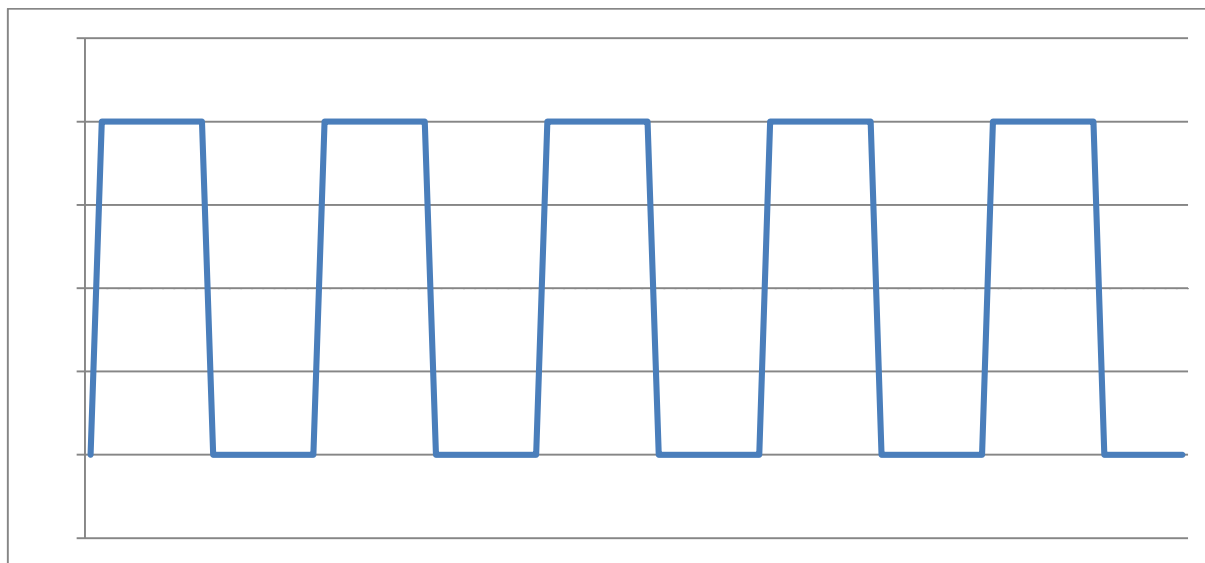
Электроникада қолданылатын сигналдар әртүрлі пішіндермен ерекшеленеді, дегенмен негізгі, базалық сигнал түрлерін анықтауға болады, олардың барлығын бір немесе басқа жолмен азайтуға болады..

Синусоидалы сигнал ерекше орын алады – радиотехникада жиі қолданылатын сигналдардың бірі. Оның пішіні 43 суретте көрсетілген.



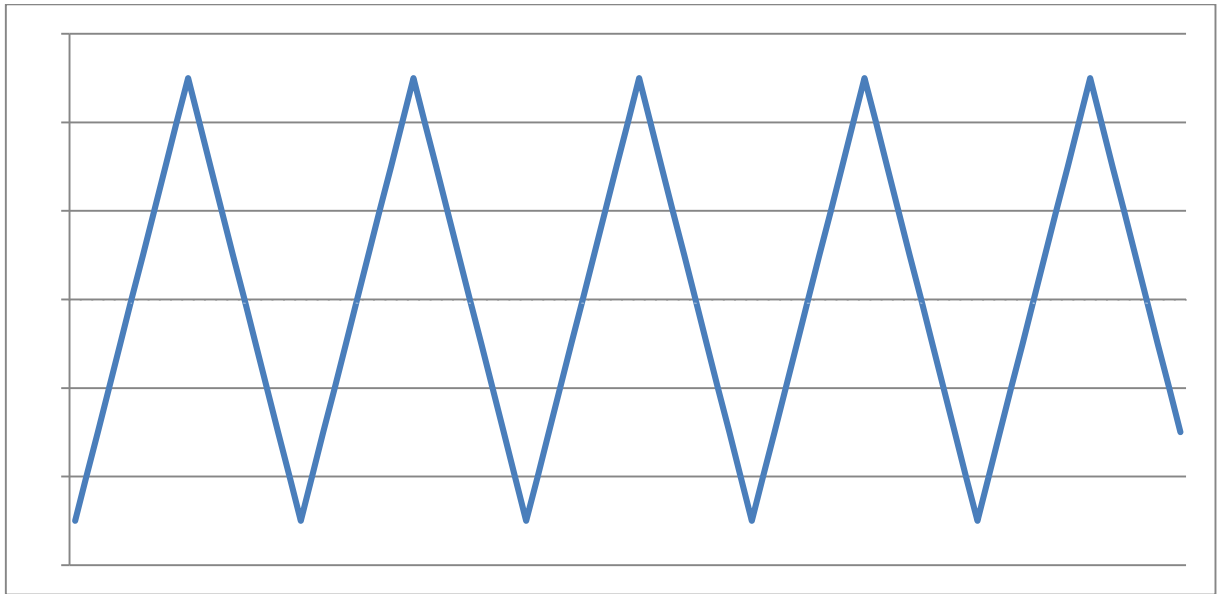
Сурет 43 – Синусоидалы сигнал

Сигналдың тағы бір түрі тікбұрышты, синусоидалыдан айырмашылығы ол екі мүмкін мәннің бірін қабылдайды. Оның пішіні 44-суретте көрсетілген.



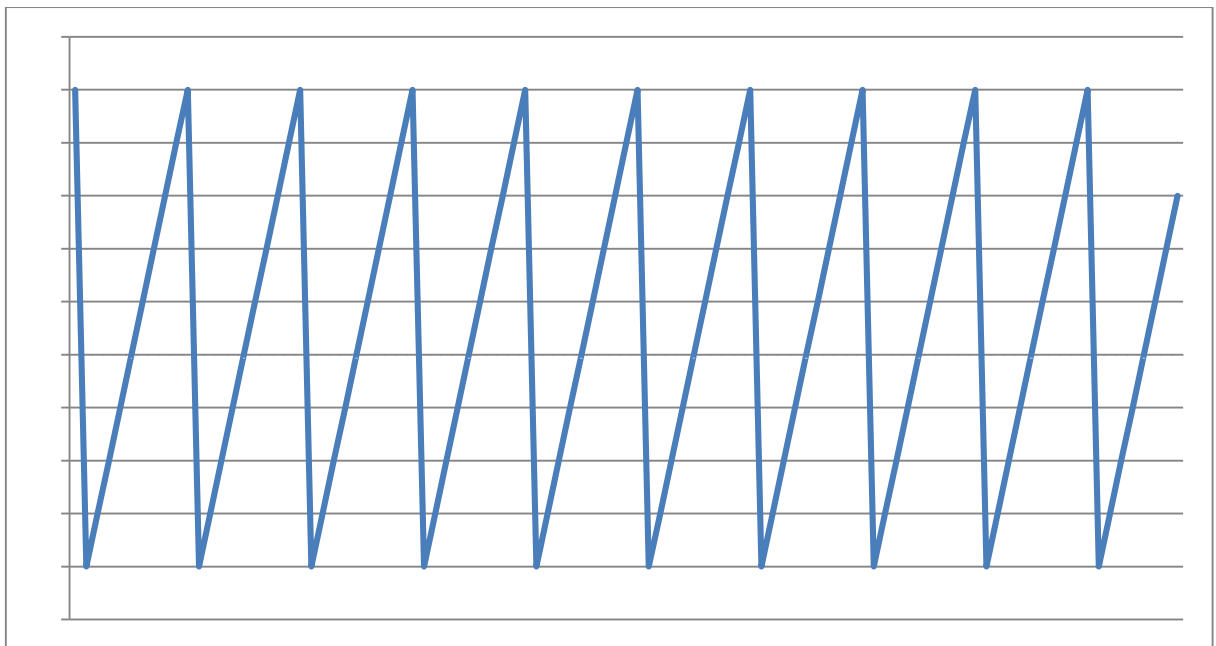
Сурет 44 – Тікбұрышты сигнал

Үшбұрышты (сызықты өзгертін) сигнал түзу сызық түзу кескінінен тұрады. Оның пішіні 45-суретте көрсетілген.



Сурет 45 – Үшбұрышты сигнал

Аратіс тәрізді сигнал электронды осциллографтар мен теледидар жүйелерінде жайма сигналы ретінде қолданылады. Оның пішіні 46-суретте көрсетілген.



Сурет 46 – Аратіс тәрізді сигнал

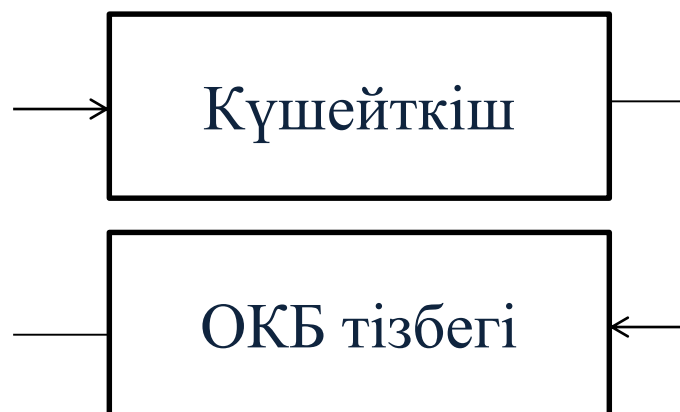
Генератор - қуат көзінен тұтынылатын энергияны берілген түрдегі айнымалы ток энергиясына түрлендіруге арналған құрылғы. Жалпы кез келген сигнал генераторын екі түйіннен тұратын құрылғы ретінде көрсетуге болады: 47-суретте көрсетілгендей қосылған күшейткіш пен оң кері байланыс тізбектері.



Сурет 47 – Генератордың құрылымдық схемасы

Көріп отырғаныңыздай, оң кері байланыс тізбегінің шығысынан сигнал күшейткіштің кірісіне келеді, ал бұл тізбектің кірісі күшейткіштің шығысынан келеді. Әдетте, генерацияланатын сигналдың пішіні мен спектрі кері байланыс тізбегінің параметрлерімен анықталады. Ол әдетте индукторлар, конденсаторлар және кварц резонаторлары сияқты жиілікке тәуелді элементтерден тұрады.

Генераторда сигнал пайда болуы үшін (басқаша айтқанда-генераторды қоздыру үшін) екі шарт орындалуы керек: амплитудалық тепе-теңдік және фазалық тепе-теңдік. Осы шарттардың мағынасын түсіндіру үшін генератордың ашық тізбегі ұғымын енгіземіз. Оны 48-суретте көрсетілгендей тізбектей жалғанған күшейткіш пен кері байланыс тізбегінен тұратын ашық тізбекті айтамыз.



Сурет 48 – Генератордың ашық тізбегі

Осы модельді ескере отырып, генератордың өздігінен қозу шарттары келесідей болады:

Амплитудалық тепе-теңдік: жұмыс жиілігіндегі ашық тізбекті күшейту кем дегенде бірлік болуы керек (яғни, күшейткіш кері байланыс тізбегімен келтірілген шығындарды кем дегенде толық өтейді).

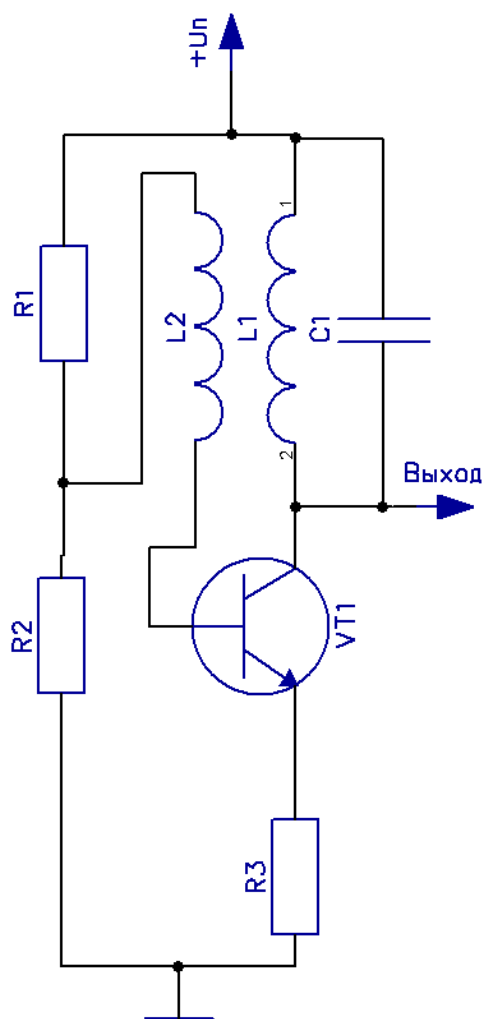
Фазалық теңестік: жұмыс жиілігінде ашық тізбекпен енгізілген фазалық ығысу 2π еселігі болуы керек.

Егер осы шарттардың екеуі де жиіліктер жиынтығы үшін орындалса, онда генераторда олардың әрқайсысында тербелістер бір уақытта пайда болуы мүмкін.

4.2 Трансформатордың кері байланысы бар LC генераторы

Синусоидалы сигнал генераторының қарапайым схемаларының бірі LC трансформаторлық кері байланыс генераторы, оның схемасы 49-суретте көрсетілген. Ол VT1 транзисторына негізделген күшейткіштен тұрады, оның коллекторлық тізбегі кері байланыс тізбегінің элементі болып табылатын L1C1 тербелмелі тізбегін қамтиды. Бұл контурда L1 катушқасымен индуктивті байланысқан L2 катушқасы бар, ол күшейткіштің кірісіне, атап айтқанда VT1 транзисторының базалық тізбегіне кері байланыс сигналын беруге қызмет етеді. R1R2 бөлгіші транзисторға ығысуды қолдану үшін қызмет етеді.

Бұл генератор L1C1 контурының тербелістерінің жиілігіне жақын жиілікте синусоидалы тербелістерді шығарады.



Сурет 49 – Индуктивті кері байланысты LC генераторы

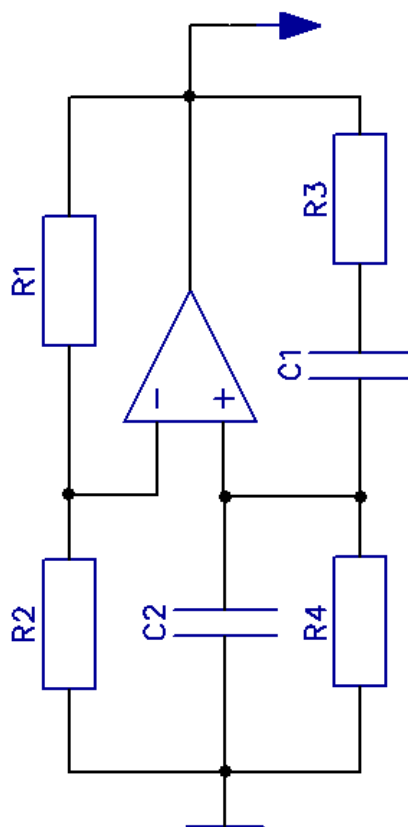
LC генераторларының жалпы кемшілігі - олардың көмегімен салыстырмалы түрде төмен жиіліктегі тербелістерді алу қиын (жүз килогерцтен төмен). Себебі, берілген жиілік диапазонында жұмыс істеу үшін жеткілікті үлкен индуктор мен жеткілікті үлкен сыйымдылықтағы конденсатор қажет, оны кішкентай етіп жасау мүмкін емес.

4.3 Вин-Робинсон көпіріне негізделген генератор

Төмен жиілікті аймақта жұмыс істеу үшін кері байланыс тізбегі тек резисторлар мен конденсаторлардан тұратын RC генераторларын қолданған жөн. Жеткілікті жоғары қарсылықтағы резисторларды (бірліктер және ондаған мегаомдар) пайдалану арқылы герцтің оннан бір бөлігіне дейінгі жиіліктерді алуға болады, ал генератордың өлшемдері өте қолайлы болып қалады.

Синусоидалы сигналдың RC генераторларының бірі - Вин-Робинсон көпіріне негізделген генератор. Мұндай генератордың схемасы 50-суретте көрсетілген.

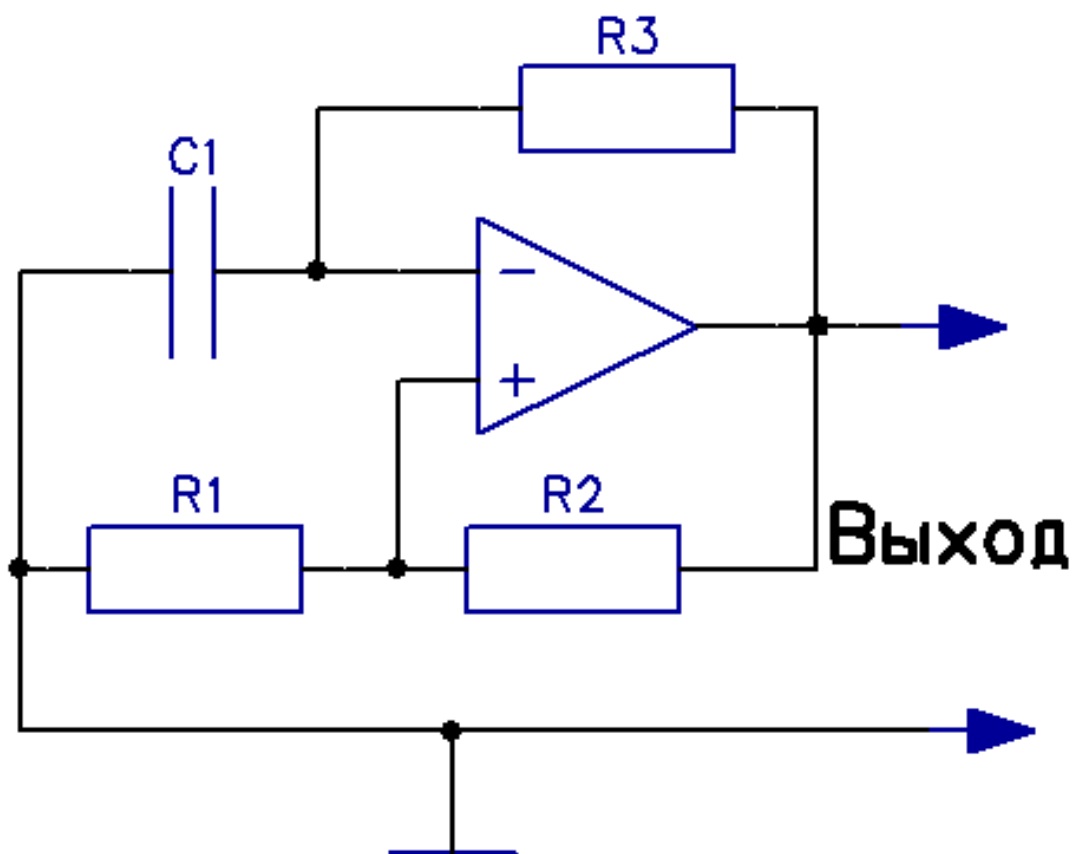
Генератор R1 R2 R3 R4 C1 C2 көпірінен тұрады, оның екі диагоналінде де операциялық күшейткіші бар. R1R2 тізбегі операциялық күшейткіш үшін кері байланыс тізбегі, ал жиілікке тәуелді R3R4C1C2 тізбегі оң кері байланыс тізбегі екенін көру оңай. Берілген генератордың өздік тербелістерінің жиілігі оң кері байланыс тізбегі элементтерінің мәндеріне байланысты.



Сурет 50 – Вин-Робинсон көпіріне негізделген генератор

4.4 Мультивибратор

Тікбұрышты пішінді сигнал алу үшін схемасы 51-суретте көрсетілген операциялық күшейткіштегі мультивибраторды пайдалануға болады. Ол кері байланыс тізбегі R1R2 кернеу бөлгішін құрайтын Шмидт триггерінен және тербеліс жиілігі параметрлеріне байланысты болатын C1R3 интегралды тізбегінен тұрады. Мультивибратордың жұмыс принципін толығырақ қарастырамыз. Бастапқы күйінде конденсатор разрядталды және Шмитт триггері шығыс кернеуі оң болатын күйде болды делік. Конденсатор R3 резисторы арқылы жалпы сымға қатысты оң потенциалға, оның бойындағы кернеу триггердің шекті кернеуіне жеткенше зарядтай бастайды. Бұл триггердің басқа күйге ауысуына әкеледі, онда оның шығуындағы кернеу теріс болады және конденсатор теріс потенциалға дейін зарядтай бастайды. Бұл процесс сонымен қатар іске қосу шегіне жеткенше жалғасады, нәтижесінде триггер қайтадан оң кернеу күйіне ауысады. Осылайша, мультивибратордың шығысында тікбұрышты импульстар пайда болады, ал конденсаторда экспоненциалды формалы сигнал пайда болады.

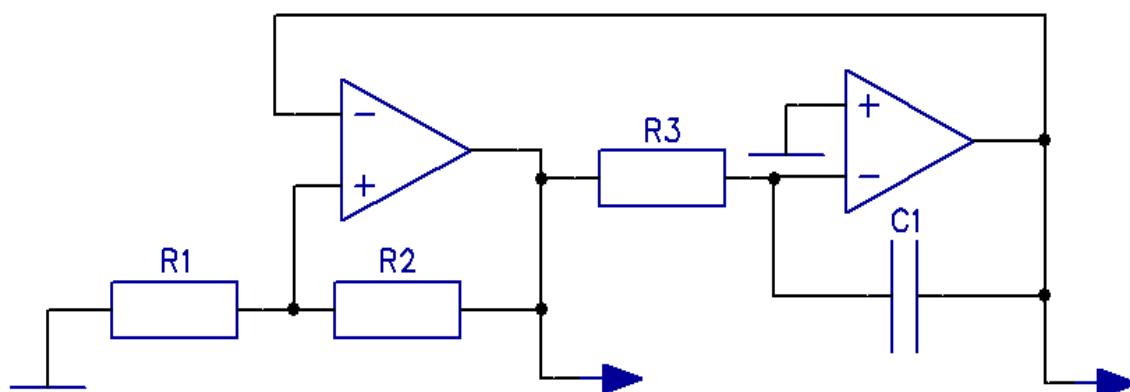


Сурет 51 – ОК –тегі мультивибратор

4.5 Функционалды генератор

Үшбұрышты және тікбұрышты пішінді (бір уақытта) сигнал алу үшін схемасы 52-суретте көрсетілген функционалды генераторды пайдалануға болады. Ол сол жақ (схема бойынша) операциялық күшейткіште орындалған Шмитт триггерінен және сақинаға енгізілген оң жақ (схема бойынша) операциялық күшейткіште орындалған интегратордан тұрады.

Функционалды генератордың жұмыс принципін толығырақ қарастырамыз. Бастапқы күйде интегратор шығысы нөлдік потенциалға ие болды, ал Шмитт триггері шығыс кернеуі оң күйде болсын делік. Интегратордың кірісіне оң кернеу берілгендіктен, оның шығысындағы кернеу триггердің шекті кернеуіне жеткенше сызықты түрде төмендей бастайды. Бұл триггердің басқа күйге ауысуына әкеледі, оның шығысындағы кернеу теріс, ал интегратордың шығысындағы кернеу сызықты түрде артады. Бұл процесс сонымен қатар іске қосу шегіне жеткенше жалғасады, нәтижесінде триггер қайтадан оң кернеу күйіне ауысады. Осылайша, Шмитт триггерінің шығысында тікбұрышты импульстар пайда болады, ал интегратордың шығысында үшбұрышты сигнал пайда болады.



Сурет 52 – Функциональный генератор

5 Сандық техника құрылғылары

5.1 логикалық элементтер

Біз бұрын талқылаған аналогтық электроникамен қатар әртүрлі сандық құрылғылар кеңінен қолданылады. Сандық технология аналогтық технологияны электрониканың көптеген салаларында жоғары шуға төзімділік, жоғары тиімділік және сенімділік арқасында алмастырды [4].

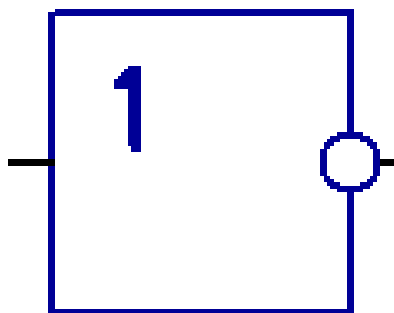
Сандық схемалардың негізін логикалық элементтер құрайды - қарапайым логикалық операцияларды орындайтын құрылғылар. Логикалық элементтердің әрқайсысында бір немесе бірнеше кіріс және бір шығыс бар. Кіріс пен шығыстың әрқайсысы белгілі бір кернеу деңгейлеріне сәйкес келетін екі логикалық күйдің бірінде болуы мүмкін: жоғары (бір) және төмен (нөл).

Негізгі логикалық операцияларды толығырақ қарастырайық. Ең қарапайым операция - теріске шығару. Бұл операцияның ақиқат кестесі кестеде берілген.

Кесте 1 – логикалық функция «ЕМЕС»

X	\bar{X}
0	1
1	0

Бұл логикалық функцияны «ЕМЕС» логикалық элементі орындайды, оның графикалық таңбасы 53-суретте көрсетілген.



Сурет 53 – Логикалық элемент «ЕМЕС»

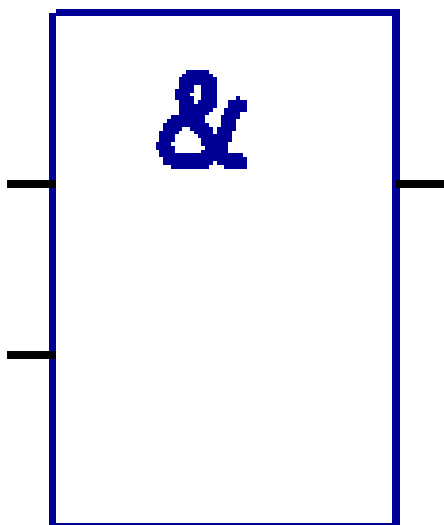
Екілік логикалық операциялардың бірі (екі аргументі бар) логикалық көбейту операциясы болып табылады, кейде «ЖӘНЕ» операциясы деп аталады. Оның ақиқат кестесі 2-кестеде көрсетілген.

Как видно, данная операция истинна только тогда, когда истинны оба ее аргумента. Оның арифметикалық көбейту операциясымен толық сәйкес келетіндігін байқау қиын емес [5].

Кесте 2 – логикалық функция «ЖӘНЕ»

X	Y	$X \wedge Y$ («И»)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логикалық көбейту функциясын «ЖӘНЕ» логикалық элементі орындайды, оның шартты графикалық белгісі 54-суретте көрсетілген.



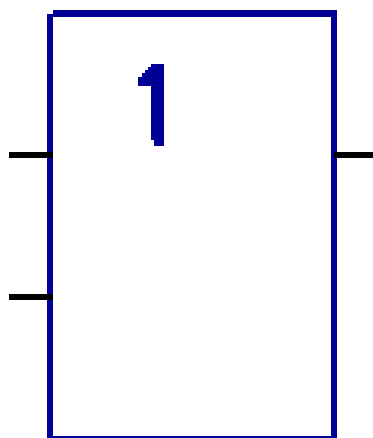
Сурет 54 – Логикалық элемент «ЖӘНЕ»

Тағы бір негізгі логикалық операция - бұл «НЕМЕСЕ» операциясы деп аталатын логикалық қосу операциясы. Оның ақиқат кестесі 3-кестеде келтірілген. Көріп отырғаныңыздай, бұл операция кем дегенде бір дәлел болған кезде ақиқат болады.

Кесте 3 – логикалық функция «НЕМЕСЕ»

X	Y	$X \vee Y$ («ИЛИ»)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логикалық қосу функциясын «НЕМЕСЕ» логикалық элементі орындайды, оның шартты графикалық белгісі 55-суретте көрсетілген.



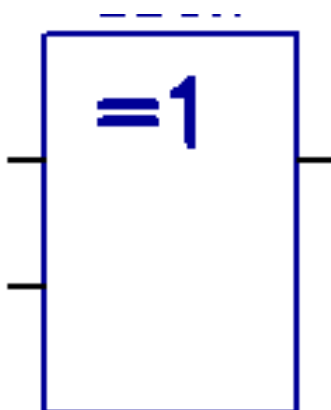
Сурет 55 – Логикалық элемент «НЕМЕСЕ»

Маңызды логикалық функция «НЕМЕСЕ болғызбайтын» операторы болып табылады, егер оның операндтары тең болмаса ақиқат, ал тең болса жалған болады. Бұл операцияның ақиқат кестесі 4-кестеде келтірілген.

Кесте 4 – логикалық функция «Болғызбайтын НЕМЕСЕ»

X	Y	$X \oplus Y$ (Искл. «ИЛИ»)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

«Болғызбайтын НЕМЕСЕ» логикалық функциясын «Болғызбайтын НЕМЕСЕ» логикалық элементі орындайды, оның шартты графикалық белгісі 56-суретте көрсетілген.



Сурет 56 – Логикалық элемент «Болғызбайтын НЕМЕСЕ»

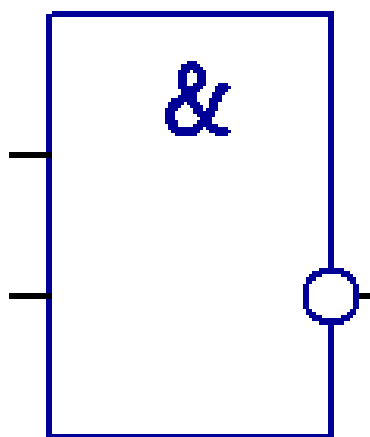
Бұрын қарастырылған функциялардың бірін жоққа шығаратын логикалық функциялар жиі қолданылады. Осы логикалық операциялардың бірі логикалық

көбейтуді теріске шығару болып табылатын «ЖӘНЕ-ЕМЕС» болып табылады. Осы логикалық операцияға сәйкес ақиқат кестесі кестеде берілген.

Кесте 5 – логикалық функция «ЖӘНЕ-ЕМЕС»

X	Y	$\overline{X \wedge Y}$ («И-НЕ»)
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

«ЖӘНЕ-ЕМЕС» логикалық операциясын «ЖӘНЕ-ЕМЕС» логикалық элементі орындайды, оның шартты графикалық белгісі 57-суретте көрсетілген. Айта кету керек, әдеттегі графикалық белгілеуде терістеу шығыстың жанындағы шеңбермен белгіленеді, әйтпесе бұл логикалық элементтің белгіленуі «ЖӘНЕ» элементінің белгілеуімен толығымен сәйкес келеді.



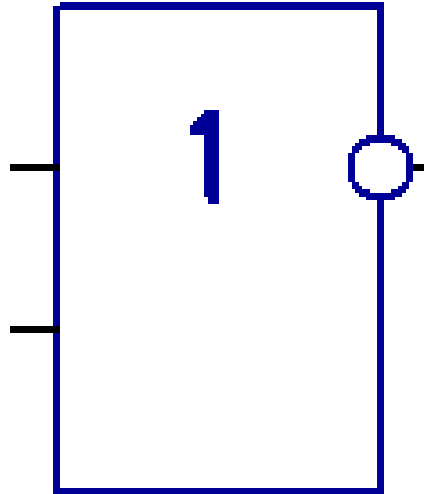
Сурет 57 – Логикалық элемент «ЖӘНЕ - ЕМЕС»

Логикалық қосуды терістеу де жиі қолданылады - ақиқат кестесі кестеде берілген «НЕМЕСЕ-ЕМЕС» функциясы.

Кесте 6 – логикалық функция «НЕМЕСЕ-ЕМЕС»

X	Y	$\overline{X \vee Y}$ («ИЛИ-НЕ»)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Бұл функцияны «НЕМЕСЕ-ЕМЕС» логикалық элементі орындайды, оның шартты графикалық белгісі 58-суретте көрсетілген.



Сурет 58 – Логикалық элемент «НЕМЕСЕ-ЕМЕС»

Біз қарастырған логикалық элементтер күрделі логикалық функцияларды жүзеге асыратын құрылғыларға біріктірілуі мүмкін. Сондай-ақ кірістердің үлкен саны бар логикалық элементтер бар (сегізге дейін), бірақ олардың орындайтын логикалық функциялары қарастырылғандарға ұқсас.

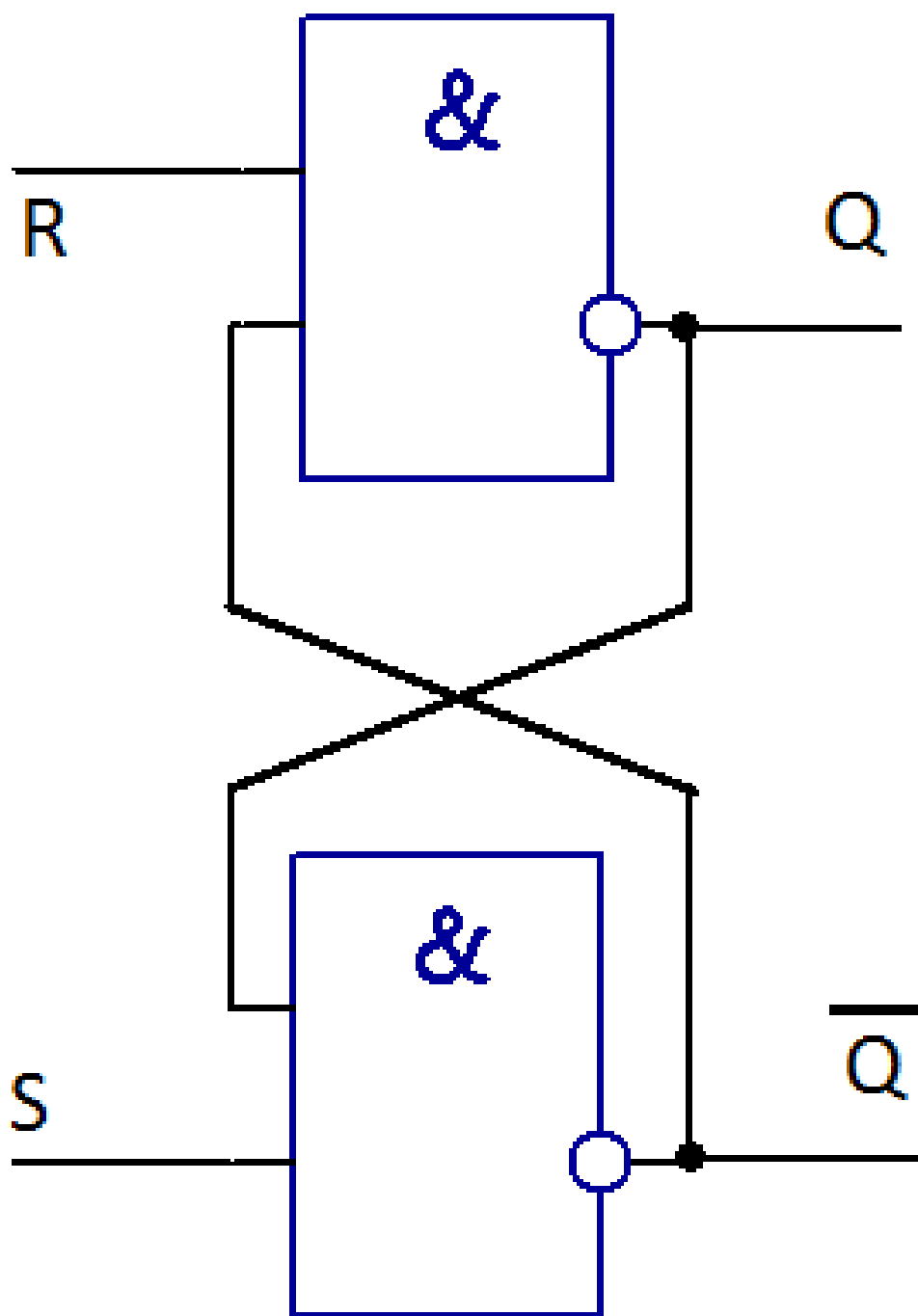
5.2 Тізбекті логикалық құрылғылар

Тізбекті типті логикалық құрылғылар - бұл әрекеті тек кірістерге берілетін сигналдармен ғана емес, сонымен қатар құрылғының қазіргі уақытта орналасқан күйімен де анықталатын құрылғылар. Әдетте, мұндай құрылғылар құрылғының шығыстарынан оның кірістеріне сигналдарды беретін кері байланыс схемаларын қамтиды.

Ең қарапайым тізбек типті құрылғы RS триггер болып табылады. "ЖӘНЕ-ЕМЕС" логикалық элементтерінде орындалған мұндай триггердің схемасы 59-суретте көрсетілген. Триггерде сәйкесінше екі кіріс - R және S және екі Q және \bar{Q} , шығыстары бар, олар тікелей және инверсті шығыстар деп аталады.

Осы триггердің жұмысын толығырақ қарастырайық. Екі триггер кірісі де нөлдік күйде делік. Бұл жағдайда триггердің екі шығысы да оның құрамына кіретін элементтердің логикасына сәйкес бір күйге өтеді. Енді біз R кірісіне жоғары логикалық деңгей береміз. Бұл жағдайда жоғарғы (схема бойынша) логикалық элемент нөлдік күйге ауысады, ал логикалық нөлдің деңгейі оның шығуынан төменгі (схема бойынша) элементті нөлдік күйге аударады. Егер S кірісіне жоғары логикалық деңгей берсек, төменгі (схема бойынша) элемент нөлдік күйге өтеді, ал жоғарғы жағы бір күйде болады.

Триггердің екі кірісіне де жоғары логикалық деңгей берілген жағдайда, ол өзінің күйін сақтайды. Қарастырылған процестер 7-кестеде көрсетілген.



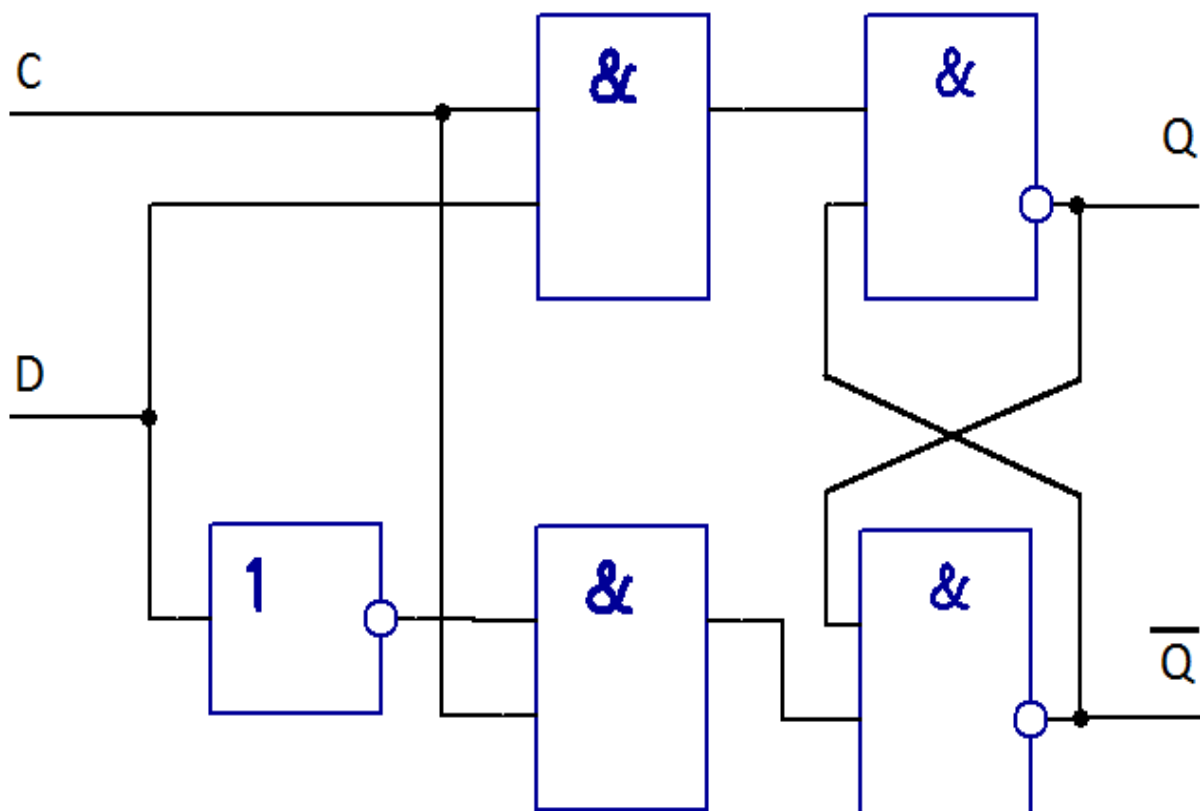
Сурет 59 – RS-триггер

Кесте 7 – RS триггерінің ақиқат кестесі

R	S	Q	\bar{Q}
0	0	1	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	Алдыңғы күй	

RS триггерінің жад функциясын орындайтынын байқау қиын емес: кірістерге белгілі бір логикалық деңгейлерді беру арқылы триггердің күйін

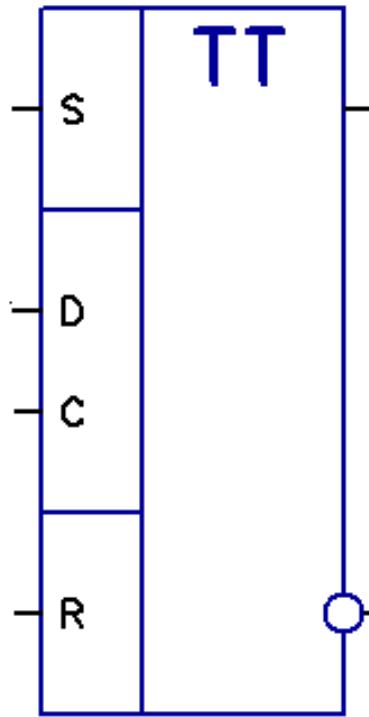
өзгерте аламыз, жазылған ақпаратты өшіре аламыз (екі кіріске де логикалық нөлдерді беру арқылы), кірістерге жоғары логикалық деңгейлерді беру арқылы жазылған ақпаратты сақтай аламыз. RS триггерінің кемшілігі-ақпаратты сақтауды басқару және ақпараттың өзін триггерге беру бірдей кірістер арқылы жүзеге асырылады, бұл іс жүзінде өте ыңғайсыз. Бұл кемшілікті жою үшін D-триггер жасалды, оның схемасы 60-суретте көрсетілген.



Сурет 60 – D-триггер

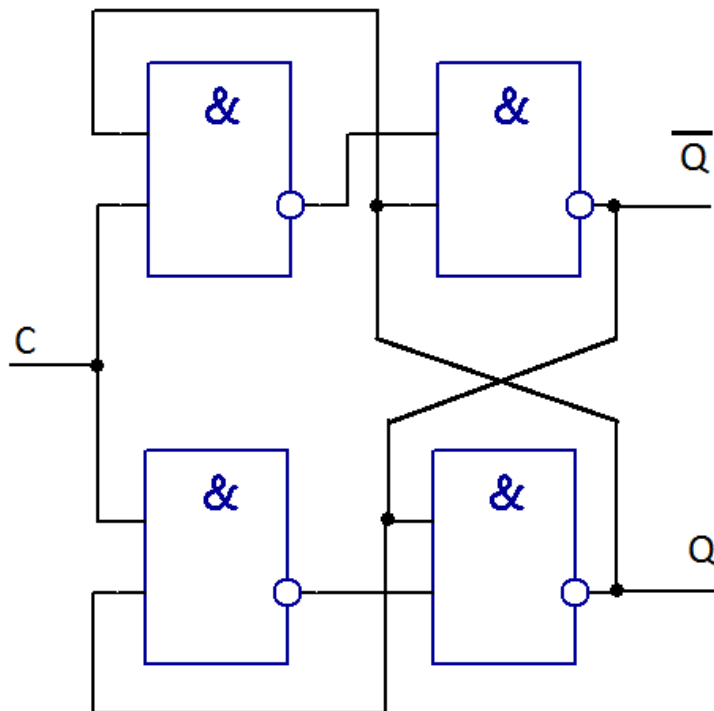
Бұл триггер логикалық элементтермен толықтырылған RS триггерінен тұратынын байқау қиын емес. Оның екі кірісі бар: ақпарат D және тактілік кіріс C.

D-триггердің логикалық жұмысы өте қарапайым: C кірісіне жоғары деңгей берілгенде, ол D кірісінің логикалық деңгейіне сәйкес күйге ауысады, ал C кірісі нөлдік күйде болғанда, триггер өз күйін сақтайды. Осылайша, бұл триггерде ақпараттық және логикалық кірістер бөлінеді, бұл оны сандық құрылғыларды жобалау кезінде қолдануға ыңғайлы етеді. D - триггердің шартты графикалық белгісі 61-суретте көрсетілген.



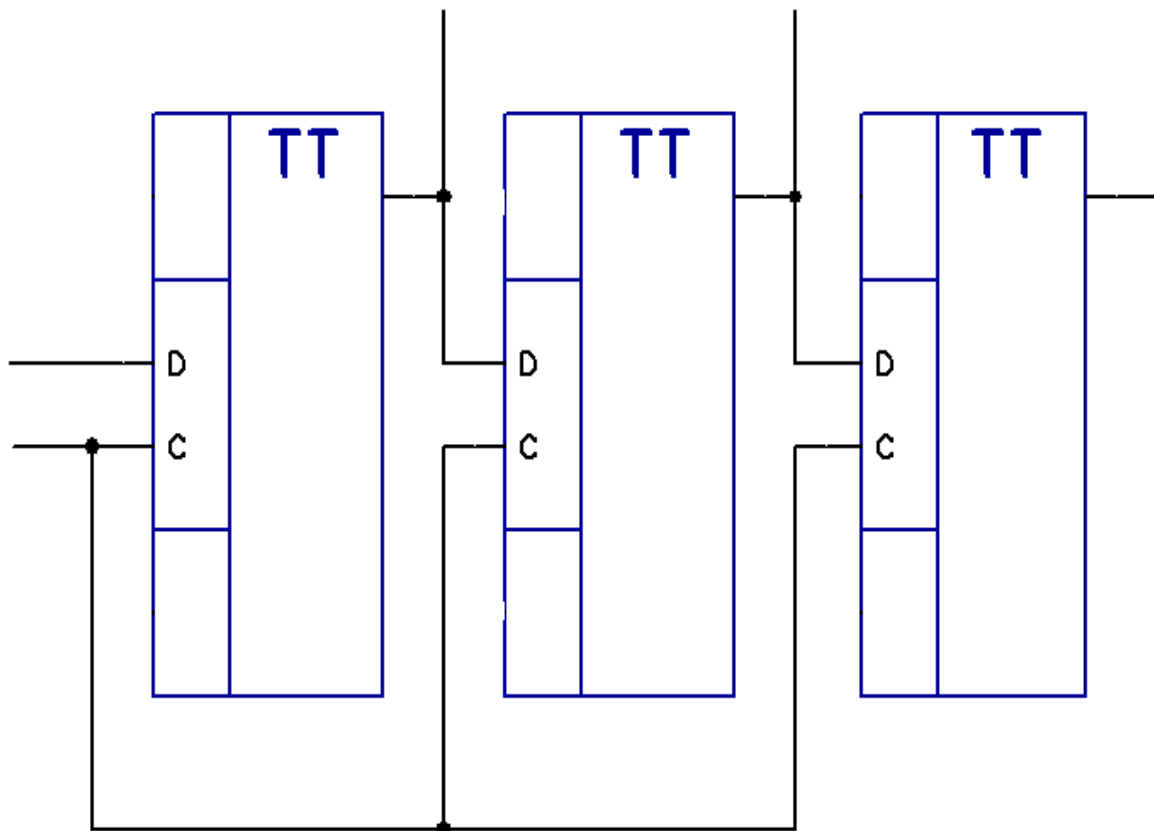
Сурет 61 – D - триггерінің шартты графикалық белгісі

RS триггерінен жасалған тағы бір триггер-Т типті триггер. Бұл триггердің схемасы 62 суретте көрсетілген. Бұл триггер, D триггерінен айырмашылығы, ақпараттық кірісі жоқ. Т типті триггердің жұмыс істеу логикасы әрбір импульс С кірісіне келгенде оның күйін керісінше өзгертеді.



Сурет 62 – Т-триггер

Тізбекті типті логикалық құрылғылардың бір түрі регистрлер болып табылады. Олар ақпараттың бірнеше биттерін сақтауға, тізбекті кодты параллельге және керісінше түрлендіруге және көптеген басқа мақсаттарға арналған. Ең қарапайым үшразрядты регистрдің жұмысын қарастырайық, оның схемасы 63-суретте көрсетілген.



Сурет 63 – Регистрдің схемасы

Бұл регистр тізбектей жалғанған үш D-типті триггерден тұрады. Оның C тактілік кірісі, D деректер кірісі және Q1, Q2 және Q3 үш шығысы бар. C кірісінен тактілі сигнал барлық триггерлерден кірістерге бір уақытта беріледі. Регистрдің C кірісіне жоғары деңгей қолданылғанда, бірінші триггер сол кездегі регистрдің D кірісінде болған күйді, екінші триггер бірінші триггердің күйін еске сақтайды. Ал үшіншісі – екіншісінікін. Осылайша, тізілімде жазылған деректер бір позицияға оңға «жылжыды».

Қорытынды

Бұл оқу құралында қуат көздерін, күшейткіштерді, сигнал генераторларын және сандық құрылғыларды есептеу мен жобалауға қатысты негізгі сұрақтар қарастырылды. Оқу құралды әзірлеу кезінде авторлар қойған мақсаттардың бірі дәстүрлі әдебиетте қабылданған материалды көрсетудегі «керексіз ақпараттарды» жою болып табылады, сондықтан бұл құралда тіпті электроника бойынша мамандандырылған әдебиеттерде де сирек кездесетін негізгі формулалардың жеткілікті егжей-тегжейлі қорытындылары берілген, дегенмен, физиканың басқа салаларындағы оқу әдебиеттерінде формулаларды шығару міндетті болып табылады. Бұл студенттерге материалды жақсырақ меңгеруге және есептеу формулаларын құпия білім ретінде қарастырмауға мүмкіндік береді. Дегенмен, қазіргі заманғы электроника көптеген салаларды қамтиды және оны осы оқу құралының көлемінде айту мүмкін емес. Осыған байланысты авторлар студенттерге оқуға ұсынылған әдебиеттерді назардан тыс қалдырмауды және пән бойынша ақпарат көздерінің барлық спектрін жан-жақты қабылдауды ұсынады, сонымен бірге ең маңызды мәселелердің бірі білімді іздеу және жүйелеу дағдыларын қалыптастыру.

Пайдаланылған әдебиеттер тізімі

1. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. Феникс: Ростов-на-Дону, 2002. – 572, б. 364-369 б.
2. Платт Ч. Электроника: логические микросхемы, усилители и датчики. БХВ-Петербург: СПб, 2015 - 448 б., 10-13 б.
3. Зиновьев Г.С. Силовая Электроника М.:Юрайт, 2015 - 668 б., 450-475 б.
4. Миленина С.А. Электротехника, электроника и схемотехника. Оқулық және практикум М.:Юрайт, 2015, 400 б., 120-135 б.
5. Богомолов С.А. Основы электроники и цифровой схемотехники М.:Академия, 2014 - 208 б., 47-75 б.