

Білім және ғылым министрлігі Қазақстан Республикасы

Коммерциялық емес акционерлік қоғам  
Ғумарбек Дәукеев атындағы  
Алматы энергетика және байланыс университеті

**Бораш Абилович Жумагазин**  
**Арайлым Бекжанқызы Нусибалиева**

## **ЭЛЕКТРОНИКА**

Оқу құралы

Алматы  
АЭЖБУ  
2021

**ӘОЖ 621.38 (075.8)**

**ББК 32.85 я73**

**Ж78**

**Пікір берушілер:**

техника ғылымның кандидаты, ХАТУ РЭЖТ кафедрасының профессоры

**Бахтиярова Е.А.**

Логистика және көлім академиясының қауымдастырылған профессоры, PhD

**Калиев Ж.Ж**

техника ғылымның кандидаты, Ғұмарбек Даукеев атындағы АЭЖБУ

Электроника кафедраның доценты

**Мусапирова Г.Д.**

Алматы энергетика және байланыс университетінің Ғылыми кеңесі баспаға ұсынды (Хаттама № 6 «23» қараша 2021). 2021 жылға арналған Ғ. Дәукеев атындағы АЭЖБУ ведомстволық әдебиеттерді шығарудың қосымша жоспары бойынша басып шығарылады, реті 37

**Жумагазин Б.А., Нусибалиева А.Б.**

**Ж78** Электроника: оқу құралы («Автоматтандыру және басқару» мамандығының студенттері үшін)/ Б.А. Жумагазин, А.Б. Нусибалиева. – Алматы: АЭЖБУ, 2021. – 119 б.: кестелер 2, суреттер 94, әдебиеттер. - 10 атау.

**ISBN 978-601-358-010-4**

Оқу құралы электроника негіздері бойынша берілген материалдар болып табылады, Ол Қазақстан Республикасының Мемлекеттік стандартына және «Электроника» жоғары оқу орындары үшін жалпы кәсіптік пән бойынша бағдарламаға сәйкес құрылымдалған.

Оқу құралы жоғары оқу орындарының студенттеріне арналған, сонымен қатар инженерлер мен басқа да ғылыми-техникалық мамандарға пайдалы болуы мүмкін.

**ӘОЖ 621.38 (075.8)**

**ББК 32.85 я73**

**Ж78**

**ISBN 978-601-358-010-4**

©АЭЖБУ, 2021

Жумагазин Б.А.

Нусибалиева А.Б.

## Кіріспе

Қазіргі электроника әлемдегі ғылыми-техникалық прогрестің маңызды бағыттарының біріне айналды. Үлкен және өте үлкен интегралды сұлбалардың, микропроцессорлардың және микропроцессорлық жүйелердің құрылуы электронды компьютерлер мен жоғары жылдамдықты компьютерлердің, әртүрлі электронды жабдықтардың, технологиялық процестерді басқару жүйелері мен құрылғыларының, байланыс жүйелерінің, сарапшылардың, бақылаушылардың және басқа жүйелердің жаппай өндірісін ұйымдастыруға мүмкіндік берді.

Электроника - бұл электронды, иондық және шала өткізгіш құрылғыларды зерттеуге, дамытуға, өндіруге және қолдануға байланысты ғылым мен техниканың бір саласы. Электрониканың даму тарихында төрт негізгі кезеңді бөлуге болады: электронды шамдар (1904 жылдан бастап), транзисторлар (1947 жылдан бастап), интегралды сұлбалар (1958 жылдан бастап), көлемді эффектілерді қолданатын функционалды құрылғылар (1980 жылдан бастап) және қолданудың төрт негізгі саласы: Электр байланысы, кеңінен қолданылатын радиоэлектрондық жабдықтар, есептеу техникасы және өнеркәсіптік электроника. Электр байланысы техниканың мынадай бағыттарын қамтиды: радиобайланыс, радиохабар тарату, теледидар, дыбыстық хабар тарату, автоматты электр байланысы, көп арналы электр байланысы, радиорелелік, ғарыштық, талшықты-оптикалық және ұялы байланыс.

Микроэлектроника жартылай өткізгіш интегралды технологияны жетілдіру бағытында да, жаңа физикалық құбылыстарды қолдану бағытында да тез дамып келеді. Интегралды микроэлектроника тізбек теориясының заңдылықтарына сәйкес электронды сұлбаның дамуына негізделген дискретті электроника принципін қолданады. Бұл принцип микросұлба элементтері мен элементар қосылыстар санының өсуімен байланысты, өйткені ол атқаратын функциялар күрделене түседі. Алайда, микросұлбалардың интеграция деңгейінің жоғарылауы және элементтердің мөлшерінің төмендеуі (90 - 45 нм топологиялық деңгейге жеткен) белгілі бір шектеулерге ие. Сонымен қатар, бір кристалда жүздеген мыңнан астам элементтерді біріктіру технологиялық тұрғыдан қиын және әрдайым экономикалық тұрғыдан қарастыру мүмкін емес.

Функционалды микроэлектроника түбегейлі басқа тәсілді қамтиды: суперөткізгіштер, ферроэлектриктер, фотоөткізгіш қасиеттері бар материалдар, аморфты материалдар, органикалық жартылай өткізгіштер және т. б. сияқты материалдардағы физикалық құбылыстарға тікелей негізделген алдын-ала анықталған қасиеттері бар арнайы ортаны алу. Ақпаратты өңдеу үшін диэлектриктерде оптикалық және магниттік құбылыстар, ультрадыбыстың таралу заңдылықтары, зарядтау байланысы бар құрылғыларда зарядтардың жинақталуы мен берілуінің әсері, кванттық когерентті қасиеттерге негізделген құбылыстар — Джозефсон эффектісі және т.б. осы қасиеттердегі элементтерді енгізу күрделі сұлбалық немесе жүйелік функционалды мақсаттары бар құрылғыларды алуға мүмкіндік береді. Функционалды микроэлектроникада

денелер құрылымының молекулалық деңгейде өзгеруіне байланысты құбылыстар сәтті қолданылады. Бұл құбылыстар жаңа бағыттың пайда болуына әкелді — молекулалық электроника және биоэлектроника, онда электронды элементтер мен құрылғылар жеке молекулалар мен олардың кешендері деңгейінде ұйымдастырылған. Бұл бағытқа электрлік, магниттік және оптикалық қасиеттердің күрт өзгеруіне және сыртқы әсерлерге жоғары сезімталдыққа әкелетін қатты денелер мен сұйық кристалдардағы фазалық ауысулар кіреді, бұл әртүрлі функционалды құрылғылардағы ақпарат ағындарын басқару және түрлендіру бойынша бірқатар операцияларды жеңілдетеді. Қазіргі уақытта биоэлектрониканың әртүрлі салаларында үлкен зерттеулер жүргізілуде, олардың нәтижелері жабайы табиғат құбылыстарын қолдану технологияның осы саласында жаңа ғылыми-техникалық революцияға әкелуі мүмкін екенін көрсетеді.

Шала өткізгіш құрылғылардың негізгі кластары: диодтар, биполярлық және өріс транзисторлары, тиристорлар, фотоэлектрондық және оптоэлектрондық құрылғылар; интеграцияның әртүрлі деңгейіндегі интегралды сұлбалар түрінде жасалған және жартылай өткізгіш немесе диэлектрлік субстраттарда бірыңғай технологиялық циклде жасалған бірнеше өзара байланысты компоненттердің (транзисторлар, диодтар, резисторлар және т.б.) жиынтығы болып табылатын құрылғылар. Кіріс және шығыс сигналдарының физикалық сипатына байланысты сигнал түрлендіргіштерінің төрт түрі бөлінеді:

- кірулер мен шығулардағы электр сигналдары бар электр түрлендіргіш аспаптар;

- кіріс электр сигналдарының әсерінен шығуларда жарық сигналдары пайда болатын электр жарық аспаптары;

- Кіріс жарық сигналдарын электр сигналдарына түрлендіретін фотоэлектрлік құрылғылар;

- кірулерде жылу сигналдары және шығуларда электр сигналдары бар термоэлектрлік аспаптар.

Құрылғыларда қолданылатын сигналдардың пішініне байланысты аналогтық, импульстік, Сандық құрылғылар және олардың комбинациясы ерекшеленеді. Аналогты құрылғылардың негізгі түрлері: гармоникалық тербелістердің Автоматты генераторлары және релаксация генераторлары, микрофондар, көбейткіштер (бөлгіштер) және жиілік түрлендіргіштері, модуляторлар, демодуляторлар (модемдер), детекторлар, күшейткіштер, соның ішінде операциялық.

Импульстік құрылғыларға импульстік сигналдарды қалыптастыруға, олардың параметрлерін өзгертуге және интеграция, саралау, уақыттың кешігуі, пішіннің өзгеруі, ұзақтығы және т.б. сияқты түрлендіру операцияларын сигналдардан жоғары орындауға арналған функционалды түйіндер жатады.

# 1 Шалаөткізгіш құрылғылар

## 1.1 Шалаөткізгіштердің электр өткізгіштігі

Қатты денелі заттардың маңызды қасиеттері болып олардың электр өткізгіштігі болып табылады. Электрөткізгіштік бос электрондардың қозғалысымен анықталады. Мұндай электрондар атомдар арасында қозғалады және басқа электрондармен, ядролармен және электр өрістерімен әрекеттесе алады. Электр өткізгіштігі бойынша барлық қатты денелі заттар шартты түрде өткізгіштер, шалаөткізгіштер және диэлектриктер болып үшке топқа бөлінеді.

Шалаөткізгіштер дегеніміз белгілі бір электр өткізгіштігі бойынша өткізгіштер мен диэлектриктер арасында орташа орын алатын заттар. Температурасы  $T = 300 \text{ K}$  ( $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) кезінде өткізгіштердің нақты меншікті өткізгіштігі  $10^4 - 10^6 \text{ См/см}$  болып келеді, ал диэлектрик үшін меншікті өткізгіштігі  $10^{-10} \text{ см/см}$  - нен аз, ал шалаөткізгіштерде оның мәні  $10^{-10}$  - нан  $10^4 \text{ См/см}$ -ге дейін болады. Заттардың көпшілігі дәл осы шалаөткізгіштерге жатады.

Таза шалаөткізгіш элементтері болып көміртегі (C), германий (Ge) және кремний (Si), сондай-ақ III гр элементтерінің химиялық қосылыстары болып табылады. V топ элементтері бар периодтық жүйе, мысалы, GaAs, GaP, InAs, CdTe және т.б. мысалы, кремний кристалын қарастырамыз.

Кремний төрт валентті элемент. Бұл атомның сыртқы қабығында ядромен салыстырмалы түрде әлсіз байланысқан төрт электрон бар екенін білдіреді. Әр кремний атомының ең жақын көршілерінің саны төртке тең. Көршілес атомдар жұбының өзара әрекеттесуі *коваленттік байланыс* деп аталатын жұп-электронды байланыс арқылы жүзеге асырылады. Әр атомнан осы байланыстың пайда болуына бір валентті электрон қатысады, олар атомдардан бөлініп шығады (кристалмен ұжымдастырылады) және олардың қозғалысы кезінде көп уақытын көрші атомдар арасындағы кеңістікте өткізеді. Олардың теріс заряды оң кремний иондарын бір-біріне жақын ұстайды. Әр атом көрші атомдармен төрт байланыс түзеді және кез келген валенттік электрон олардың бірінде қозғала алады. Көрші атомға жеткенде, ол келесіге, содан кейін бүкіл кристалл бойымен жүре алады. Валенттілік электрондары бүкіл кристалға жатады. Кремнийдің жұптасқан электронды байланыстары өте берік және төмен температурада үзілмейді. Сондықтан кремний төмен температурада электр тогын өткізбейді. Абсолютті нөл температурасында қоспалары жоқ шалаөткізгіш *диэлектрик* болып табылады. Байланысқа қатысатын валенттілік электрондары кристалл торына мықтап байланған, ал сыртқы электр өрісі олардың қозғалысына айтарлықтай әсер етпейді.

Кремний қызған кезде бөлшектердің кинетикалық энергиясы көтеріліп, жеке байланыстардың үзілуі орын алады. Кейбір электрондар өз орбиталарын тастап, металдағы электрондар сияқты бос болады. Электр өрісінде олар электр тогын қалыптастыру үшін тор - торлары арасында қозғалады. Бос электрондардың болуына байланысты шалаөткізгіштердің өткізгіштігі

*электронды өткізгіштік* деп аталады. Температураның жоғарылауымен бұзылған байланыстардың саны артады, яғни бос электрондар да артады.

Байланыс үзілген кезде электрон жетіспейтін бос орын пайда болады. Оны *тесік* деп атайды. Кемтікте қалған қалыпты байланыстармен салыстырғанда артық оң заряд бар. Кемтік ылғида кристалда өзгерісте болып табылады. Келесі процесс үздіксіз жүреді. Атомдардың байланысын қамтамасыз ететін электрондардың бірі пайда болған кемтіктердің орнына секіреді және мұнда жұп-электронды байланысты қалпына келтіреді, ал бұл электрон секірген жерден жаңа кемтік пайда болады. Осылайша, кемтік бүкіл кристалда жүре алады. Егер үлгідегі электр өрісінің күші нөлге тең болса, онда оң зарядтардың қозғалысына тең кемтіктердің қозғалысы кездейсоқ жүреді, сондықтан электр тогын жасамайды. Электр өрісі болған кезде кемтіктердің реттелген қозғалысы пайда болады, осылайша кемтіктердің қозғалуымен байланысты электр тогы бос электрондардың электр тогына қосылады. Кемтіктердің қозғалыс бағыты электрондардың қозғалыс бағытына қарама-қарсы.

Қоспалар болған кезде, мысалы, мышьяк атомдары, тіпті олардың концентрациясы өте төмен болса да, бос электрондардың саны бірнеше есе артады. Бұл келесі себеппен болады. Мышьяк атомдарында бес валентті электрон бар, олардың төртеуі берілген атомның басқалармен, мысалы, кремний атомдарымен коваленттік байланыс құруға қатысады. Бесінші валенттік электрон атоммен әлсіз байланысқан. Ол мышьяк атомын оңай тастап, еркін болады. Бос электрондардың концентрациясы едәуір артады және таза жартылай өткізгіштегі бос электрондардың концентрациясынан мың есе көп болады. Электрондарды оңай шығаратын қоспалар *донорлық* деп аталады, ал мұндай шалаөткізгіштер *электронды өткізгіштер* немесе *n* типті шалаөткізгіштер деп аталады. Донорлардың атомдары электрондарды жоғалтып, өздері *оң зарядталады* және оң ионға айналады. Донордың әр атомына бір электрон өткізгіштік аймағына өтеді, осылайша осы аймақта донор атомдарының санына тең қосымша электрондар пайда болады. Донор атомдарының өзінде кемтіктер пайда болмайды.

*n* типті шалаөткізгіште электрондар *негізгі* заряд тасымалдаушылар болып табылады, ал кемтіктер *негізгі емес*.

Егер атомдары үш валентті индий қоспа ретінде қолданылса, онда шалаөткізгіштің өткізгіштік сипаты өзгереді. Енді көршілермен қалыпты жұптық-электронды байланыс құру үшін атом индий электрон алмайды. Нәтижесінде кемтік пайда болады. Кристаллдағы кемтіктердің саны қоспа атомдарының санына тең. Мұндай қоспалар *акцептор* (қабылдау) деп аталады. Электрондарды ұстап тұрған акцептор атомдары теріс зарядталады және теріс ионға айналады. Электр өрісі болған кезде тесіктер өріс бойымен араласады және *кемтіктік өткізгіштігі* пайда болады. Электронды өткізгіштікке қарағанда өткізгіштігі басым шалаөткізгіштер *p* типті шалаөткізгіштер деп аталады.

Қозғалатын және электр өткізгіштігін тудыратын электрондар мен тесіктер жылжымалы заряд тасымалдаушылар немесе жай заряд тасымалдаушылар деп

аталады. Жылудың әсерінен заряд тасымалдаушыларының жұптары пайда болады, яғни өткізгіш электрон- өткізгіш кемтік жұптары пайда болады. Тасымалдаушы жұптардың пайда болуы жарықтың, электр өрісінің, иондаушы сәулеленудің және т. б. әсерінен де пайда болуы мүмкін.

Электрондар мен өткізгіш кемтіктері хаотикалық жылу қозғалысын жасайтындығына байланысты, тасымалдаушы жұптардың кері генерациясы міндетті түрде жүреді. Өткізгіштік электрондар қайтадан валенттік аймақта бос орын алады, яғни кемтіктермен біріктіріледі. Тасымалдаушы жұптардың мұндай жоғалуы заряд тасымалдаушылардың *рекомбинациясы* деп аталады.

Тасымалдаушы жұптардың генерациясы мен рекомбинациясы процестері әрқашан бір уақытта жүреді. Рекомбинация тасымалдаушы жұптардың көбеюін шектейді және әр берілген температурада: белгілі бір электрондар мен өткізгіш тесіктер орнатылады, яғни олар динамикалық тепе-теңдік күйінде болады. Бұл дегеніміз, жаңа жұптар, тасымалдаушылар пайда болады және бұрын пайда болған жұптар рекомбинацияланады.

Шалаөткізгіш құрылғыларда негізінен донорлық немесе акцепторлық қоспалары бар *қоспалар* деп аталатын шалаөткізгіштер қолданылады. Мұндай жартылай өткізгіштерде қалыпты жұмыс температурасында барлық қоспалар атомдары қоспаның электр өткізгіштігін құруға қатысады, яғни әр атом, қоспалар бір электронды береді немесе алады.

Осы шалаөткізгіште басым болатын заряд тасымалдаушылар *негізгі* деп аталады. Олар  $n$  типті шалаөткізгіштегі электрондар және  $p$  типті шалаөткізгіштегі кемтіктер. Негізгі емес заряд тасымалдаушылар деп аталады, егер олардың концентрациясы негізгі тасымалдаушылардың концентрациясынан аз болса. Егер  $n_d \gg n_i$  болса, онда меншікті тасымалдаушылардың, яғни электрондардың шоғырлануын елемеуге болады, содан кейін  $n_n \ll n_d$  есептеуге болады.

Концентрациясы негізгі емес қоспа шалаөткізгіштерде біріншіден тасымалдаушылардың саны азаяды, екіншіден, концентрациясы негізгі тасымалдаушы сонша рет артады.

Сонымен, шалаөткізгіштерде зарядтардың екі түрі бар: *электрондар* мен кемтіктер. Сондықтан шалаөткізгіштер тек электронды ғана емес, сонымен қатар кемтік өткізгіштікке де ие. Мұндай жағдайларда өткізгіштік шалаөткізгіштердің *өзіндік өткізгіштігі* деп аталады, ал қоспасыз шалаөткізгіш  $i$  типті шалаөткізгіш деп аталады.

Шалаөткізгіш материалдардың электрлік белсенділігі температураға байланысты. Өте төмен температурада валенттілік электрондары коваленттік байланыс атомдарымен қатты байланысады. Бұл валенттілік электрондары ауытқуға қабілетсіз болғандықтан, материал электр тогын өткізе алмайды.

Шалаөткізгіштер температураның жоғарылауымен электр өткізгіштіктің жоғарылауымен сипатталады. Шалаөткізгіштер электр кедергісінің теріс температуралық коэффициентімен сипатталады. Температураның

жоғарылауымен Шалаөткізгіштердің кедергісі төмендейді және өткізгіштер сияқты жоғарыламайды. Көбінесе шалаөткізгіш белгілі бір электр өткізгіштігі бар, металдар мен жақсы диэлектриктер үшін оның мәндері арасындағы аралық зат ретінде анықталғанымен, электр өткізгіштігінің мәні заттың шалаөткізгіш қасиеттерінде шешуші рөл атқармайды.

Шалаөткізгіштің электр өткізгіштігіне температура ғана емес, сонымен қатар күшті электр өрісі, қысым, оптикалық және иондаушы сәулеленудің әсері, қоспалардың болуы және басқа факторлар әсер етеді. Бұл факторлар заттың құрылымын және электрондардың күйін өзгерте алады және жартылай өткізгіштерді көптеген және әртүрлі қолдануда шешуші рөл атқарады.

Германий және кремний сияқты таза шалаөткізгіш материалдар бөлме температурасында аз мөлшерде электронды немесе кемтіктерді ұстайды, сондықтан өте аз ток өткізеді. Сондықтан шалаөткізгіштер іс жүзінде қолданылмайды, өйткені олар бір жақты өткізгіштікті қамтамасыз етпейді.

Шалаөткізгіштердің негізгі зерттеулері таза материалға қоспалар қосудың әсерімен байланысты. Егер бұл қоспалар болмаса, онда шалаөткізгіш құрылғылардың көпшілігі болмас еді. Таза материалдардың өткізгіштігін арттыру үшін *легирлеу* деп аталатын процесс қолданылады.

Легирлеу - бұл шалаөткізгіш материалға қоспаларды қосу процесі. Қоспалардың екі түрі қолданылады. Біріншісі, метавалентті деп аталады, бес валентті электроны бар атомдардан тұрады. Мысалдар-мышьяк және сурьма. Екіншісі, тривалент деп аталады, үш валентті электроны бар атомдардан тұрады. Мысал ретінде индий мен галлий жатады.

Сондықтан шалаөткізгіш құрылғыларда техникалық қолдану қоспа жартылай өткізгіштерді алды. Қоспа жартылай өткізгіштердің маңызды ерекшелігі-оларда қоспалар болған кезде, өздерінің өткізгіштігімен қатар қосымша — қоспаның өткізгіштігі пайда болады. Қоспаның концентрациясын өзгерту арқылы сіз белгілі бір белгінің заряд тасымалдаушыларының санын айтарлықтай өзгерте аласыз. Осының арқасында теріс немесе оң зарядталған тасымалдаушылардың басым концентрациясы бар шалаөткізгіштерді жасауға болады. Шалаөткізгіштердің бұл ерекшелігі практикалық қолдануға кең мүмкіндіктер ашады.

### **1.1.2 Шалаөткізгіштердегі дрейфтік және диффузиялық токтар**

Электр тогы жартылай өткізгіште тек электр өрісінің әсерінен (дрейф) немесе заряд тасымалдаушылардың кристалл көлеміне біркелкі бөлінбеуі (диффузия) нәтижесінде пайда болатын заряд тасымалдаушылардың бағытталған қозғалысы кезінде пайда болуы мүмкін.

Егер электр өрісі болмаса және заряд тасымалдаушылар кристалда біркелкі концентрацияға ие болса, онда электрондар мен тесіктер үздіксіз хаотикалық жылу қозғалысын жасайды. Заряд тасымалдаушылардың бір-бірімен және кристалл торының атомдарымен соқтығысуы нәтижесінде олардың қозғалыс



жылдамдығы мен бағыты үнемі өзгеріп отырады, сондықтан кристалда ток болмайды.

Кристалға қолданылатын кернеудің әсерінен онда электр өрісі пайда болады; заряд тасымалдаушыларының қозғалысы реттеледі: электрондар оң электродқа, кемтіктер теріс электродқа қарай жылжиды. Бұл жағдайда заряд тасымалдаушылардың жылу қозғалысы тоқтамайды, нәтижесінде олардың шалаөткізгіш атомдарымен және қоспалармен соқтығысуы орын алады.

Электр өрісінің күштері әсерінен заряд тасымалдаушылардың бағытталған қозғалысы *дрейф* деп аталады, ал осы қозғалыс нәтижесінде пайда болған ток – дрейф тогы. Сонымен қатар, токтың сипаты электронды болуы мүмкін, егер ол электрондардың қозғалуынан туындаса немесе тесіктердің бағытталған қозғалысы нәтижесінде пайда болса.

Меншікті шалаөткізгіштерде электрондар мен кемтіктердің концентрациясы бірдей, бірақ олардың әртүрлі қозғалғыштығына байланысты токтың электронды компоненті кемтікке қарағанда үлкен. Аралас шалаөткізгіштерде электрондар мен кемтіктердің концентрациясы айтарлықтай ерекшеленеді, токтың сипаты негізгі заряд тасымалдаушыларымен анықталады: *p* типті шалаөткізгіштерде - кемтіктер, ал *n* типті жартылай өткізгіштерде – электрондар.

Заряд тасымалдаушыларының біркелкі емес концентрациясында олардың концентрациясы жоғары шалаөткізгіштің қабаттарында олардың бір-бірімен соқтығысу ықтималдығы жоғары. Хаотикалық жылу қозғалысын жасай отырып, заряд тасымалдаушылар соқтығысулар саны аз болатын жаққа ауытқиды, яғни олардың концентрациясын азайту бағытында қозғалады.

Заряд тасымалдаушылардың жоғары концентрациясы бар қабаттан концентрациясы төмен қабатқа бағытталған қозғалысы *диффузия* деп аталады, ал осы құбылыс тудырған ток *диффузиялық* ток деп аталады.

Бұл ток, дрейф сияқты, электронды немесе кемтіктік болуы мүмкін.

Жоғары концентрациясы бар қабаттан төмен концентрациясы бар қабатқа ауысатын электрондар тесіктермен рекомбинацияланады және керісінше, төмен концентрациясы бар қабатқа таралатын тесіктер электрондармен рекомбинацияланады. Бұл жағдайда заряд тасымалдаушылардың артық концентрациясы төмендейді.

Заряд тасымалдаушыларының шамадан тыс концентрациясы *e* есе азаятын қашықтық диффузиялық ұзындық деп аталады. Басқаша айтқанда, бұл заряд тасымалдаушысы өмір бойы қозғала алатын орташа қашықтық. Артық концентрацияның 2,7 есе қысқаратын уақыты, яғни бастапқы мәннің 0,37-ге тең болатын уақыт тепе-тең емес тасымалдаушылардың өмір сүру уақыты деп аталады. Бұл мән уақыт өте келе артық концентрацияның өзгеруімен сипатталады. Тепе-тең емес тасымалдаушылардың рекомбинациясы жартылай өткізгіштің ішінде және оның бетінде жүреді және қоспаларға, сондай-ақ бетінің күйіне байланысты болады.

Өткізгіштік тогы және диффузиялық ток, тасымалдаушы жұптардың пайда болуы және рекомбинация, уақыт пен кеңістіктегі тасымалдаушылардың шамадан тыс концентрациясының өзгеруі жартылай өткізгіштерде болатын күрделі құбылыстардың барлық түрлерін сарқылмайды, бірақ олар өте маңызды және оларды біле отырып, жартылай өткізгіш құрылғылардың жұмысын дұрыс түсінуге болады.

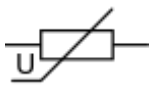
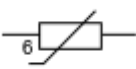
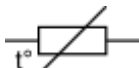
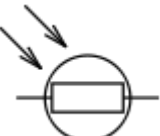
### 1.1.3 Шалаөткізгіш резисторлар

Жоғарыда айтылғандай, шалаөткізгіштер бірқатар ерекше электрофизикалық қасиеттері бар заттардың ерекше класы болып табылады. Шалаөткізгіш материалдар негізінде қазіргі заманғы радиоэлектрондық және ақпараттық жүйелердің элементтік базасы болып табылатын көптеген электронды құрылғылар жасалды. Шалаөткізгіштердің бірегей электрофизикалық қасиеттеріне негізделген қарапайым шалаөткізгіш құрылғылар сызықты емес *шалаөткізгіш резисторлар* болып табылады.

Шалаөткізгіш резисторлар температура, электромагниттік сәуле, қолданылатын кернеуге және басқа факторлардың әсерінен кедергісін өзгерту үшін шалаөткізгіштердің қасиеттеріне негізделген құрылғылар.

Шалаөткізгіш құрылғы шалаөткізгіштің электр кедергісінің температураға, жарыққа, кернеуге және басқа параметрлерге тәуелділігін пайдаланатын қоспалармен және екі терминалмен біркелкі легирленген шалаөткізгіш құрылғы шалаөткізгіш резистор деп аталады. Қоспалардың түріне тәуелділікті ескере отырып, сыртқы әсерге қарсылықтың әртүрлі тәуелділіктерін алуға болады. 1.1-суретте шалаөткізгіш резисторлардың жіктелуі мен шартты белгілері көрсетілген.

Осы классификацияға сәйкес шалаөткізгіш резисторлардың алғашқы екі тобы — сызықты резисторлар мен варисторлар — сыртқы факторларға байланысты электрлік сипаттамаларға ие: қоршаған орта температурасы, діріл, ылғалдылық, жарық және т. б.

Резисторлардың түрі	Шартты белгілері
Варистор	
Тензорезисторлар	
Терморезисторлар	
Фоторезисторлар	

1.1 сурет - Шалаөткізгіш резисторлардың жіктелуі және шартты белгілері

Шалаөткізгіш резисторлардың басқа топтары үшін, керісінше, олардың электрлік сипаттамаларының сыртқы факторларға қатты тәуелділігі тән. Сонымен, термисторлардың сипаттамалары температураға, фоторезисторлардың сипаттамаларына — жарыққа, тензорезисторлардың сипаттамаларына — механикалық кернеулерге байланысты.

Сызықтық резистор бұл кремний немесе галлий арсениді сияқты әлсіз легіріленген материалды қолданатын шалаөткізгіш резистор. Оның электрлік кедергісі электр өрісінің күші мен электр тогының тығыздығына байланысты емес. Сондықтан сызықтық шалаөткізгіш резистордың кедергісі үлкен кернеу мен ток диапазонында тұрақты болып келеді және олар интегралды сұлбаларда кеңінен қолданылады.

Варистор шалаөткізгіш резистор, оның кедергісі қолданылатын кернеуге байланысты. Сызықты емес вольт-амперлік сипаттамасы бар. Кремний карбидінен жасалған. Варисторлар инерциясыз. Төмен қуатты кернеу тұрақтандырғыштарында, күшейту және өткізу қабілетін автоматты реттеу тізбектерінде, сондай-ақ кадрлық және кіші сканерлеу параметрлерін тұрақтандыру үшін мониторларда қолданылады.

Терморезистор - шалаөткізгіш резистор, оның жұмыс принципі шалаөткізгіштің электр кедергісінің температураға тәуелділігін пайдалануға негізделген.

Термистордың екі түрі қолданылады: *термистор* – оның кедергісі температурасы жоғарыласа төмендейді, ал *позисторда* температура төмендесе оның кедергісі артады.

Термисторлар кеңінен т. б. температура бақылау жүйелерінде, жылу қорғау, өрт дабыл, электрондық құрылғы режимін тұрақтандыру үшін пайдаланылады

Фоторезистор шалаөткізгіш резистор, оның кедергісі жарыққа байланысты.

Тензорезистор кедергінің механикалық деформацияларға тәуелділігін пайдаланатын шалаөткізгіш резистор.

Шалаөткізгіш резисторлардың ең көп таралған үш түрін қарастырайық.

Термистор бұл шалаөткізгіш сызықты емес резистор, оның кедергісі температура өзгерген кезде айтарлықтай өзгереді. Термистор моншак, диск, цилиндрлік өзек, жалпақ жуғыш түрінде жасалады. Кейбір конструкцияларда термисторды металл немесе шыны герметикалық цилиндрге салу қарастырылған. Теріс температуралық қарсылық коэффициенті бар термисторлар термисторлар деп аталады. Олар әртүрлі мақсаттағы электронды жабдықта кеңінен қолданылады.

Термисторлардың маңызды параметрлеріне мыналар жатады: суық кедергі – қоршаған ортаның температурасы  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  кезіндегі термистордың кедергісі; температура  $1^{\circ}\text{C}$  өзгерген кезде термистордың кедергісінің өзгеруін пайызбен білдіретін ТКС кедергісінің температуралық коэффициенті; ең жоғары жұмыс температурасы - термистордың сипаттамалары белгіленген қызмет ету мерзімі ішінде тұрақты болып қалатын температура; ең көп бөлінетін қуат-ағымдағы ағым кезінде термистор максималды жұмыс температурасына дейін қызатын қуат; жылу сыйымдылығы  $H$  – термистор температурасын  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  – қа көтеру үшін қажетті жылу мөлшері; шашырау коэффициенті  $b$  – термистор мен қоршаған орта температурасының  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  айырмашылығы кезінде термистор тарататын қуат; уақыт тұрақтысы  $\tau$ - $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  температурасы бар ортадан  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  температурасы бар ортаға ауысқан кезде термистор температурасы  $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ -қа тең болатын уақыт.

Шалаөткізгіш термисторлар көбінесе термисторлар деп аталады.

Термисторлардың материалдары мен негізгі сипаттамалары. Термисторлар-бұл өтпелі металдардың аралас оксидтері негізінде жасалған кедергі термометрлері.

Термисторлардың екі негізгі түрі бар – теріс температуралық қарсылық коэффициенті (NTC) және оң (PTC). Ең көп таралған түрі – NTC. PTC термисторлары тек өте тар температура диапазонында (бірнеше градус), негізінен дабыл және бақылау жүйелерінде қолданылады. Оң TCS термисторларын әдетте позисторлар деп атайды.

Теріс ТКС термисторларының сезімтал элементтерінің материалдары ретінде монокристалды (германий, кремний, индий антимониді және т.б.) және поликристалды материалдар қолданылады.

Термисторлардың көпшілігі түйіршіктелген оксидтер мен металл нитридтерінен жасалған керамикалық жартылай өткізгіштер.

$250\text{ }^{\circ}\text{C}$ -тан төмен температурада ең тұрақты термисторлар - теріс ТКС бар аралас магний және никель немесе магний, никель және кобальт оксидтеріне негізделген термисторлар. Термистордың нақты өткізгіштігі  $r$  ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) химиялық құрамы мен тотығу күйіне байланысты. Өткізгіштіктің қосымша бақылауы  $Li$  және  $Na$  сияқты металдардың өте аз концентрациясын қосу арқылы жүзеге

асырылады. Бұл металдардың оксидтерінің қоспалары айқын жартылай өткізгіш қасиеттерге ие. 1.1 және 1.2 кестелерде кейбір ресейлік және шетелдік термисторлардың сипаттамалары келтірілген.

1.1 кесте - Кейбір ресейлік термисторлардың сипаттамалары

Типі	20 °С-қа тең кезіндегі $R_0$ шектік мәндері	Берілген ауытқуы $\Delta R/R_0\%$	20 °С-қа тең кезіндегі $R_0$ ТКС	$\tau$ , с	Жұмыс істеу температура диапазоны
КМТ-1	22...1000	20	4,2...8,4	35	-60...+180
СТ-17	0,3...22	10, 20	-	30	-60...+100
СТ-18	0,033...0,33	-	-	-	-60...+300
СТ-19	2,2...15	20	-	-	-100...+125

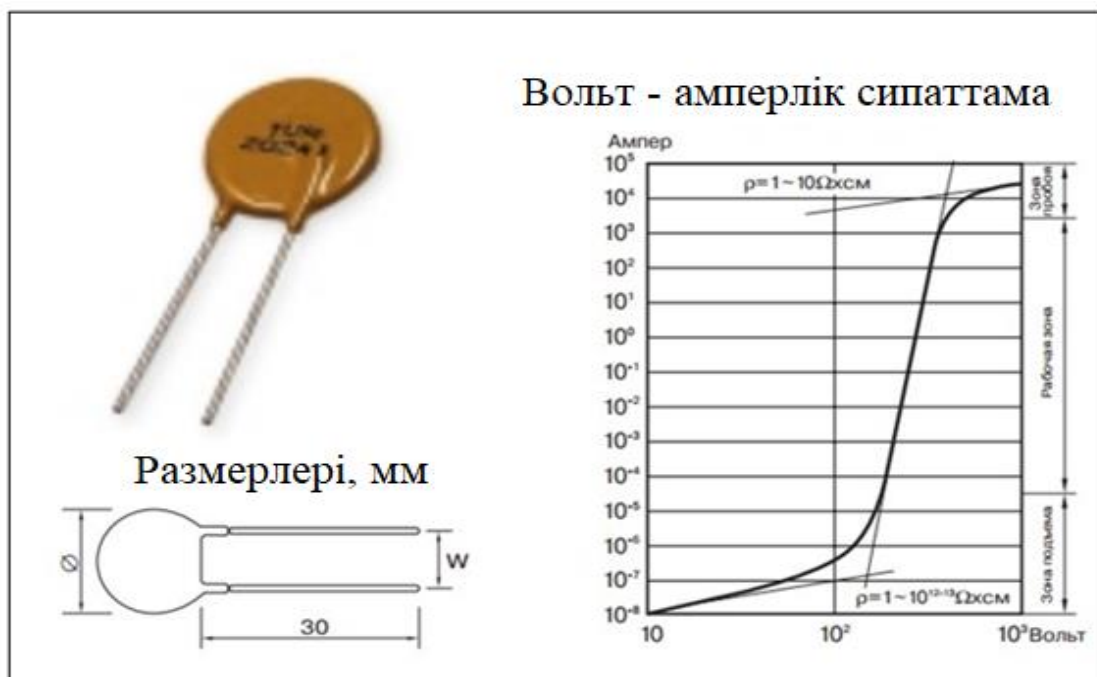
1.2 кесте - Кейбір шетелдік термисторлардың сипаттамалары

Типі	20 °С-қа тең кезіндегі $R_0$ шектік мәндері	Берілген ауытқуы	B25/85, К	$\tau$ , с	Жұмыс істеу температура диапазоны
КМТ-1		$\pm 1,3, 5\%$	3100	15	-60...+90
СТ-17		$\pm 1,3, 5\%$	3435	15	-50...+110
СТ-18		$\pm 1,3, 5\%$	3950	15	-60...+110
СТ-19		$\pm 1,3, 5\%$	3950	15	-100...+125

Өнеркәсіптік электроника құрылғыларында термисторлар температураны өлшеу және реттеу, температураның кең диапазонында жұмыс істейтін электр тізбектерінің әртүрлі элементтерін термокомпенсациялау, айнымалы және тұрақты ток тізбектеріндегі кернеуді тұрақтандыру, сондай-ақ автоматика тізбектеріндегі реттелетін контактісіз резисторлар үшін кеңінен қолданылады.

Бірқатар арнайы құрылғыларда екі термистордан тұратын жартылай өткізгіш болометрлер қолданылады. Термисторлардың бірі (актив) тікелей бақыланатын факторға (сәулелену температурасына) ұшырайды, ал екіншісі (өтемақы) қоршаған орта температурасының әсерін өтеу үшін қызмет етеді.

Варистор-жартылай өткізгіш резистор, оның кедергісі қолданылатын кернеуге байланысты. Варистордың вольт-амперлік сипаттамасының шамамен көрінісі 1.2 - суретте көрсетілген. Сипаттаманың симметриясы варисторды тұрақты және айнымалы ток тізбектерінде қолдануға мүмкіндік береді.



1.2 сурет - Варистордың вольт-амперлік сипаттамасы

Варисторлардың негізгі параметрлеріне мыналар жатады: кернеу мен токтың тұрақты мәндеріндегі статикалық қарсы тұру  $R_{ст} = U / I$ ;

Айнымалы токқа динамикалық кедергі  $R_D = \Delta U / \Delta I$ ; сызықтық емес коэффициент-берілген нүктедегі статикалық кедергінің динамикалыққа қатынасы  $\rho = R_{ст} / R_D$ ; импульстік кернеудің ең үлкен амплитудасы және рұқсат етілген диффузиялық қуат.

Өнеркәсіптік электроника тізбектерінде варисторлар электр шамаларын реттеуге қолданады, токтар мен кернеулерді тұрақтандыру және құрылғылар мен тізбек элементтерін шамадан тыс кернеуден қорғау үшін қолданылады.

Фоторезистор шалаөткізгіш құрылғы деп аталады (1.3 сурет), электр кедергісі көрінетін электромагниттік сәулеленудің, сондай-ақ спектрдің инфрақызыл және ультракүлгін бөліктерінің әсерінен өзгереді.

Фоторезисторларды өндіруге арналған материал әдетте қорғасын мен кадмий сульфидтері мен селенидтері болып табылады. Жартылай өткізгіштің жарық сезгіш өткізгіш қабаты металл электродтары бар шыны пластинаға жағылады және фотостекл терезесі бар пластмасса немесе металл корпусқа салынады.

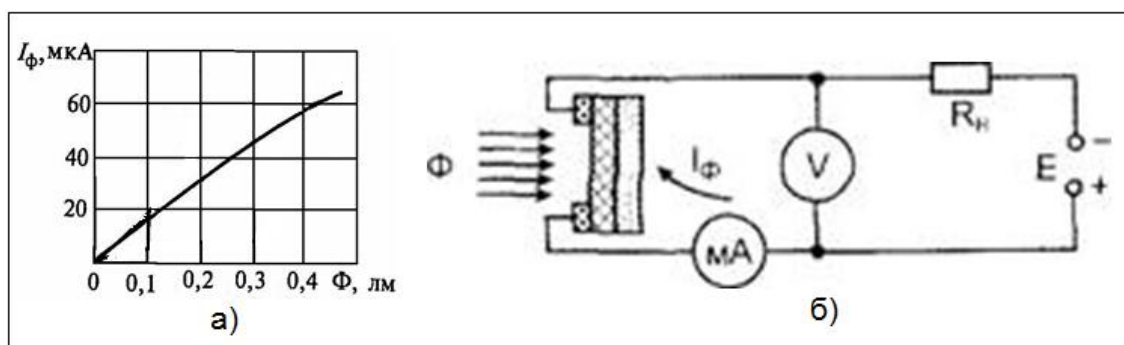


1.3 сурет - Фоторезистордың құрлысы

Жарық ағыны болмаған кезде қараңғы  $R_{темн}$  деп аталатын фоторезистордың кедергісі өте үлкен ( $R_{темн} \rightarrow \infty$  алғашқы жуықтауында), ал сұлбаға енгізілген фоторезистор арқылы Кіші қараңғы  $I_{тем}$  тогы өтеді. Жарық ағынының әсерінен фоторезистордың кедергісі төмендейді және ол арқылы  $I_{св}$  жарық тогы өтеді. Жарық пен қараңғы токтардың арасындағы айырмашылық өткізгіштіктің бастапқы фототүсірілімі деп аталады:  $I_{\phi} = I_{темн} - I_{св}$ .

Жарық ағынының жоғарылауымен өткізгіштік электрондарының бір бөлігі атомдармен соқтығысады, оларды иондайды және қосымша электрондар ағынын жасайды – қайталама өткізгіштік фототүсірілім деп аталады.

Фоторезистордың түрі мен жұмыс режимін таңдау үшін бірқатар сипаттамалар қолданылады: вольтамперлік сипаттама-тұрақты жарық ағыны кезінде қолданылатын кернеуге фототок (немесе күңгірт ток) тәуелділігі; Жарық сипаттамасы-фототок тұрақты спектрлік құрамның түсетін жарық ағынына тәуелділігі;  $I_U$  спектрлік сипаттама-фоторезистор сезімталдығының толқын ұзындығына тәуелділігі.



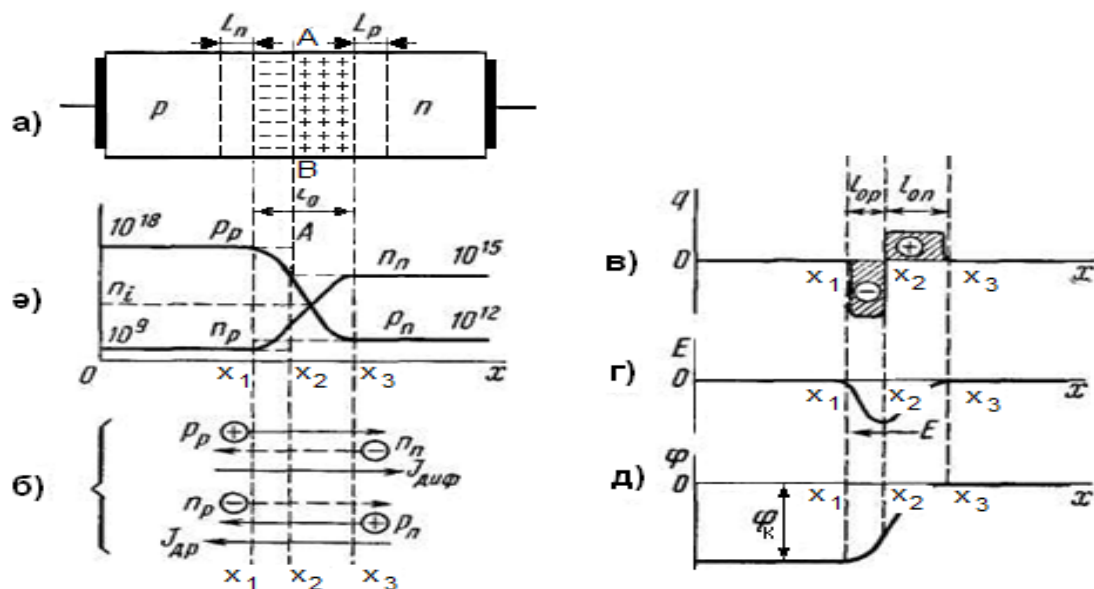
а-жарық сипаттамасы; б-фоторезисторды тұрақты ток тізбегіне қосу  
1.4 сурет

Фоторезисторлардың негізгі параметрлері бұрын көрсетілген қараңғы кедергімен, күңгірт және жарық токтарымен қатар жұмыс кернеуі – бүкіл өмір бойы фоторезистордың басқа параметрлерінің өзгеруіне әкелмейтін мүмкін болатын ең жоғары кернеу және рұқсат етілген шашырау қуаты – фоторезисторға зақым келтірместен таратылатын максималды қуат, сондай-ақ басқа да параметрлер.

Бүгінгі таңда фоторезисторлар ғылым мен техниканың көптеген салаларында кеңінен қолданылады. Бұл олардың жоғары сезімталдығына, дизайнның қарапайымдылығына, кішкентай өлшемдеріне және айтарлықтай рұқсат етілген шашырау қуатына байланысты. Оптоэлектроникада фоторезисторларды қолдану үлкен қызығушылық тудырады. Өнеркәсіптік электроникада фоторезисторлар бақылау және автоматика құрылғыларында, тұрмыстағы Автоматты және фотореледе, күзет жүйелерінде Жарық датчиктері ретінде қолданылады.

### 1.1.4 *p-n* ауысуының құрылымын жасау және оның қасиеттері

Көптеген шалаөткізгіштік аспаптардың негізі элементі болып, шалаөткізгіштің әр текті екі обылысының арасындағы ауыспалы екі қабаттан тұратын қабық - *электронды-кемтіктік ауысуы* болып келеді. Мысалы германиден және кремниден тұратын диодтар монокристалдың бір қабатында акцепторлық қоспа енгізілген, ал монокристалдың екінші қабатында донырлық қоспа енгізілген екі қабатты әр текті электронды-кемтіктік (*p-n*) - құрылымнан тұрады (1.5, а сурет).



1.5 сурет. *p-n*- құрылымды шалаөткізгіште симметриялы емес тіке *p-n* – ауысуының жасалуы



Егер акцептор мен донорлардың температуралары бөлменің температурасындай болса, онда олар толығымен ионизацияланады деп есептеуге болады. Бұндай жағдайларда акцепторлардың барлық атомдары өздеріне электрондарды қосып алады да, кемтіктер пайда болады. Ал донорларда атомдар өздерінің басы бос электрондарын еркіндіке жібереді. Сонымен қатар, әр қабатта меншікті заряд тасымалдауыштардан басқа, негізгі материалдың электрондарының валенттік аймақтан өткізгіш аймаққа ауысуынан болатын меншікті емес заряд тасымалдауыштары да бар.

Практика жүзінде, енгізілген акцепторлық  $N_a$  және донорлық  $N_d$  қоспалардың өз ара бірдей емес концентрациялары бар  $p-n$  - құрылымы ең көп тараған. Басқаша айтқанда  $p-n$  - құрылымының қабаттарында негізгі заряд тасымалдауыштардың концентрациялары  $n_n \approx N_d$  және  $p_p \approx N_a$  болып келеді де, бырақ олар өз ара бірдей емес. Көбінесе  $p-n$  - құрылымында концентрациялардың өзара  $N_a \gg N_d$  ( $p_p \gg n_n$ ) болуы типтік болып саналады.

Бұндай жағдайда  $p-n$  – ауысуын симметриялы емес немесе сызықты емес кедергілі деп атайды. Бұған мысал ретінде 1.5, ә-суретте, германиден жасалған  $p-n$  – құрылымыдарының  $x$  - осі бойынша заряд тасымалдауыштардың концентрациясының таратылуы графигі көрсетілген. Бұнда берілгені: негізгі заряд тасымалдауыштардың концентрациясы  $p_p = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ; Шалаөткізгіштің температурасы бөлменің температурасындай болғандағы меншікті заряд тасымалдауыштың концентрациясы  $n_i = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; негізгі емес заряд тасымалдауыштардың концентрациясы  $n_p = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; Сонымен 1.5,а суретте көрсеткедей,  $p-n$  - құрылымында  $p$ -текті және  $n$ -текті шалаөткізгіштерін өзара түйістіргенде, екеуінің арасында  $p-n$  ауысуы пайда болады да,  $p$ - обласы және  $n$ - обласы деген екі түсінік енгізіледі. Жеке алғанда  $p$ - обласы болсын,  $n$  – обласы болсын, электр зарядтары жағынан өзара бейтарап келеді. Яғни  $p$ -обласында оң зарядталған кемтіктері толығымен теріс акцептор иондарымен бейтараптанған, ал  $n$ -обласында теріс зарядты электрондар оң зарядты донор иондармен бейтараптанған. Бір айта кететін жағдай, осы  $p$ -обласында оң зарядталған кемтіктерді жеке бөліп алған жағдайда, олардың орнында қозғалмайтын теріс акцептор иондары қалар еді. Осыған сәйкес  $n$ -обласында жылжымалы электрондар кететін болса, олардың орнында қозғалмайтын оң зарядты донор иондары қалар еді. Осындай бейтарап жартылай өткізгіштерді өзара түйістірген кезде,  $p-n$  - құрылымында қабаттардың АВ айырығында бір текті заряд тасымалдауыштарының концентрацияларының айырымы пайда болады (1.5, б сурет). Олар бір обласыста негізгі заряд тасымалдауыштар болса, екіншісінде - негізгі емес заряд тасымалдауыштар болып шығады. Түйіспеге іргелес облыстарда заряд тасымалдауыштарының концентрацияларының айырымының әсерімен негізгі заряд тасымалдауыштардың шекараның айырығы арқылы қарама-қарсы диффузиялық қозғалысы басталады, яғни диффузиялық ток жүре бастайды (1.5, б сурет). Суреттен көріп отырғанымыздай,  $p$ -

обылысының кемтіктері  $n$ -обылысына диффузиялық қозғалыспен ауысады, ал  $n$ -обылысының электрондары диффузиялық қозғалыспен  $p$ -обылысына ауысады.  $n$ -обылысына өткен кемтіктер осы обылыстың электрондарымен рекомбинация жасайды,  $p$ -обылысына өткен электрондар осы обылыстың кемтіктерімен рекомбинация жасайды. Сонымен осындай бейтарап жартылай өткізгіштерді өзара түйістірген кезде, ондағы жылжымалы заряд бөлшектері бір обылыстан екінші обылысқа ауысып (қысымы үлкен ауаның қысымы аз жаққа ауысқаны секілді), *диффузия тогын* тудырып, түйіспе маңында жылжымайтын қоспа иондарын қалдырады (1.5, а сурет). Суреттен көріп отырғанымыздай, оң зарядтар оң жақта, ал теріс зарядтар сол жақта (жылжитыны бар, жылжымайтыны бар) жиналып, конденсатор құрылысына ұқсас құрылым туғызады. Осы  $p$ - $n$  ауысуының айырым шекарасы арқылы өтетін заряд тасымалдаушыларының диффузиялық қозғаластарының болуының *өте маңызды нәтижесі, түйіспе маңында жылжымайтын қоспа иондарының құрыуымен көлемдік зарядтардың пайда болуы*. Көлемдік зарядтардың бар болуы  $p$ - $n$  ауысуының басты айырмашылығы. Зарядтардың бұлай іркіле жиналуы ішкі  $E$  электр өрісін, туғызады да (1.5, г сурет), ол жылжымалы зарядтарды кері айдайды. Осындай процестен, яғни ішкі электр өрісінің әсерімен пайда болған ток *дрейф тогы* деп аталады. Егер сырттан кернеу түсірілмейтін болса, онда дрейф ток мен диффузия ток тепе-теңдікте болып, жалпы ток нөлге тең болады, бұл 1.5, в-суретте көрсетілген. Жалпы алғанда,  $p$ - $n$  ауысуы жылжымалы зарядтарынан айрылған, қозғалыссыз иондардан тұратын орталық бөлік. Оның ұзындығы 1.5, ә-суретте көрсетілгендей  $L_0$ -ге тең болады. Зарядтардың екі жаққа бөліне жиналуынан потенциалдар айырымы туады. Оның диаграммасы 1.5, в-суретте көрсетілген. Потенциалдар айырымы  $\varphi_0$ -ге тең де, *түйісу потенциалдар айырымы* немесе *биіктігі* деп аталады. Потенциал диаграммасы кішігірім асуға ұқсас келеді де, оның биіктігі негізгі заряд бөлшектерінің диффузиялық қозғалысына тосқауыл ретінде әсер етеді. Сондықтан да  $p$ - $n$  түйісуін  $p$ - $n$  асуы деп атауы содан. Түйісу потенциалдар айырымы мынандай ара қатынаспен анықталады:

$$\varphi_k = \varphi_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{n_n}{n_p}. \quad (1.1)$$

Бұнда:

$\varphi_T = kT/e$  – температуралық потенциал;

$k$  – Больцман тұрақтысы;

$T$  – температура;

$e$  – электрон заряды;

$N_a$  мен  $N_d$  – акцепторлар мен донорлардың концентрациясы;

$p_p$  мен  $p_n$  -  $p$  және  $n$  обылыстарындағы кемтіктердің концентрациялары;

$n_n$  және  $n_p$  -  $p$  және  $n$  обылыстарындағы электрондардың концентрациялары;

$n_i$  - меншікті концентрация.

Шалаөткізгіштің температурасы бөлме температурасына тең болса, онда германи үшін  $\varphi_k = 0,3 \div 0,5$  В; кремний үшін  $\varphi_k = 0,6 \div 0,8$  В.  $\varphi_0$  мәндерінің айырмашылығы кремнидің  $\Delta W_T$  тиым салу аймағының мәні германиге қарағанда үлкендігіне байланысты болып отыр.

$p-n$  - құрылымды шалаөткізгіште симметриялы емес тіке  $p-n$  – ауысының қалыңдығын келесі өрнектің көмегімен анықтауға болады:

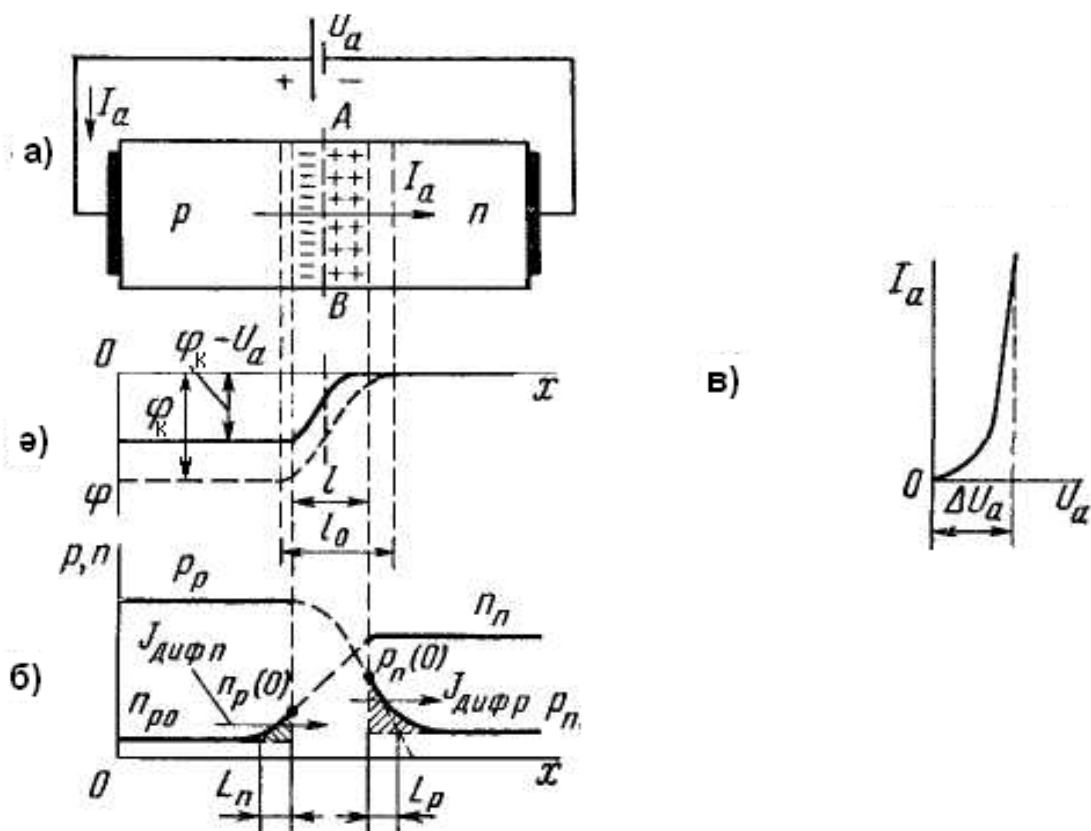
$$\Delta = \sqrt{\frac{2\varphi_k \varepsilon \varepsilon_0}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}, \quad (1.2)$$

Бұнда:

$\varepsilon$  – салыстырмалы диэлектриктік өткірлігі;

$\varepsilon_0$  – бос кеңістіктің диэлектриктік өткірлігі.

Енді жоғарыда көрсетілген  $p-n$  ауысуын электродтар арқылы ток көзіне тура бағытта қосып көрелік. Яғни ток көзінің оң полюсін электрод арқылы  $p$  жартылай өткізгішіне, ал сол полюсін электрод арқылы  $n$  шалаөткізгішіне жалғайық (1.6, а сурет). Бұндай бағытпен ток көзіне қосылған жағдайда, ток көзінің әсерімен болатын электр өрісінің бағыты ішкі электр өрісінің бағытына қарама-қарсы болады да,  $p-n$  ауысуында қорытынды электр өрісінің азайуына себепші болады.

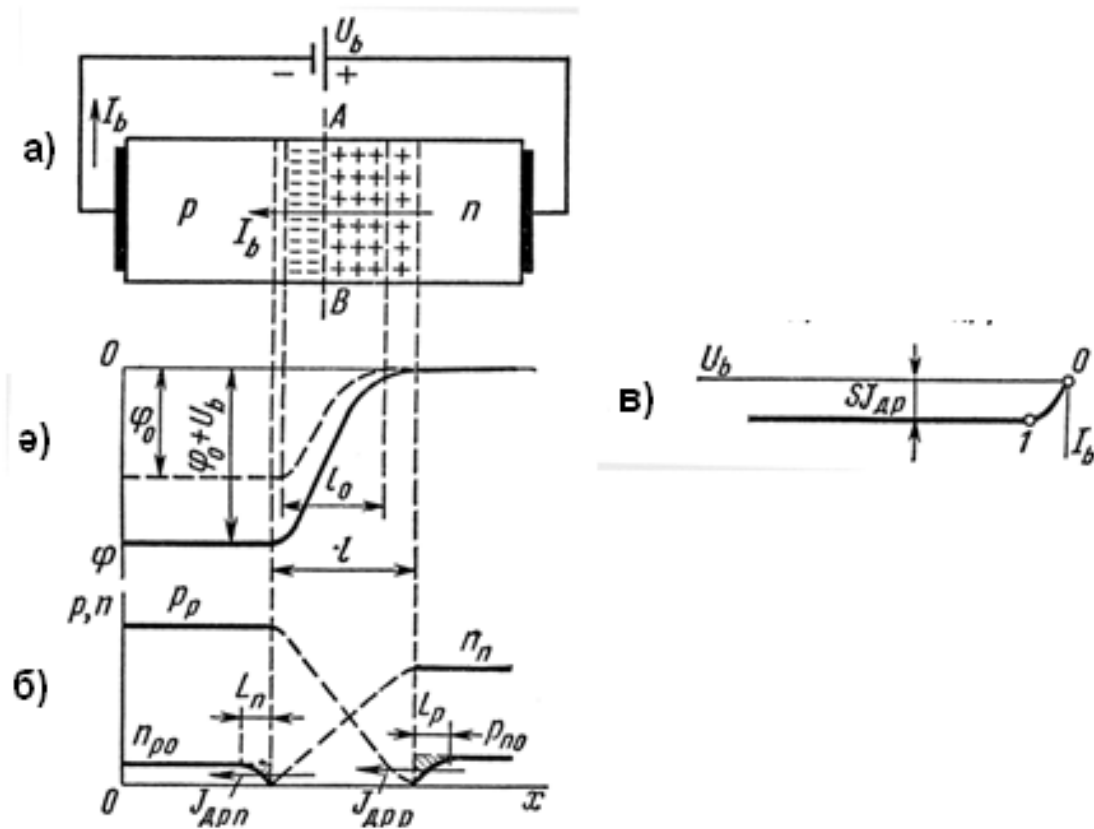


1.6 сурет -  $p$ - $n$  ауысуың сыртқы ток көзіне тура бағытта қосылуы кезеңі

Айырым шекарасының екі жағында шоғырланып орналасқан оң және теріс зарядталған көлемдік зарядтардың мөлшері, енді тек қана  $\varphi_k$  шамасымен анықталмайды, оған қоса сыртқы  $U_a$  кернеуімен де анықталады. Егер  $p$ -және  $n$  құрылымының бойына түсетін кернеудің шамасын ескермесек, онда  $p$ - $n$  ауысуындағы көлемдік зарядтардың мөлшері  $\varphi_k - U_a$  кернеуілерінің айырымына тәуелді болады. Неғұрлым бұл айырымның шамасы аз болса, соғырлым  $p$ - $n$  ауысуында оң және теріс зарядталған көлемдік зарядтардың мөлшері азая түседі. Басқаша айытқанда  $\varphi_k - U_a$  кернеуілерінің айырымының шамасы  $p$ - $n$  ауысуының потенциалдық барьернің биіктігін анықтайды. Оң және теріс зарядталған көлемдік түсетін болса, оған сәйкес  $p$ - $n$  ауысуының потенциалдық барьернің зарядтардың мөлшері азая, биіктігі де азаяды да,  $p$ - $n$  ауысуының енінің тарылыуына әкеледі.  $p$ - $n$  ауысуының енінің тарылыуы негізінде жоғарғы оңды  $n$ -қабығын әсерімен болады.  $p$ - $n$  ауысуының потенциалдық барьернің биіктігінің азайуы диффузияның әсерімен негізгі заряд тасымалдаушыларының айырымның шекарасы арқылы көрші обылыстарға өтулерін жеңілдетеді де,  $p$ - $n$  ауысуының бойынан диффузия тогын үлкейтеді. Бұл айтқан құбылыс  $p$ - $n$  ауысуының бойынан заряд тасымалдауыштардың инжекциясы деп аталады. Сонымен бірге, негізгі емес заряд тасымалдаушыларының құрылатын дрейф тогы айырымның шекарасы арқылы  $p$ - $n$  - ауысуының бойынан өткенде шамасы өзгерісіз

болады. Диффузиялық ток пен дрейф тогының айырмасы  $p-n$  - ауысуының бойынан өтетін нәтижелік тура токтың шамасын анықтайды

Сыртқы кернеудің шамасын көтеретін болсақ онда диффузиялық токтың да шамасы көтеріледі де, оларға сәйкес  $p-n$  - ауысуының бойынан өтетін тура токтың шамасы да ұлғаяды. Тура токтың сырыттан берілетін кернеуге тәуелділігі  $p-n$  - ауысуының вольт-амперлік сипаттамасы деп аталады. 1.6, в-суретте сондай сипаттаманың тура тармағы көрсетілген. Кернеудің,  $p-n$  - ауысуына түсу бағытын қарама-қарсыға ауыстыратын болсақ, яғни ток көзінің сол полюсін электрод арқылы  $n$  жартылай өткізгішіне жалғайық, ал ток көзінің оң полюсін электрод арқылы  $p$  жартылай өткізгішіне жалғайық (1.7, а сурет). Бұндай жалғауды  $p-n$  ауысуының кері бағытта қосылуы деп айтамыз.



а) жалғау сұлбасы; б) потенциал асуының графигі; в) заряд тасымалдаушыларының концентрациясының таратылу графигі; г) вольт-амперлік сипаттамасының кері тармағы.

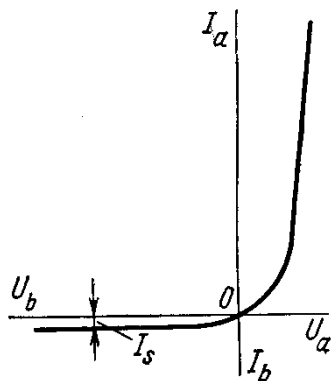
1.7 сурет -  $p-n$  - ауысуының кері бағытта қосылуы

$p-n$  ауысуын сыртқы ток көзіне кері бағытта қосылғанда, оның потенциал асуының биіктігі сырттан түсірілген  $U_b$  кернеу шамасына артады (яғни  $\varphi = \varphi_0 + U_b$ ). Сырттан түсірілген кернеудің әсерінен  $p$  аймағындағы кемтіктер ток көзінің сол жақ полюсіне тартылып, өз орындарында қосымша теріс акцептор иондарын қалдырады. Осыған

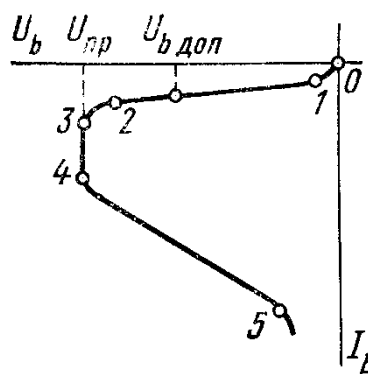
орай  $n$  аймағында донор иондары пайда болып, көлемдік зарядтар үлкейіп,  $p$ - $n$  ауысуы кеңіп, оның ұзындығы арта түседі. Потенциал асуының биіктігінің жоғарлауы  $p$ - $n$  ауысуы арқылы өтетін негізгі заряд тасушыларының диффузиялық қозғалысын одан сайын қиындата түседі. Негізгі емес заряд тасушыларының  $p$ - $n$  ауысуының екі жағынынан шоғырланып жиналған концентрациясының әсерімен болатын дрейфтік токтың шамасын тұрақты деп санауға болады. Бірақ бұл токтың шамасы диффузиялық токтың шамасынан көп болады.  $p$ - $n$  ауысуының вольт-амперлік сипаттамасының кері тармағы 1.7-суретте көрсетілген. Кері кернеудің шамасы азғантай болса ( $0 - 1$  участок) кері токтың ұлғайуына оның құрамындағы диффузиялық токтың азаюы себепші. 1 нүктеге сәйкес келетін және оданда жоғары участкаға сәйкес келетін кер кернеу шамаларында, негізгі заряд тасымалдауыштар потенциал асуын өтіп кетуге шамалыры жоқ болады да, осыған байланысты диффузиялық ток нөлге тең. Осыған байланысты кері кернеудің шамасын көтергенде кері токтың шамасы өзгермейді. Сонымен, қорытындылай келгенде,  $p$ - $n$  ауысуы кері қосылуда ток өткізбейді де, ал тура қосылуда токқа кедергі жасамайды.

### 1.1.5 Реалдық $p$ - $n$ ауысуының қасиеттері

1.8-суретте  $p$ - $n$  ауысуының толық вольт-амперлік сипаттамасы көрсетілген. Бұл сипаттаманың идеалды  $p$ - $n$  ауысуының вольт-амперлік сипаттамасынан айырмашылығы ауысудың бойынан тура және кері токтар өткенде оның үстіне кернеудің түсіп, шығынға ұшырауы болып табылады.



1.8 сурет -  $p$ - $n$  ауысуының толық вольт-амперлік сипаттамасы



1.9 сурет -  $p$ - $n$  ауысуының реалдық вольт-амперлік сипаттамасының кері тармағының түрі

$p$ - $n$  ауысуының толық вольт-амперлік сипаттамасын бейнелеп түсіндіру үшін келесі өрнекті қолдануға болады:

$$I_a = I_s (e^{U/\varphi_T} - 1), \quad (1.5)$$

мұнда:

$I_s = sJ_{др}$  — меншікті емес зарядтардың әсерінен болатын қанықпа тогы (жылу тогы);  $\varphi_T$  — жылу потенциалы.

Егер  $U = 0$  болса, онда (1.5) өрнек бойынша  $I_a = 0$ .  $p$ - $n$  ауысуына тура кернеу берсек ( $U = U_a > 0$ ), онда (1.5) өрнектегі бір санын есептемеуге болады да  $I_a(U_a)$ , вольт-амперлік сипаттамасы экспоненциальды заң бойынша өзгереді. Ал кері кернеу берсек ( $U = U_b < 0$ ), онда  $e^{-U/\varphi_T}$  шамасын өте аз деп ескермеуге болады да, тоқты келесі өрнекке тең деп алуға болады:

$I_a = I_b = -I_s$ .  $p$ - $n$  ауысуын ток көзіне тура бағытта қосқанда, оның реалдық вольт-амперлік сипаттамасының тура тармағына (әсіресе үлкен токтардың шамалары болғанда)  $p$ - $n$  құрылымының қабықтарының көлемдік заряды әсер етеді. Яғни  $p$ - $n$  ауысуының тура бағытта қосқанда, оның бойында  $\Delta U_a$  —ға тең кернеу шығыны болады. Кремниден жасалған шалаөткізгіштің  $p$ - $n$  ауысуының бойындағы кернеу шығыны, германиден жасалған шалаөткізгіштің  $p$ - $n$  ауысуының бойындағы шығынға қарағанда көптеу, өйткені кремнидің электрөткізгіштігі германиге қарағанда аздау. Мысалы бойына тура ток жүргенде, кремниде  $\Delta U_a = 0,8 \div 1,2$  В, ал германиде  $\Delta U_a = 0,3 \div 0,6$  В.

Сонымен қатар  $p$ - $n$  ауысуын ток көзіне кері бағытта қосқанда, оның реалдық вольт-амперлік сипаттамасының кері тармағына  $p$ - $n$  ауысуының беті арқылы ағатын ақпа ток және тасымалдаушы зарядтардың өзара генерация жасаулары қатты әсер етеді. Бұл екі құбылыс бойында тесіп өтіп кету процесін туғызады. Осы екі факторлардың әсерінен,  $p$ - $n$  ауысуын ток көзіне кері бағытта қосқанда, оның реалдық вольт-амперлік сипаттамасының кері тармағының түрі 1.9-суретте көрсеткендей болады. Ақпа ток  $U_b$  кернеуімен сызықты байланыста болып келеді. Бұл ток  $p$ - $n$  ауысуының сырытқы бетінің лас болуының кесірінен,  $p$ - $n$  ауысуының электрөткізгіштігін жоғарылатады да, кері токтың шамасын ұлғайтады. Кері токтың бұл құрамы вольт-амперлік сипаттамасының кері тармағында 1-2 нүкте арқылы көлбеумен белгіленген.

Тасымалдаушы зарядтардың өзара генерация жасауларының әсері берілетін кері кернеудің шамасын үлкейткенде байқауға болады. Алғашқыда бұл құбылыстың әсері кері токтың  $U_b$  кернеуімен сызықты емес байланыста болуына себепші болады (2 – 3 участок). Ал содан кейін бұл құбылыс  $p$ - $n$  ауысуын ойып тесілуіне себепші болатын, кері токтың лез үлкеюіне (3 – 4 – 5 участок) әкеліп ұрындырады.

$p$ - $n$  ауысуында қосымша заряд тасымалдаушы бөлшектердің пайда болуына әртүрлі себептер бар болғандықтан, *электрлік тесіп өту және жылылық тесіп өту* деп екіге бөлінеді. Электрлік тесіп өту құбылысы *көшкіндік (лек-лектік) тесіп өту және тунельдік тесіп өту* болып тағыда екіге түрге бөлінеді.

*Электрлік тесіп өту* кезінде (1.9-суретте 3-4 нүктелер аралығы) ток мәнінің елеулі өзгеруіне қарамастан кернеу шамасы тұрақты қалады. Бұл құбылыс өндірісте кернеуді тұрақтандыруға пайдаланылып, ал диод *кремнийлік стабилитрон* (негізінен Si-ден жасалынатын болғандықтан) деп аталады. Дегенмен, токтың шамасы тежеусіз өсе беретін болса, электрлік тесіп

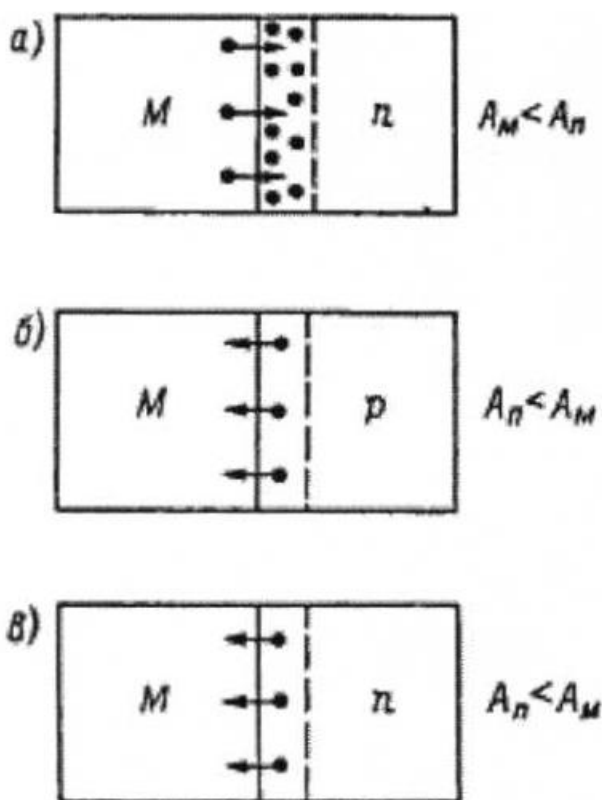
өту жылулық тесіп өтуге ауысып (токтың есерінен жылудың көп бөлінуіне байланысты), электрондық аспап толық істен шығуы мүмкін (сипаттамада 2-3 нүктелер аралығы).

Сонымен диодтың негізгі сипаттамасы оның 1.9-суретте келтірілген вольтамперлік сипаттамасы болып табылады. Ал оның температураға байланысты тәуелділігін зерттейтін болсақ, оны жартылай өткізгіш кедергісінің өзгерісіне байланысты анықтауға болады. Жартылай өткізгіш кедергісінің температура өскен сайын төмендей түсетінін ескере отырып, диодтың қай қосулуында болмасын (тура, кері) токтың да өсе түсетінін білеміз. Осы өзгеріс едәуір шамаға жетіп, өмірде жартылай өткізгіштік электрондық аспаптардың ең бір басты кемшілігі - *температуралық тұрақсыздыққа* әкеп соқтырады.

### **1.6 Металды – шала өткізгіш ауысуы**

Бүгінгі шалаөткізгіш құралдар өндеуде электронды-тесікті өткел байланыстан басқа, металл мен шалаөткізгіш арасындағы байланыс қолданылады. Бұндай ауысуларда процестер электрондардың энергетикалық аймақтағы шығу жұмысына байланысты, яғни металл және шалаөткізгіштен электрон шығу үшін жұмсалған энергия көлеміне байланысты. Шығу жұмысы неғұрлым аз болса, соғұрлым осы денеден электрон көп шығады. Енді әртүрлі металды шалаөткізгішті өткелден өтетін әртүрлі процестерді қарастырсақ (1.10 сурет).  $n$  - типті шалаөткізгіш (1.10, а сурет) металдан электрон шығу  $A_m$  жұмысы шалаөткізгіштен  $A_n$  шығу жұмысына қарағанда аз, онда металдан шалаөткізгішке электрон шығу басым болады. Сондықтан шала өткізгіштің шекара маңындағы қабатта негізгі тасымалдаушылар (электрондар) жиналады, яғни электрондар концентрациясы артады.





1.10 сурет - Металл – шала өткізгіш ауысуы

Осы қабаттың кедергісі кез келген полярлы кернеу қосылыста аз болады және сондықтан, бұндай өткел түзеткіш қасиетке ие болмайды. Оны түзетпейтін (омдық) байланыс дейді. Бұндай түзетпейтін өткел р-типті металл мен шалаөткізгіш байланыста болады (1.10, б сурет), егер шалаөткізгіштен электрон шығару жұмысы металмен салыстырғанда аз болса ( $A_n < A_M$ ), онда бұл жағдайда шалаөткізгіш металға кері бағытқа қарағанда көп электрон шығарады. Шала өткізгіштің шекаралас қабатта негізгі тасымалдаушылар (тесіктермен) қаныққан, кедергі аз болатын аймақ пайда болады. Түзетпейтін екі байланыс түрі *п- және р-* аймақтан шығаратын шалаөткізгіш құралдарда қолданылады.

Бұл мақсат үшін сәйкес металл таңдалады.

Басқа қасиетке ие ауысулар 1.10, в-суретте көрсетілген. Егер металл *п*-типті шалаөткізгішпен байланыс  $A_n < A_M$  болса, онда біріншіден электрондар шалаөткізгіштен металға қарай өтеді және шалаөткізгіштің шекаралас қабатында негізгі тасымалдаушылармен біріккен аймақ пайда болады, сондықтан оның кедергісі үлкен болады. Бұнда салыстырмалы түрде потенциалды тосқауыл жоғары орнатылады, оның биіктігі қосылған кернеудің полярлығына байланысты өзгеріп тұрады. Бұндай ауысу түзеткіш қасиетті береді. Осындай ауысуды неміс ғалымы В. Шотки зерттеген, сондықтан бұндай жағдайда пайда болған потенциалды тосқауылды Шотки тосқауылы деп атайды, ал диодты тосқауылды - Шотки диоды дейді. Шотки диодта (Шала өткізгіштен металға келетін электрондар) жинақтау процесі және негізгі емес тасымалдаушылар зарядын тарату процесі болмайды, бұл электрон-тесікті ауысуға сәйкес. Сондықтан Шотки диодтың жұмыс істеу қабілеті қарапайым диодпен салыстырғанда жоғары болады, өйткені зарядтарды жинақтау және тарату – процесі инерционды, біршама уақыт қажет етеді. Аналогты түзеткіш қасиетке *р*-типті шалаөткізгіш металмен  $A_M < A_n$  байланыс болғанда орындалады.

## 1.7 Реалды $p-n$ - ауысуның ерекшеліктері

Идеалды  $p-n$  ауысуында - кері ток салыстырмалы түрде аз ғана кері кернеу мәніне тәуелді емес. Бірақ реалды  $p-n$  ауысуді зерттесек – оң кернеуді жоғарылатсақ, кері токтың жоғарылағанын байқаймыз, кремний құрылымда кері ток жылудан 2-3 есе артық болады. Бұндай эксперименталды түрде алынған мәндердің теориялық мәндерден айырмашылығы  $p-n$  аймақта тасымалдаушы зарядының термогенерациямен және арна тогымен азаю токпен түсіндіріледі.

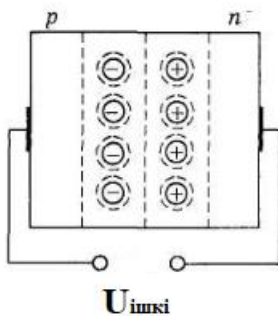
Арналы токтар жоғарғы бетте энергетикалық құбылыс болғандықтан жоғарғы қабат жанында бөгеуіл болды және инверсті қабат пайда болуына себеп болады. Бұл қабаттарды арналы дейді, ал инверсті қабат пен көрші аймақ арасымен өтетін токты арна тогы дейді.

**$p-n$  ауысуының сиымдылығы.**  $p-n$  ауысуының ауысу шекара жанында болатын ионды қоспа мен жылжымалы тасымалдаушы заряд, оның сиымдылық қасиетін түсіндіреді.  $p-n$  ауысуда екі сиымдылық құраушы бар – тосқаулды (зарядты)  $C_{тос}$  және диффузиялы  $C_{диф}$ .

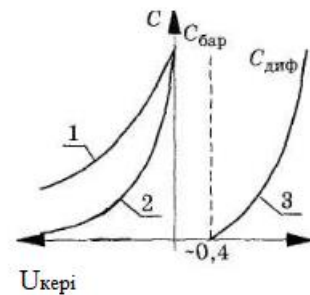
Тосқаулды сиымдылық  $p-n$  ауысуды ионды донор және акцепторлы қоспа бар болумен түсіндіріледі,  $p$  және  $n$  аймақта конденсаторды екі зарядпен қоршаған, ал біріккен қабат диэлектрик ретінде жұмыс істейді (1.11 сурет). Жалпы жағдайда зарядталған сиымдылықтың  $p-n$  ауысуға қосылған кері кернеудің тәуелділігі келесі түрде болады:

$$C_{тос} = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{|U_{кері}|}{U_r}\right)^\gamma} \quad (1.3)$$

мұнда  $C_0 - U_{кері} = 0$  болғандағы  $p-n$  ауысуының сиымдылығы; ол бір мен жүз аралығын пФ жатыр;  $\gamma$  – коэффициент,  $p-n$  ауысу түріне тәуелді (шұғыл  $p-n$  ауысу үшін  $\gamma = 1/2$ , ал баяу үшін  $\gamma = 1/3$ ).



1.11 сурет -  $p-n$ -ауысуының сыйымдылық қасиеті



1.12 сурет -  $p-n$ -ауысуының Вольт-фарадтық сипаттамасы

$C_{\text{тос}}$  теңдеуге қарап кері кернеу артқан сайын, тосқауыл сиымдылығы азаяды. Бұл кері кернеу артқандықтан біріккен  $p$ - $n$  ауысу қабаты артады, конденсатор айналасы кеңейіп, сиымдылық азаяды. Бұндай сиымдылықты тосқауыл қасиеті бар ауысуды сиымдылық ретінде қолданып, оны кері кернеу мәнімен басқаруға болады.

Сиымдылық біріккен кернеуге тәуелді болуды вольтфарадты қасиет деп атайды. Тәуелділіктің сипаты  $C_{\text{тоск}} = f(U_{\text{кері}})$  2.12-суретте көрсетілген, мұндағы 1 қисық баяу  $p$ - $n$  ауысуге, 2 қисық – шұғылға сәйкес.

Диффузиялық сиымдылық ауысуде түзу кернеуді арттырғанда теңсіз базадағы заряд тасымалдаушы саны өзгерісімен түсіндіріледі (2.12 суретте 3 қисық):

$$C_{\text{диф}} = \frac{dQ_{\text{диф}}}{dU_{\text{тур}}} = \frac{q}{kT} I_{\text{тур}} \tau, \quad (1.4)$$

мұндағы  $I_{\text{тур}}$  – ауысу арқылы өтетін тура ток;

$T$  - инжектелетін тасымалдаушылардың өмір сүру уақыты.

Түзу кернеу аймағына өту кезінде тосқауыл сиымдылығы ғана артпай сонымен қатар  $p$  және  $n$  аймақтың ауысуында теңсіз заряд жиналу сиымдылығы артады.

$p$  және  $n$  аймақтарда жиналған тасымалдаушылар тез рекомбинирленеді, демек диффузиялық сиымдылық уақыт бойынша азаяды. Азаю жылдамдығы  $T$  теңсіз заряд тасымалдаушының өмір сүру уақытына тәуелді. Диффузиялық сиымдылық  $p$ - $n$  ауысуда аз түзу кедергімен шунтталған және шалаөткізгіш элементтердің жылдам жұмыс істеу қабілетін анықтайды.

$p$ - $n$  ауысуының вольт-амперлік сипаттамасы.  $p$ - $n$  ауысуының вольтамперлік сипаттамасы (ВАС)  $p$ - $n$  ауысуы арқылы өтетін токтың мәні қосылған кернеудің мәніне және бағытына тәуелді. ВАС экспоненциалды тәуелділікпен ұсынылады

$$I = I_0 (e^{\frac{qU}{kT}} - 1), \quad (1.5)$$

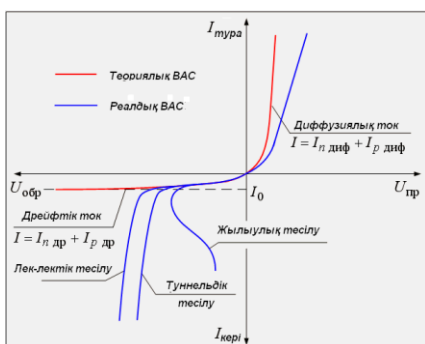
мұндағы  $I_0$  –  $p$ - $n$  ауысуының қаныққан кері ток, ол шала өткізгіштің физикалық қасиетімен анықталады және ол аз мөлшерде болады (мкА немесе нА);

$U$  -  $p$ - $n$  ауысуге қосылған кернеу;

$kT/q$  – жылулық потенциал;

$q$  – электрон заряды.

Вольтамперлік сипаттама 1.13-суретте көрсетілген және  $p$ - $n$  ауысуда жоғарыда қарастырған физикалық процестерді көрсетеді. Тура ауысу болғанда ( $U_{\text{пр}} > 0$ )  $p$ - $n$  ауысу аз кедергіге тең және ол арқылы көп тура ток өтеді.



1.13 сурет -  $p-n$ -ауысунің вольт-амперлік сипаттамасы

$U_{тур} > U_{кер}$  болғанда (1.13 сурет, нүкте 1) потенциалды тосқауыл жойылады және сипаттама түзу сызық ретінде болады, көлбеу база кедергісін анықтайды. Кері ауысу кезінде  $U = U_{кер} < 0$   $p-n$  ауысуының кедергісі үлкен және ол арқылы  $I_0$  мән көрсеткішіне жақын болатын аз ғана кері ток өтеді.

Сөйтіп,  $p-n$  ауысу бір бағытты өткізу қасиетпен сипатталады: токты түзу бағытта жақсы өткізеді, ал кері бағытта нашар болады, яғни түзеткіш қасиетке ие болады. Бұл қасиет арқылы  $p-n$  ауысудағы айнымалы токты түзету үшін қолданады.

ВАС параметріне:

1)  $R_{диф}$  – дифференциалды кедергі ( $p-n$  ауысу арқылы өтетін айнымалы токқа әсер ететін кедергі) түзу ауысу болғанда келесідей анықтайды:

$$R_{диф} = \frac{dU_{тур}}{dI_{тур}} \quad (1.6)$$

2)  $R_0 = R_{ст}$  – тұрақты ток кедергі ( $p-n$  ауысунің жұмыс нүктесінің кедергісі):

$$R_0 = R_{ст} = \frac{U_{тур}}{I_{тур}} \quad (1.7)$$

Сызықты аумақта ВАС түзу токтың бірлігі – ондаған мА.  $R_{диф}$  бірлік – ондаған Ом құрайды және  $R_{ст}$  әрқашан  $R_{диф}$  көп болады.

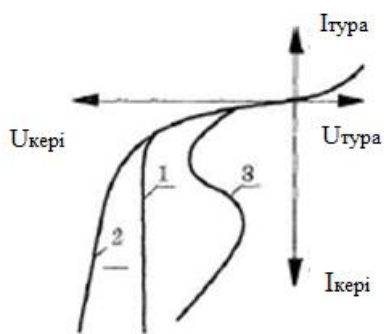
*$p-n$  ауысуының тесілуі.*  $p-n$  ауысуына кері кернеу бергенде, оның белгілі бір критикалық мәнге жеткен кезде кері токтың мәні лез артуын  $p-n$  ауысуының тесілуі деп аталады.

Ауысу тесілудің екі түрі бар: электрлік және жылулық.

1.13-суретте тесудің ВАС түрі көрсетілген. Электрлік тесу болғанда ауысудағы тасымалдаушылар саны электр өріс және атом торының ионизациясы әсерінен артады.

Электрлік тесудің келесі түрі бар: көшкінді, туннельді және үстіртті.

Көшкінді тесу түрде кең  $p-n$  ауысу аз қоспалы шалаөткізгіштерде байқалады (1.13 сурет, қисық 1). Көшкінді тесудің мағынасы электр өріс екпінді ионизация әсерімен тасымалдаушылар саны көшкінді түрде көбейеді. Негізгі емес зарядтар  $p-n$  ауысу арқылы өтіп, жаңа электрон жұбы, кемтік, пайда болады



1.14 сурет -  $p$ - $n$ -ауысуының тесілу кезіндегі воль-амперлік сипаттамасы

және ол өріспен жылдамдық алып келесі атомның иондалу процесін тудырады.

Ағынды иондалу кезінде тізбектегі ток сыртқы кедергілермен шектеулі болады. Ағындық процестің сандық бағасы болып тасымалдаушылардың ағындық көбею коэффициенті  $M$  табылады.

$M$  коэффициенті  $p$ - $n$  өткелінен өтетін токтың неше есе кері ток ( $I = Mi$  кері), мәнінен артық екендігін көрсетеді.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U_{\text{кері}}}{U_{\text{тесілу}}}\right)^b}, \quad (1.8)$$

мұндағы,  $b$  – шалаөткізгіштің түріне байланысты коэффициент. Температура көтерілген сайын тасымалдаушылардың еркін тасымалдау ұзындығы және энергиясы арта түседі. Сәйкесінше ағындық тесілудің кедергісі арта түседі. Ағындық тесілуде  $p$ - $n$  өткелінің кернуінің төмендеуі тұрақты болып қалады.

Туннельді тесілу күшті легирленген салыстырмалы түрде жіңішке  $p$ - $n$  өткелі бар шалаөткізгіштерде болады (1.14 сурет, 2 қисық). Салыстырмалы көп емес  $U_{\text{кері}}$  кернеуінде электр өрісінің кернеулігі үлкен мәнге ие болады ( $10^5 \text{Вт/см}$ ). Бұл шалаөткізгіштің зоналарының қисаюына алып келеді. Сондықтан  $p$ -типті валентті зона электрондарының энергиясы  $n$ -типті зонадағы электрондар энергиясымен тең болады. Бұл электрондардық көлденең бір облыстан келесі облысқа өтуін туғызады. Сыртқы тізбек бойынша туннельді ток ағады. Температура көтерілген соң заряд тасымалдаушылар энергиясы да артып, туннельді өткелдің ықтималдығы артады. Ал тесілу кернеуі төмендейді.

Тесілудің беттік түрі шалаөткізгіштің беттік кеңістігінде жеткілікті зарядтардың жиналуына байланысты  $p$ - $n$  өткелінің бетінде электр өрісінің өзгеруімен сипатталады. Беттік тесілу табиғаты бойынша ағындық, туннельдік және жылулық тесілулер болып келеді. Беттік тесілуден сақтану үшін диэлектрлік жабынды қолдану керек.

Жылулық тесілу  $p$ - $n$  өткелі одан өтетін ток әсерінен қызу арқылы жылудың жиналуынан және оның жеткілікті түрде таралмауынан пайда болады (1.14 сурет, 3 қисық). Қызу үлкен кері токтың әсерінен немесе сыртқы жылулық әсерлерден болуы мүмкін. Қызған кезде электрон кілттік жұптардың генерациясы пайда болады және кері токтың шамасы да артады. Жылулық тесілудің сипаттамасына кері дифференциалдық кедергісі бар ВАС жатады.

Электрлік тесілуде өткелдің жылулық тепе теңдігі бұзылатын болса, онда ол жылулық болып саналады.

Егер  $p-n$  өткелі тесілуден соң өз қасиеттерін сақтап қалатын болса, онда ол қайтарылатын тесілу деп аталады. Оған ағындық және туннельдік тесілулер жатады. Ал егер тесілу  $p-n$  өткелінің бұзылуына алып келсе, онда ол қайтарылмайтын тесілу деп аталады. Оларға жылулық және беттік тесілулерді жатқызамыз.

## **1.8 Интегральды микросұлбалар мен шалаөткізгішті құралдар жасауда қолданылатын негізгі технологиялық процестер**

Интегральды микросұлбалар мен шалаөткізгішті құралдар жасауда қолданылатын негізгі технологиялық процестердің бірнешеуін қарастырайық.

Шалаөткізгіштердің металдармен қорытпасы мен металл қоспаларын жасау бұл технологиялық процесс. Мұнда қажетті шалаөткізгіштік зона типін алу үшін шалаөткізгіш пластинкаға металл немесе металл қоспасын құйып жасайды. Шалаөткізгішті металға құю үшін қоспа таблеткаларын пайдаланады. Сосын белгілі бір температураға дейін қыздыра отырып, қажетті материал алады. Суытқаннан соң шалаөткізгіште қажетті электрөткізгіш типтегі обылыс пайда болады. Қоспалық өткелдер сатылы типке жатқызылады. Олар артықшылығы жоғарғы сенімділікке ие және өте үлкен кері кернеулерде жұмыс істей береді,  $p-n$  өткелінің аз кедергісі,  $p-n$  өткелінің тіке өтуі кезінде аз кернеуге ие болуы. Осы технологиялық процесті жалпы қоспа диодтар мен транзисторларды дайындау кезінде қолданады.

$p-n$  өткелін дайындаудың электрохимиялық әдістерін өте жақын аралықтағы өткел алу үшін қолданады. Мысалы, транзисторда эмиттер мен коллектордың ара қашықтығы 3-4 мкм-ге тең. Әдістің негізгі мағынасы металды шалаөткізгіш үстіне отырғызуында. Реакция нәтижесінде металл – шалаөткізгіш аралығы пайда болды, оның қасиеттері тек материалдарға байланысты болып келеді.

Өте сирек жағдайларда электрохимиялық отырғызу мен құйманы араластыру әдісі пайдаланылады. Ол үшін металл отырғызылған шалаөткізгішті қажетті температураға дейін қыздырады. Бұл  $p-n$  өткелін алу технологиясын микроқұйма деп те атайды.

$p-n$  өткелінің мұндай әдісті көбіне жоғарғы жиілікті шалаөткізгіш құралдарын жасауда қолданады.

Диффузия – бұл шалаөткізгіш бетінде немесе пластина ішінде акцепторлы не донорлы қоспа енгізу арқылы  $p-n$  өткелін алу процесі. Пластиналар ішіне құймалардың енуі атомдар диффузиясы арқылы және пластинаны қыздыру арқылы жүзеге асады.

Атомдар жоғарғы концентрация жағынан жылдамдықпен диффузияға ұшырайтындықтан, ол диффузия коэффициентімен анықталады, шалаөткізгіш

бетінде аз концентрация байқалады. Бетінен ішіне қарай аралықтың артуынан, құйма концентрациясы да кеми түседі.

*p-n* өткелі заряд тасымалдаушылар концентрациясы құймасыз материалдың концентрациясына тең келетін аумақта пайда болады (меншікті электрөткізгіштікте). Облыстың қалыңдығы бойынша диффузия нәтижесінде пайда болған таралған құйма аумақтарында өзіндік электр өрісі болады.

Әртүрлі материалдардағы әртүрлі диффузия коэффициентіне байланысты қажетті әртүрлі электрөткізгіш облысты алу қолданылған. Германий элементі үшін донорлық құймалар үшін диффузия коэффициенті акцепторлық құймаларға қарағанда бірнеше жоғары болып келген. Ал кремнийде керісінше байқалады.

Сол себептен егер пластинаны жоғарғы температурадағы донорлық және акцепторлық буларының қоспалары бар газға орналастырсақ, жоғарғы диффузия коэффициенттеріне ие атом қоспалары шалаөткізгішке тереңірек кіріп, қажетті электрөткізгіштікті туғызады. Ал төмен диффузия коэффициенттеріне ие атом қоспалары бетке жақын орында қарсы электрөткізгішке ие аумақ құрады. Осы жерден, төменгі диффузия коэффициентіне ие қоспалардың концентрациясы жоғарғы диффузия коэффициентіне ие қоспалар концентрациясынан көп болу керектігін ескеру керек. Диффузиялық жолмен өткелді алу процесінің сапасы температураны ұстап тұрғанына тікелей байланысты болып келеді. Мысалы, 1000-1200 С температурадан бірнеше градусқа өзгертетін болса, диффузия коэффициентінің екі есе өзгеруіне әкеліп соғуы мүмкін.

*Екісатылы диффузия* бұл әдіс диффузиялық жолмен алынатын шалаөткізгіштік құралдардың температураларға тәуелділігін төмендету үшін қолданылады. Бірінші сатыда шалаөткізгіш пластинаның бетіне салыстырмалы төмен температурада шыны тәріздес қабат құяды. Ал екінші сатыда пластинаны жоғарғы температурада болатын пешке салады. Онда шыны тәріздес қабаттан пластинаның ішіне қарай енеді. Сонан соң диэлектрлік оксид қабаты пайда болады. Екісатылы диффузия әдісі көбінесе бор және кремний қоспаларын енгізу кезінде қолданылады. Қоспаның көзі ретінде бор ангидрид қолданылады.  $B_2O_3$ . Пластина мен бор ангидридін қыздыру арқылы бетінде бор силикатты қабат алады. Сонан соң оны қаттырақ қыздыру арқылы бор диффузиясын жүргізеді. Осы кезде жоғарғы қабат  $SiO_2$  мен қапталады.

*Эпитаксия процесі* бір монокристалды басқа кристалл қырына өсіру. Шалаөткізгішті эпитаксиалды пленкалар көп түрлі жолдармен алынуы мүмкін: вакуумда термиялық булану жолымен, жұп фазаларын орнату, газдық аралықта шандандырумен. Қоспаның типін өзгерту арқылы және өсіру шарттарын өзгерту арқылы жоғарғы аралықта эпитаксиалды пленкалардың электрлік қасиеттерін өзгертуге болады. Бұл әдіс диффузиялық әдістің орнына да қолданыла береді.

*Иондық легирлеу* вакуумда пластинаны қыздыра отырып, оны белгілі бер жылдамдықпен иондармен атқылау арқылы. Шалаөткізгіштітерге енген иондар акцепторлар мен донорлық қоспалардың рөлін ойнайды. Бұл процесс диффузияны қолданбай-ақ қажетті электрөткізгіш қасиетін алуға жол ашады. Мұндай технологияны элион деп атайды.

*Вакуумды шаңдандырудың* мағынасы мынадай: шаңдандыратын металды вакуумда булануға дейін қыздырады. Содан соң оны салыстырмалы түрде төменгі температурадағы кеңістікке орнатады. Қажетті жағдайда алу үшін оны металл маскалары арқылы шаңдандырады.

*Катодтық шаңдандару* тығыз байланыстары бар жерлерге қолданылады. Бұл процесс катодты иондалған атомдармен атқылау арқылы жою принципіне негізделген. Инертті газ, мысалы аргон,  $1-10^2$  буландыру камерасын тудырады. Газ иондары интенсивті түрде катодты атқылай отырып атомдарға қажетті энергия береді және катод бетінен ұшып шығады. Олар шалаөткізгіштерге түсіп, оны металл қабатымен жабады.

*Электролиттік және химиялық отырғызу* электрөткізгіштік қондырғы бар болған жағдайда қолданылады. Судан жасалған қоспа арқылы электролиттік немесе химиялық жолмен пленканы отырғызады. Оксидті маскалауды пластинканың белгілі бер жерлеріне ғана қолдану үшін ғана пайдаланады. Ал қалған бөліктерін атомның кіріп кетуінен сақтау мақсатында қолданылады. Шекараларды шектеуге ыңғайлы маска болып  $\text{SiO}_2$  табылады. Бұл кремний қоспасындағы диффузияның басқаларға қарағанда аз болуымен түсіндіріледі. Одан басқа кремний диоксиді жақсы шалаөткізгіш болып табылады. Сол себептен қышқылдандыру бұл интегралды сұлбаларды жасаудағы негізгі саты болып саналады. Оксидті алу үшін пластинаны  $900-1200$  С-қа дейін қажетті оттегі атмосферасында қыздырады. Бұл процесс көбіне кремнийлі микро сұлбаларды жасау кезінде қолданылады.

*Фотолитография* – бұл қажетті пластина беткі қабатын алу процесі. Оксидті қабатпен маскаланған шалаөткізгіштің беткі жағы фоторезисторды жабады. Сонан соң бірқалыпты жабын алу үшін центрифугаға орнатып, кептіреді. Осыдан кейін бетті экспондап, оның қажетті жерлерін мөлдір етеді. Фото резистордың жарықтандырылған жерлерін қатырады, ал қалған жерлерін арнайы қоспа арқылы жояды.

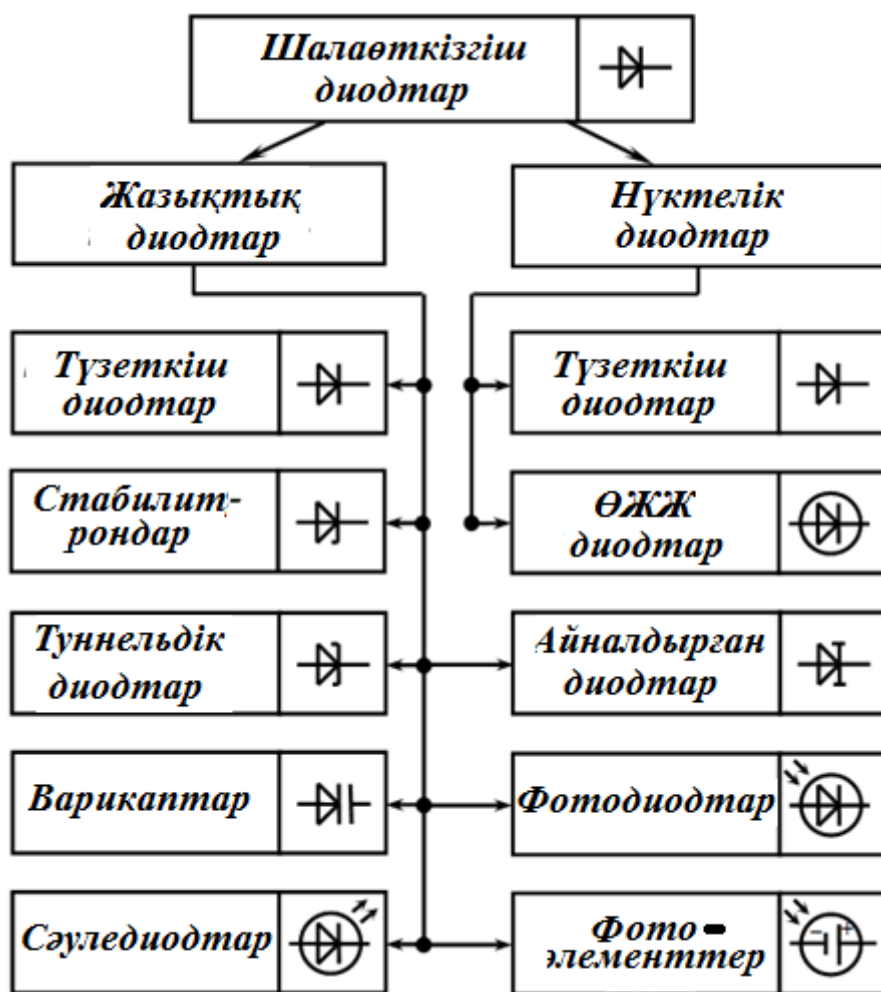
## **1.2 Шалаөткізгіш диодтар**

### **1.2.1 Шалаөткізгіш диодтар жайлы жалпы түсініктер.**

*Шалаөткізгіш диод* деп құрамында екі электроды және бір  $p-n$  – ауысуы бар шалаөткізгіш аспапты айтады. Электродтың біреуін анод, ал екіншісін катод деп атайды. Келісім шарт бойынша, диод арқылы өтетін ток анодтан катодқа қарай бағытталған, яғни диод бойынша ток өткізу үшін анодқа плюс потенциал, ал – катодқа минус потенциал берілуі керек. Басқаша айтқанда, диод  $p-n$  – ауысуы тура бағытты кернеуге қосылғанда бір жақты токты өткізеді де,  $p-n$  - ауысуы кері бағытты кернеуге қосылғанда токты өткізбейді, сондықтан да оның айнымалы токты түзеткіш қабілеті бар деп аталатын осы.

Шалаөткізгіш диодтардың топталынуы және олардың шартты белгілері 1.15-суретте келтірілген.





1.15 сурет - Шалаөткізгіш диодтардың топталынуы және шартты белгісі

Шалаөткізгіштік диод сұлбаларда жебе белгісіне ұқсас үшбұрышпен белгіленіп (1.15 сурет), оның бағыты токтың өту бағытын көрсетеді. Үшбұрыштың үш жағы *катод* ( $K$ ) да, сырт жағы *анод* ( $A$ ) деп аталады. Ток әрқашанда анодтан катодқа қарай ағады. Идеалдық тұрғыдан қарағанда: егер де анод пен катод арасындағы кернеу оң болса, ток шексіздікке, ал теріс болса, нөлге ұмтылады, яғни  $U_{ак} > 0$  болса, онда  $I_{ак} \rightarrow \infty$ ; ал егер  $U_{ак} < 0$  болса, онда  $I_{ак} = 0$ .

Жалпы шалаөткізгіштік диодтар  $p-n$  – ауысуының типіне байланысты, нүктелік және жазықтық болып, ал конструктивтік атқарылуы бойынша – балқытылған, диффузиалық және эпитаксиальдық диодтар болып бөлінеді. Сонымен қатар, диодтарды технологиялық дайындау жолдары да әртүрлі, саналуан болып келеді.

Осыған байланысты кейбір диодтардың да аттары, мысалы: туннельдік диод, Шоттки диоды, Ганна диоды; варактор т.т. деген аттары бар.

Қолданылатын облыстары бойынша диодтар келесі түрге бөлінеді:

Түзеткіш (вентиль), универсалды; импульстік; өте жоғары жиіліктік; варикап; стабилитрон; сәуле диоды; фотодиод; айналдырылған диод; туннельдік диод т.т.

Өнеркәсіпте көбінесе германий мен кремнийден жасалған диодтар шығарылады. Кейде диодтар жартылай өткізгіш болып саналатын интерметалдық қосылыстардан да жасалынады. Кремнийден жасалған диодтардың мынадай жақсы қасиеттері бар. Кері токтардың мөлшерінің аздығы, кері кернеудің үлкен мәндерінде және сыртқы ортаның температурасының жоғары шамаларында жұмыс істей алуы.

Ал германийден жасалған диодтардың бірден-бір тиімділігі: тікелей токты өткізгенде кернеудің түсу шамасының аз болуы (0,3-0,5) В, ал кремний үшін (0,8-1,0) В.

*Диодтардың шартты белгілеу жүйесі.* Бірінші элемент (сан немесе әріп) шалаөткізгіштің бастапқы жасалған материалын белгілейді, екінші (әріп) элемент – аспаптың қолдану аймағы, үшінші (сан) элемент – аспаптың функционалдық мүмкіндігі, төртінші элемент (сан) – аспаптың дайындау нөмірі, бесінші элемент – сан, аспаптың тобын анықтауыш.

Шалаөткізгіштің бастапқы жасалған материалын белгілеуге келесі символдар қолданылады: Г, немесе 1 – германий немесе оның құралымы;

К, немесе 2 – кремний немесе оның құралымы; А, немесе 3 – галлидың құралымы; И, немесе 4 – индийдің құралымы.

Аспаптың қолдану аймағын белгілеу үшін келесі символдар қолданылады: Д – түзеткіш және импульстік диодтар; Ц – бағаналық және блокты түзеткіштер; В – варикаптар; И – туннельді диодтар; А – өте жоғары жиілікті диодтар; С – стабилитрондар; Г – шу генераторы; Л – сәуле шығарғыш оптоэлектрондық аспаптар; О – оптоқосақтар.

Диодтардың ең негізгі эксплуатациялық сипаттамаларын (функционалдық мүмкіндіктерін) белгілеу үшін келесі цифрларды қолданады:

1) *Диодтар (тобы Д):* 1 – тұрақты немесе тура токтың орта мәні 0,3 А аспайтын, түзеткіш диодтар; 2 – тұрақты немесе тура токтың орта мәні 0,3 А кем емес, 10 А аспайтын түзеткіш диодтар; 4 - кері кедергісінің қайта қалпына келу уақыты 500 нс артық импульстік диодтар; 5 – кері кедергісінің қайта қалпына келу уақыты 150 нс артықта 500 нс артық емес импульстік диодтар; 6 – кері кедергісінің қайта қалпына келу уақыты 30...150 нс импульстік диодтар; 7 – кері кедергісінің қайта қалпына келу уақыты 5...30 нс импульстік диодтар; 8 – кері кедергісінің қайта қалпына келу уақыты 1...5 нс импульстік диодтар;

9 – негізгі емес заряд тасымалдауыштардың әсерлік өмір сүру уақыты 1 нс көп емес импульстік диодтар.

2) *Түзеткіш бағаналар мен блоктар (тобы Ц):* 1 – тұрақты немесе тура токтың орта мәні 0,3 А аспайтын бағаналар; 2 – тұрақты немесе тура токтың орта мәні 0,3...10 А аспайтын бағаналар; 3 – тұрақты немесе тура токтың орта мәні

0,3 А аспайтын блоктар; 4 – тұрақты немесе тура токтың орта мәні 0,3...10 А аспайтын блоктар.

3) *Варикаптар (тобы В)*: 1 – жетілдірмелі варикаптар; 2 – көбейткіш варикаптар;

4) *Туннельдік диодтар (тобы И)*: 1 – күшейткіш туннельдік диодтар; 2 – генераторлық туннельдік диодтар; 3 – қосқыш туннельдік диодтар; 4 – айналдырған диодтар.

5) *Өте жоғары жиілікті диодтар (тобы А)*: 1 – ығыстырғыш диодтар; 2 – детекторлық диодтар; 3 – күшейткіш диодтар; 4 – параметрлік диодтар; 5 – қосқыш және шектегіш диодтар; 6 – көбейткіш және үстінен жетілдіргіш диодтар; 7 – генераторлық диодтар; 8 – импульстік диодтар.

6) *Стабилитроны (тобы С)*: 1 – қуаты 0,3 Вт-тан азға есептелген, туралайтын номиналдық кернеуі 10 В-тан аз стабилитрон; 2 – қуаты 0,3 Вт-қа есептелген, туралайтын номиналдық кернеуі 10...100 В стабилитрон; 3 – қуаты 0,3 Вт-тан азға есептелген, туралайтын номиналдық кернеуі 100 В-тан аз стабилитрон; 4 – қуаты 0,3...5 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 10 В-тан аз стабилитрон; 5 – қуаты 0,3...5 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 10...100 В стабилитрон; 6 – қуаты 0,5...5 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 100 В стабилитрон; 7 – қуаты 5...10 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 10 В-тан аз стабилитрон. 8 – қуаты 5...10 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 10...100 В; 9 – қуаты 5...10 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 100 В-тан артық.

7) *Шу генераторы (тобы Г)*: 1 – төменгі жиілікті шу генераторы; 2 – жоғары жиілікті шу генераторы.

*Мысалы:* 2Д204В – кремниден тұратын түзеткіш диод, тұрақты немесе тура токтың орта мәні 0,3...10 А, әзірлеу нөмірі 04, тобы В.

КС620А – кремниден тұратын стабилитрон, қуаты 5...10 Вт, туралайтын номиналдық кернеуі 10...100 В, әзірлеу нөмірі 20, С тобы.

Диодтардың жалпы параметрлерінің тобына жататын шамалар: диодтың ауысының ұйғарынды температурасы; диодтың ауысының бойындағы тарқатылатын активтік ұйғарынды қуат; ұйғарынды тура ток пен ұйғарынды кері кернеу.

Берілген кернеудің әсерімен диодтың бойынан ток жүрген уақытта, оның бойында активтік қуат  $P_d = UI$  шығын қуаты ретінде тарқатылады. Бұл қуаттың бөлініп шығуы диодтың қызығуына әкеп соғады да, диодтың бойында кері токтың ұлғаюуына себепші болады. Бұның өзі өте қауыпты құбылыс, себебі  $p-n$  - ауысуында жылулық тесіп өту процесін туғызуы мүмкін. Сондықтан, жылулық тесіп өту процесін болдырмау үшін  $p-n$  – ауысуының температурасы оның  $T_{a,max}$  мүмкіндік температурасынан аз болуы керек.

Ереже бойынша германиден жасалған диодтарға  $T_{a,max} = 70$  °С, кремниден жасалған диодтардың  $T_{a,max} = 125$  °С бойындағы бөлінген жылуды диод температурасы  $T_{ao}$  айналадағы ортада тарқатады.

Диодтың ауысуы мен айналадағы ортаның температураларының арасындағы айырымы келесі өрнекпен анықталады:

$$T_a - T_{ao} = R_T P_d, \quad (1.9)$$

бұнда  $R_T$  — диодтан жылууды алып кететін шартты сипаттайтын жылулық кедергі (корпустардың конструкциясы, радиатордың болуы т.т.)

Жылулық кедергі  $R_T$  шамасы эксперимент бойынша анықталады да, анықтамаларда беріледі.

Диодтың ауысуының ұйғарынды температурасында ұйғарынды тарқатылатын қуаттың бөлінетін шамасы келесі өрнекпен анықталады:

$$P_{d\max} = (T_{a\max} - T_{ao}) / R_T. \quad (1.10)$$

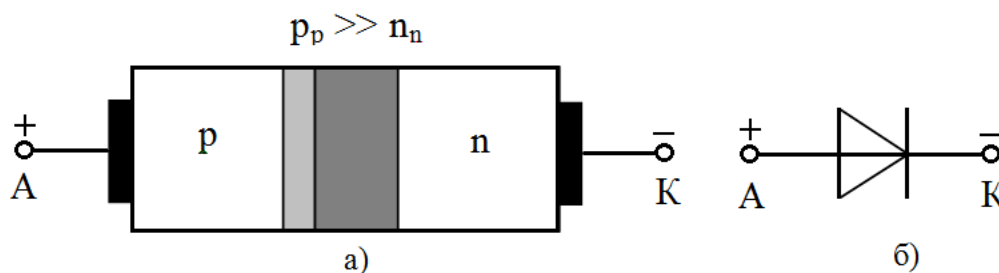
Диодтың жұмыс режимін таңдау үшін келесі шартты пайдалану керек

$$UI \leq P_{d\max}. \quad (1.11)$$

Диодтың температурасы тура токқа тәуелді. Диодтың ауысуының температурасы  $T_{a\max}$ -ға тең шамаға жеткен кезіндегі тіке токтың шамасын *ұйғарынды тура ток* деп атайды да,  $I_{тик\max}$  деп белгілейді.

Диодтың өте маңызды параметрі болып ұйғарымды кері кернеу  $U_{кер\max}$  есептеледі. Кернеудің бұл мәнінде  $p-n$  – ауысуының бойында тесіп өту процесі болмайды. Көбінесе  $U_{кер\max} \leq 0,8U_{тесот}$ .

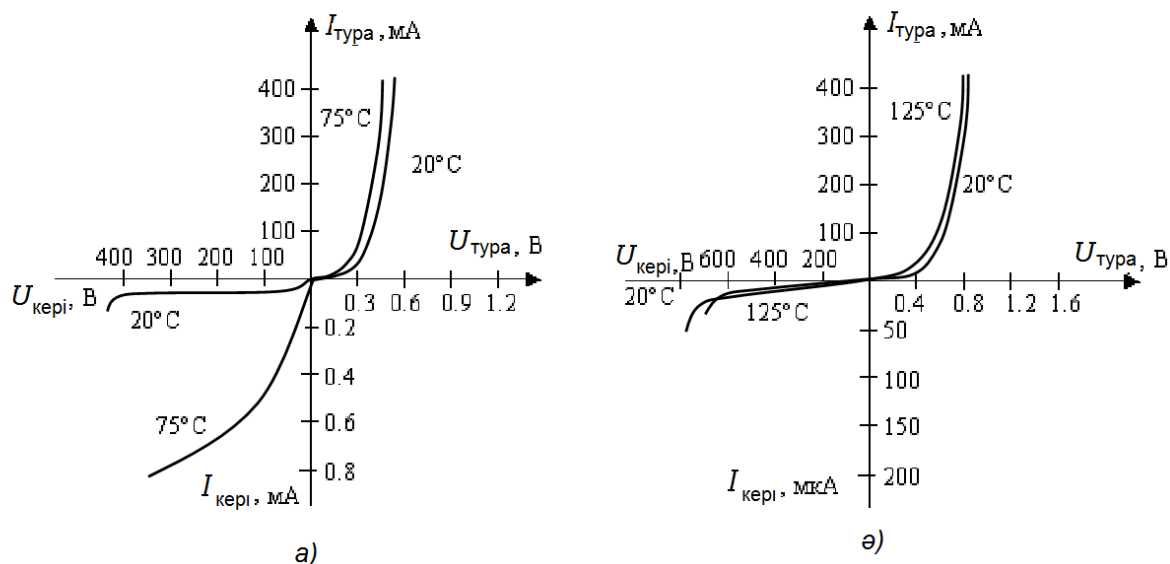
*Түзеткіш диодтар.* Түзеткіш диод айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіруге арналған аспап. Ол  $p-n$  - ауысуының тек бір бағытта өткізгіштік қасиеті пайдаланылады. Көп жағдайларда түзеткіш диодтар  $p-n$  - ауысуының түйсігі жазық типті болып келеді. Оның құрамында симметриялы емес  $p-n$  – ауысуы қолданылады да, әр обылысында негізгі заряд тасымалдауыштардың концентрациясы бір-бірімен әлде қайда әртүрлі ( $p_p \gg n_n$  немесе  $n_n \gg p_p$ ) болып келеді.



1.16 сурет - Түзеткіш диодтың құрылымы (а) және графикалық шартты белгісі (б)

Түзеткіш диодтың аз қоспасы бар жоғарғы омдық кедергісі бар база обылысына қарағанда (мысалы  $n$ -обласы, 1.16 сурет), оның өте көп қоспасы бар эмиттер обласында (мысалы  $p$ -обласы, 1.16 сурет) көп шамада негізгі заряд тасымалдауыш кемтіктер бар. Енді диодқа тура кернеу беретін болсақ, онда оның  $p-n$ -ауысуы тура бағытта ығысады да, өте басым болып келетін негізгі заряд тасымалдауыш кемтіктердің инжекциясы басталады да, эмиттерден базаға қарай диффузия тоғын туғызады. Ал диодқа кері кернеу беретін болсақ, оның

*p-n*-ауысуында негізгі емес заряд тасымалдушылар электрондардың экстракциясы басталады да, ауысу бойынша дрейфтік (ығысу) тогын туғызады. *p*- және *n*-обылыстарында негізгі заряд тасымалдаушыларының концентрациясы негізгі емес заряд тасымалдаушыларының концентрациясынан әлде қайда саны көп болғандықтан, тура ток пен кері токтың шамалары бір-бірінен бірнеше дәрежеге айырмашылығы бар (1.17 сурет).

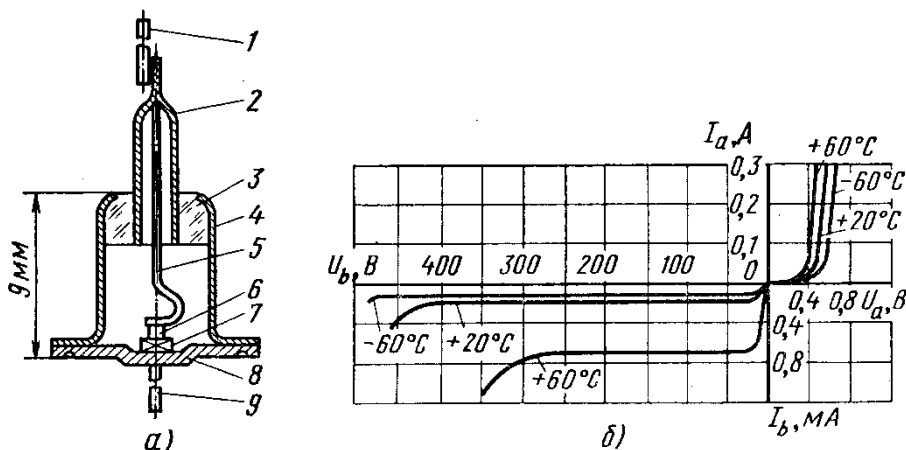


1.17 сурет - Қоршаған ортаның әртүрлі температурасына сәйкес тұрғызған германийден (а) және кремнийден (ә) жасалған диодтардың вольт-амперлік сипатамалары

Қазіргі кезде кремний, германий диодтары, селен вентильдері кеңінен қолданылады. Жалпы шалаөткізгішті диодтар *p-n* – ауысуының типіне байланысты, нүктелік және жазықтық болып бөлінеді. Бұл диодтарда *p-n* – ауысуы әртүрлі типті электрөткізгіштік қасиеті бар екі шалаөткізгіштен құралады. Әртүрлі типтен тұратын шалаөткізгіштің ауысуының ауданы микрометрдің квадратының жүзден бір бөлігінен бастап (микрожазықтық диодтар) бірнеше квадрат сантиметр (күштік диодтар) тең болады. Сондықтан жазықтық диодтардың электрондық-кемтік ауысуының ауданын анықтайтын сызықтық размері оның қалыңдығына қарағанда үлкен шаманы камтиды да, олар мөлшері үлкен токтарды түзете алады.

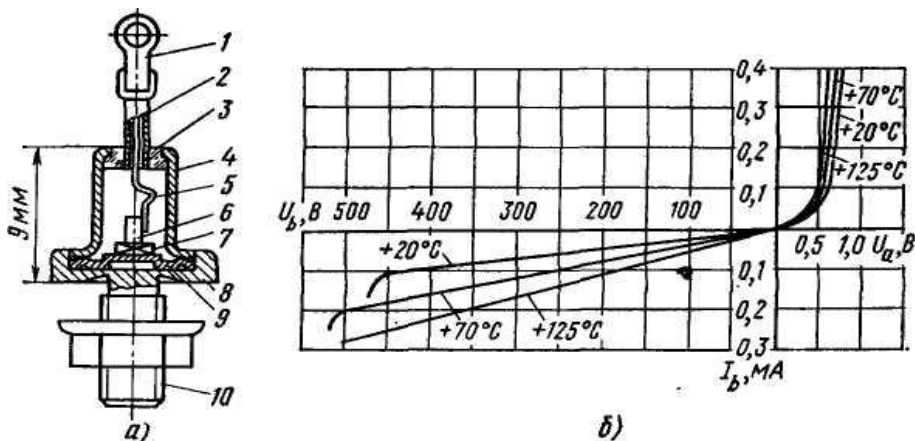
Ал нүктелік диодтарда электрондық-кемтік ауысуының ауданын анықтайтын сызықтық размері, оның көлемдік зарядының қалыңдығына қарағанда аз шамаға ие болып келеді. Нүктелік диодтарды жасау үшін электрөткізгіштігі *n* – типті, германийден немесе кремнийден тұратын қалыңдығы 0,1–0,6 мм және ауданы 0,5—1,5 мм<sup>2</sup> пластинка қолданылады. Бұл паластинкамен ұшталған болат сым жанастырылады. Бұл сымның бойымен

алғашқысын бір рет бірнеше ампер ток өткізіп,  $n$  – типті шалаөткізгішпен балқытып пісіріледі де,  $p$ -типті электр өткізгіш құрады. Жанаспаның ауданы өте аз болғандықтан диодтардың бойынан өтетін тіке бағыттағы токтардың шамасы өте аз болып келеді және барьерлік сымдылығы аз шамада болады. Осы себепті электродтардың өзара аймағының көлемі да аз шамалы болып келеді де, бұндай диодтарды өте жоғарға жиіліктік диапазондарда қолдануға мүмкіндік береді. Нүктелік диодтар көбінесе жоғарғы жиілікті айнымалы токтарды түзетуге қолданылады. Жазықтық диодтардың электрлік сипаттамалары олардың  $p-n$  – ауысуының сипаттамаларына байланысты анықталады. 1.18, 1.19 және 1.20-суреттерде жазықтық диодтардың бірнеше түріне мысалдар келтірілген.



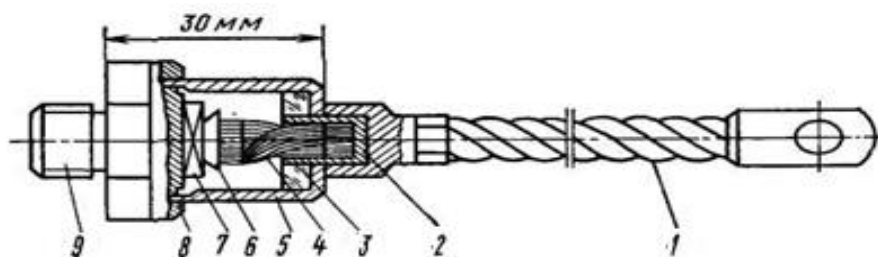
Аз қуатты германийден жасалған Д7А — Д7Ж (а) түзеткіш диодтың конструкциясы: 1 — анодтың сыртқы шығарғышы; 2 — түтік (штенгель); 3 — әйнек изолятор; 4 — корпус; 5 — анодтың ішкі шығарғышы; 6 — индидің таблеткасы; 7 — германий кристалы; 8 — кристалл ұстауыш; 9 — катодтың сыртқы шығарғышы. Д7Ж (б) диодтың вольт-амперлік сипаттамасы.

1.18 сурет



Орта қуатты кремниден жасалған Д202 — Д205 (а) диодтарының конструкциясы: 1— анодтың сыртқы шығарғышы; 2 — түтік (штенгель); 3 — айнек изолятор; 4 — корпус; 5 — анодтың ішкі шығарғышы; 6 — алюминий; 7 — кремний кристаллы; 8 — жылуды бұрып жіберетін негіз; 9 — кристалл ұстағыш; 10 — катодтың сыртқы шығарғышы. Д205 (б) диодтың вольт-амперлік сипаттамасы.

1.19 сурет



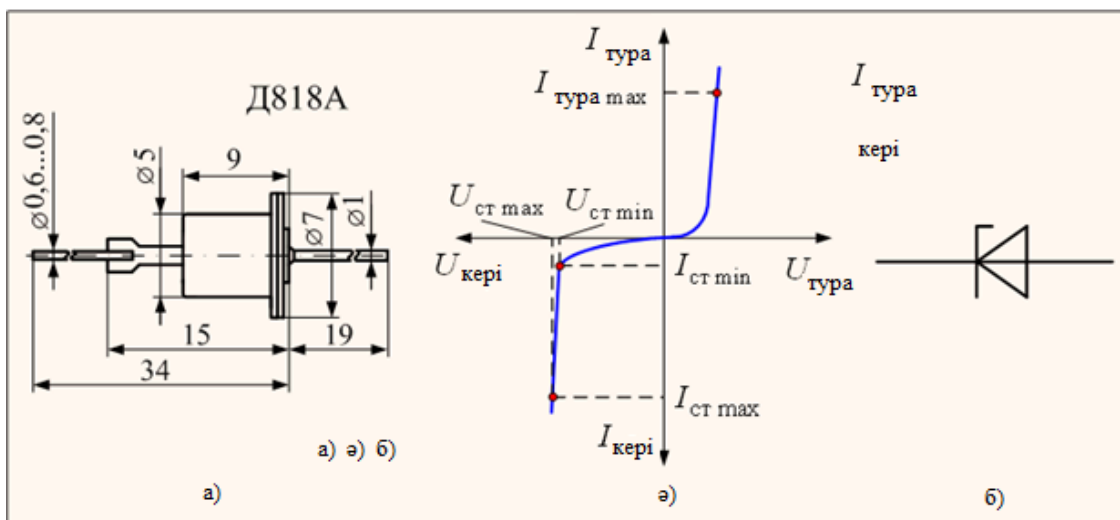
Өте қуатты кремниден жасалған ВЛ-200 диодтың конструкциясы: 1 — анодтың сыртқы жұмсақ қылып жасаған шығарғышы; 2 — стакан; 3 — айнек изолятор; 4 — анодтың ішкі жұмсақ қылып жасаған шығарғышы; 5 — корпус; 6 — табақша; 7 — р-п ауысуы бар кристалл с; 8 — кристалл ұстағыш (катод); 9 — радиаторға қатайтуға арналған шпилька.

1.20 сурет

Түзеткішке арналған диодтардың шектелген электрлік жұмыс тәртібін мынандай көрсеткіштер (параметрлер) сипаттайды:

- түзетілген тура токтың мәні  $I_{\text{тура}}$ ;
- түзетілген токтың ең үлкен мәніне сәйкес келетін тура токтың ең үлкен мәні  $I_{\text{тура,мах}}$ ;
- диодтың бойындағы тура кернеудің мәні  $U_{\text{тура}}$ ;
- кері кернеудің ең үлкен мәні  $U_{\text{кері,мах}}$ ;
- кері токтың мәні  $I_{\text{кері}}$ ;
- диодтың бойындағы максималдық (рұқсат етілген) қуаты  $P_{\text{дмакс}}$ ;
- диодтың дифференциалдық кедергісі  $r_{\text{д}}$ .

**Шалаөткізгіштік стабилитрон.** Шалаөткізгіштік стабилитрон деп электр сұлбаларында кернеудің деңгейлерін туралауға мүмкіндік беретін шалаөткізгіштік аспапты айтады. Ол үшін вольт-амперлік сипаттамасында бойынан өтетін токқа нашар тәуелді болатын участігі бар шалаөткізгіштік диодтарды қолданады. Бұндай участкі кремнилік диодтың вольт-амперлік сипаттамасының кернеуді кері бағытта қосқандағы көшкіндік немесе тунельдік тесіп өту режимін көрсететін тармағында бар. Сондықтан шалаөткізгіштік стабилитрон ретінде жазықтық кремнилік диодты қолданады.

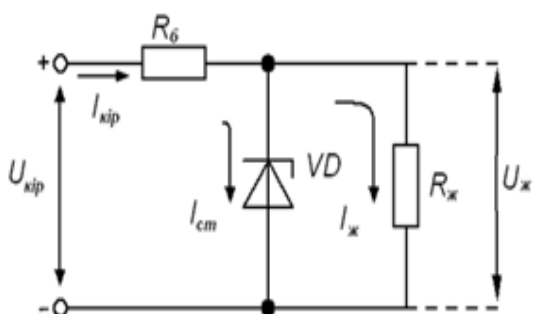


1.21 сурет - Кремнилік диодтың вольт-амперлік сипаттамасы мен шартты белгісі

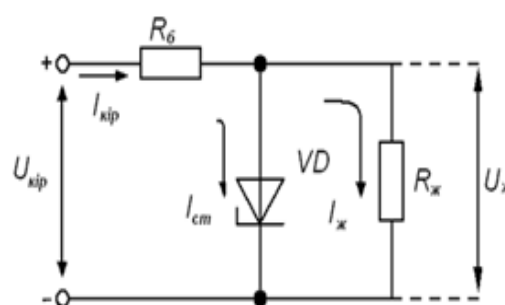
Ең қарапайым аз қуатты кернеу тұрақтандырғыш параметрлік деп аталады да, ол арнайы диод негізінде жасалынып, оның кері бағытта қосылуындағы электрлік тесіп өту режимінде жұмыс істейді. Егер де осы сипаттама бөлігіне арнайы назар аударса болса (1.21 сурет) онда токтың едәуір өзгеруіне кернеудің аз ғана ауытқуы сәйкес келеді. Бұл диодтың тұрақтандырғыш қасиеті

Мұндай қасиет диодтың тура қосылуында да болуы мүмкін. Бұл екі режимнің бір-бірінен өзара айырмашылығы: кері қосылудағы тураланған кернеудің шамасы бірнеше вольттан жүздеген вольтқа жететін болса, тура қосылуда ол бір-екі вольттан аспайды (кремнийде, мысалы 0.7 В-тан 0.8 В-қа дейін).

Бірінші кері бағытта қосылу режимінде жұмыс істейтін электрондық аспап *стабилитрон*, ал екінші тура бағытта қосылуда жұмыс істейтін электрондық аспап *стабистор* деп аталып, олардың қосылулары келесі 1.22, 1.23-суреттерде кескінделген.



1.22 сурет - Стабилитрондық кернеу туралаушы



1.23 сурет - Стабисторлық кернеу туралаушы

Мұндағы,  $U_{кiр}$  - әлі тураланбаған, ал  $U_ж$  -тураланған кернеу шамалары. Тураланған кернеу жүктеме кедергісі  $R_ж$ -де бөлініп отырса, кіріс кернеуінің



тұрақсыз бөлігі ток шектеу кедергісі  $R_B$ -де бөлініп, жүктемеге өтпейді. Сонымен қатар  $R_B$  – де стабилитрон тогының шамадан тыс асып кетпеуін қамтамасыз етеді. Кіріс кернеуі үлкен болғанда  $U_{R6}$ -де үлкен, ал аз болғанда, аз болып, тұрақтандырылмаған кіріс кернеуінің тұрақсыз бөлігін әрқашанда өзінде сөндіріп отырады.

Стабилитрондар электрлік тесіп өту режимінде жұмыс істейді. Аспаб кері қосылғанда, минималдыдан  $I_{мин}$  максималдыға дейін  $I_{макс}$  электрлік тесу жерінде кернеудің түсуі өте кішкентай болады да аспаб арқылы ағатын ток тұрақты деп есептеледі (1.21, ә сурет). Стабилитрондық кернеу туралаушы келесі параметрлермен сипатталады:

- тұрақтандыру кернеуі  $U_{ст}$ ;
- минималды және максималды тұрақтандыру токтары  $I_{мин}$  және  $I_{макс}$ ;
- дифференциалдық кедергі  $R_d = dI/dU$  – электрлік тесіп өту жерінде;
- тұрақтандыру температуралық коэффициент  $\alpha_{ст} - \Delta T$  қоршаған ортаның температурасы өзгергенде, тұрақтандыру кернеуінің салыстырмалы өзгеруі  $\Delta U_{ст}$  :

$$\alpha_{ст} = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст} \Delta T} \cdot 100\%$$

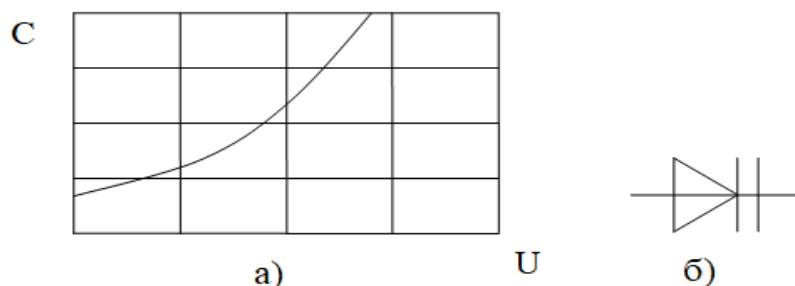
Тұрақтандыру температуралық коэффициенті, аспаб арқылы өтетін ток пен кернеуінен байланысты болады. Төмен кернеулерде (5,7 В тан төмен)  $U_{ст}$  температуралық коэффициент кері таңбалы болады. Ток 10 мА таяу болғанда, ол  $-2,1$  мВ/С° тең болады. Кернеу 6 В тан жоғары болса, ол оң таңбалы болады, коэффициент оң таңбалы болады егер ток өлшемі (10 мА) дәрежесі 6 мВ/С° жетеді. Ток өлшемін аспаб арқылы таңдасақ, оның температуралық коэффициентін өзгертуге болады, тіпті оның нөлдік мәніне жетуге болады.

Стабисторлар стабилитрондар тәрізді, кернеуді тұрақтандыруға арналған. Стабилитрондармен салыстырып қарасақ олар диодтың вольт амперлік мінездеменің тура бағытында жұмыс істейді.

### 1.3 Диодтардың басқа түрлері

*Варикаптар.* Бұл электр кернеуімен басқарылатын сыйымдылық элементі ретінде қолданылатын шалаөткізгіш диодтар. Варикаптың сыйымдылығы  $C$  кері кернеудің мөлшеріне байланысты (1.24 сурет). Варикаптың жалпы сыйымдылығы негізгі параметрлері болып табылады, әдетте шағын кері кернеу 2 ... 5 В, және  $K_c$  коэффициенті жабу бойынша сыйымдылық  $K_c = C_{макс} / C_{мин}$  . Кері кернеудің берілген екі мәні үшін. Көп жағдайда  $C=10...500$  пФ және  $K_c = 5...20$ .

Варикаптар. Автоматты түрде жиілікті реттеу үшін қашықтан басқару жүйелерінде қолданылады.



1.24 сурет - Варикап диодтың шартты белгісі мен сипаттамасы

*Сәуле диодтары.* Тікелей ток арқылы өтетін  $p-n$ -түйісінде болатын құбылыстардың негізінде оптикалық сәуле шығаруға қабілетті шалаөткізгіш құрылғыларды алуға болады. Мұндай құрылғылар шалаөткізгіш сәуле диодтары болып табылады. Сәуле диодтарының жұмысы инжекциялық электролюминесценцияға негізделген, яғни тікелей сыртқы кернеуде орналасқан  $p-n$ -түйісінде оптикалық сәуле шығару. Сыртқы энергияның әсерінен атомдардағы электрондар қозу күйіне ауысады, энергияның жоғары деңгейі  $W_2$  метастабильді қозу деңгейі деп аталады. Бұл электрондарды  $W_2$  метастабильді деңгейден қайтарған кезде, бастапқы  $W_1$ , толқын ұзындығы  $\lambda = 1,23(W_2 - W_1)$  қатынасымен анықталатын фотондар шығарылады.

Шалаөткізгіш жарық диодтарының артықшылықтары қыздыру шамдарымен салыстырғанда жоғары тиімділік, салыстырмалы түрде тар сәулелену спектрі және жақсы бағыттау диаграммасы, жоғары өнімділік және төмен қуат кернеуі болып табылады. Мұның бәрі интегралды сұлбалармен үйлесудің ыңғайлылығын, жоғары сенімділікті, беріктік пен технологиялылықты қамтамасыз етеді. Сәулелену спектрі, сондықтан оның түсі қолданылатын жартылай өткізгіш материалға байланысты. Жарықдиодты шамдар жартылай өткізгіш құрылғылар сияқты кремний немесе германия негізінде емес, галлий арсенид-фосфид негізінде жасалады. Жарқыл жарықтығы жарық диодының тікелей тогына пропорционалды. Нақты көрсету үшін бірнеше миллиампер тогы жеткілікті. Жарықдиодты шамдар жеке индикаторлар түрінде және жеті сегментті немесе нүктелік матрицалар түрінде жасалады. Жеті сегментті матрицалар жеті жарқыраған жолақтардан тұрады – сегменттерден тұрады, олардан 0-ден 9-ға дейінгі кез келген санның кескінін синтездеуге болады (мұндай матрицалар, мысалы, сандық көрсеткіші бар электрондық сағаттарда қолданылады). Нүктелік матрицаларда кескін жарқыраған нүктелерден қалыптасады. Нүктелік матрицалар негізінде сіз тек санның бейнесін ғана емес, сонымен қатар кез келген индекстелген белгіні (әріп, арнайы таңба және т.б.) синтездей аласыз.

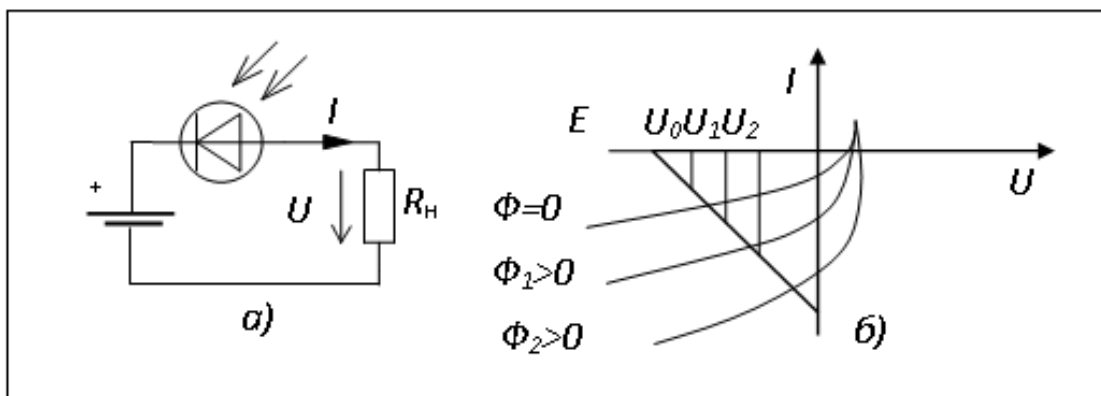
*Фотодиодтар.* Қарапайым фотодиод - бұл қарапайым жартылай өткізгіш диод (1.24, а сурет) оптикалық сәулеленудің  $p-n$ -өтуіне әсер ету мүмкіндігі қамтамасыз етіледі. Тепе-теңдік жағдайында, сәулелену ағыны толығымен болмаған кезде, тасымалдаушылардың концентрациясы, потенциалдың таралуы және фотодиодтың энергетикалық аймақ диаграммасы әдеттегі  $p-n$ -құрылымына толығымен сәйкес келеді. Сәулелену  $p-n$ -ауысу жазықтығына перпендикуляр бағытта әсер еткен кезде, тыйым салынған аймақтың енінен үлкен энергиясы бар фотондарды сіңіру нәтижесінде  $N$ -аймақта электронды тесік булары пайда болады. Бұл электрондар мен тесіктер фототаспа деп аталады. Фототасқыштардың  $n$  -аймаққа терең таралуы кезінде электрондар мен тесіктердің негізгі үлесі рекомбинацияға уақыт жоқ және  $p-n$ -ауысу шекарасына жетеді. Мұнда фототасқыштар  $p-n$ -өтпелі электр өрісімен бөлінеді, тесіктер  $p$ -аймағына өтеді, ал электрондар ауысу өрісін жеңе алмайды және  $p-N$ -Өтпелі және  $N$ -аймақ шекарасында жиналады.

Осылайша,  $p-n$ -ауысу арқылы өтетін ток негізгі емес тасымалдаушы тесіктердің дрейфіне байланысты. Фототасқыштардың дрейфтік тогы фототок деп аталады. Фототаспа-тесіктер зарядталады- $N$ -аймаққа қатысты оң аймақ, ал фототаспа-электрондар- $n$ -аймақ  $p$ -аймағына қатысты теріс. Пайда болатын ықтимал айырмашылық фото ЭМӨ ЕҒ деп аталады. Фотодиодта пайда болған ток кері, ол катодтан анодқа бағытталған, оның мәні неғұрлым үлкен болса, соғұрлым жарық болады.

Фотодиодтар екі режимнің бірінде жұмыс істей алады – электр энергиясының сыртқы көзі (фотогенератор режимі) немесе электр энергиясының сыртқы көзі (фото түрлендіргіш режимі).

Фотогенератор режимінде жұмыс істейтін фотодиодтар көбінесе күн сәулесінің энергиясын электр энергиясына айналдыратын қуат көзі ретінде қолданылады. Олар күн батареялары деп аталады және ғарыш кемелерінде қолданылатын күн батареяларының бөлігі болып табылады. Кремнийлі күн батареяларының тиімділігі шамамен 20% құрайды, ал пленкалы күн батареялары үшін ол әлдеқайда маңызды болуы мүмкін. Күн батареяларының маңызды техникалық параметрлері - олардың шығыс қуатының күн батареясының массасы мен ауданына қатынасы. Бұл параметрлер сәйкесінше 200 Вт/кг және 1 кВт/м<sup>2</sup> мәндеріне жетеді.

Фотодиод Фото түрлендіру режимінде жұмыс істеген кезде қуат көзі құлыптау бағытында тізбекке қосылады (1.24, а сурет). Фотодиодтың кері тармақтары әртүрлі жарықтарда қолданылады (1.24, б сурет).

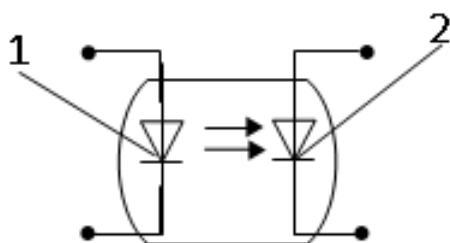


1.25 сурет - (А) және ВАХ (б) Фото түрлендіру режиміндегі фотодиодты қосу сұлбасы

$R_n$  жүктеме резисторындағы ток пен кернеу фотодиодтың ВАХ қиылысу нүктелері және  $R_n$  резисторының кедергісіне сәйкес келетін жүктеме сызығы бойынша графикалық түрде анықталуы тиіс. Жарық болмаған кезде фотодиод әдеттегі диод режимінде жұмыс істейді. Германий фотодиодтарындағы қара ток 10...30 мкА, кремнийде 1...3 мкА.

Егер фотодиодтарда жартылай өткізгіш зерер диодтарындағыдай заряд тасымалдаушыларының көшкін көбеюімен бірге қайтымды электр тогы қолданылса, онда фототүсірілім, демек сезімталдық айтарлықтай артады. Көшкін фотодиодтарының сезімталдығы қарапайым фотодиодтарға қарағанда бірнеше есе көп болуы мүмкін (Германияда – 200 -300 есе, кремнийде – 104 – 106 есе). Көшкінді фотодиодтар жылдам әрекет ететін фотоэлектрлік құрылғылар болып табылады, олардың жиілік диапазоны 10 ГГц-ке жетуі мүмкін. Көшкінді фотодиодтардың кемшілігі-әдеттегі фотодиодтармен салыстырғанда Шудың жоғары деңгейі.

*Оптрондар.* Светодиодтар мен фотодиодтар көбінесе жұптап қолданылады. Бұл ретте олар бір корпуста фотодиодтың жарық сезгіш алаңы жарық диодының сәуле шығаратын алаңына қарама-қарсы орналасатындай етіп орналастырылады. «Жарық диоды-фотодиод» жұптарын қолданатын жартылай өткізгіш құрылғылар оптрондар деп аталады (1.26 сурет).



1 – сәуле диоды, 2 - фотодиод

1.26 сурет – Оптрон

Мұндай құрылғылардағы кіріс және шығыс тізбектері электрлік байланысты емес, өйткені сигнал беру оптикалық сәуле арқылы жүзеге асырылады.

Электрондық есептеу құрылғыларында оптрондарды пайдалану жабдықтың шуылға төзімділігін арттырудың негізгі әдістерінің бірі болып табылады.

Оптрондардағы қабылдағыштар ретінде фоторезисторлар, фототранзисторлар және фототиристорлар қолданылады.

Қазіргі уақытта оптоэлектрондық ИМС кеңінен қолданылады – қосымша үйлестіру және күшейту сұлбалары бар бір немесе бірнеше оптопаралар.

Оптрондар импульстік трансформаторлардың, реленің, қосқыштардың, ауыспалы резисторлардың және механикалық қозғалатын контактілері бар және РР және микроэлектрондық құрылғылармен нашар үйлесетін басқа компоненттердің орнына сәтті қолданылады.

## **1.4 Биполярылық транзисторлар**

### **1.4.1 Биполярылық транзисторлардың құрылымы мен құрылысы**

Биполярылық транзистор кезектесе орналасқан әр типті электр өткізгіш қасиеті бар *үш аймақтан* тұратын, *екі p-n – аусуы* бар, электр сигналын күшейте алатын шалаөткізгіш аспап. Ал заряд тасымалдаушыларының эмиттерден коллекторға қарай қозғалысын реттейтін - *база*.

Ол транзистордың *реттеуші, басқарушы электроды* болып саналады.

Әр аймақтан ток жүретін шықпалар (электродтар) шығарылып, олар *эмиттер (Э), коллектор (К) және база (Б)* деп аталады.

Латын тілінен аударғанда *emitto - эмиттер - «шығарушы»* да, ол транзисторды заряд тасушыларымен қамтамасыз ететін электрод болып табылады;

*collector- колектор - «жыйнаушы»* ретінде эмиттерден шыққан заряд тасушыдарын қабылдайды.

Ал заряд тасымалдаушыларының эмиттерден коллекторға қарай қозғалысын реттейтін - *база*.

Ол транзистордың *реттеуші, басқарушы электроды* болып саналады.

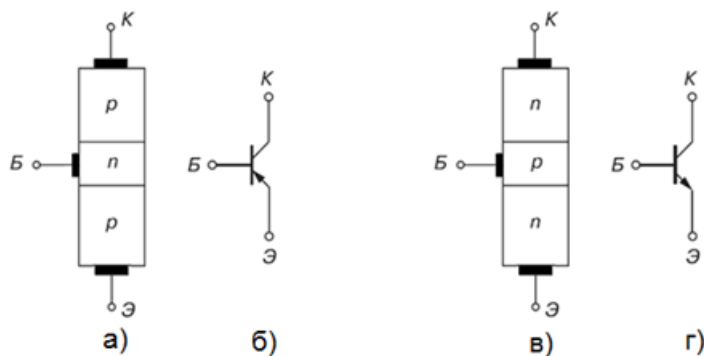
*n* және *p* областарының өзара орналасуына байланысты олар *n-p-n* немесе *p-n-p* болып екіге жіктеліп, сұлбаларда өздеріне тән шартты белгілерімен кескінделеді.

Тіке бағытты ығысқан бірінші асу *эмитерлік* деп, ал осы өткелекке жанасқан *n* (немесе *p-n-p* транзисторында *p*) обылысын – эмитер деп атайды.

Кері бағытты ығысқан екінші асу *коллекторлық* деп, ал осы асуға жанасқан *n* (немесе *p-n-p* транзисторында *p*) обылысын – *коллектор* деп атайды. Екі ауысудың ортасындағы облысты – *база* деп атайды.

Салыстырып қарағанда, *n-p-n* және *p-n-p* транзисторларының жалпы жұмыс істеу принциптері бірдей, айырмашылығы тек біріншісінде, ток түзетін заряд тасымалдаушылары негізінен электрондар да, екіншісінде – кемтіктер.

Заряд тасымалдаушыларын жинау үшін *n-p-n* транзисторының коллекторына (электрондарды қабылдау үшін) оң кернеу түсіріледі де, *p-n-p* транзисторының коллекторына теріс кернеу беріледі. Олардың база кернеуі мен токтарының бағыттары да қарама-қарсы бағытта болады.



1.27 сурет - *p-n-p* (а)және *n-p-n* (в) типті транзисторлардың шалаөткізгіш құрылымы; олардың электрондық сұлбалардағы шартты белгілері (б, г)

Шеткі аймақтардың бірі әрдайым күшті легирленген, оны *эмитер* деп атайды, оның мақсаты – негіз деп аталатын құрылымның ортаңғы аймағына тасымалдаушыларды енгізу. Тағы бір аймақ *коллектор* деп аталады, ол эмитерге қарағанда аз легирленген және негізгі аймақтан тасымалдаушыларды алуға арналған.

Эмитер мен база арасындағы электронды-кемтік ауысуы *эмиттер ауысуы* деп аталады. Базалық-коллекторлық шекарадағы ауысу *коллекторлық ауысу* деп аталады. Бұл ауысу базаға енгізілген заряд тасымалдаушыларды жинайды және оларды коллекторлық аймаққа жібереді. Осылайша, эмитерлік ауысу функциясы — заряд тасымалдаушыларын базаға енгізу (шығару), Ал коллекторлық ауысу функциясы — базалық қабаттан өткен заряд тасымалдаушыларын жинау. Эмитер арқылы өтетін зарядты тасымалдаушыларды коллекторда толығымен жинауы үшін коллекторлық ауысу ауданы эмитер ауысу аймағының ауданына қарағанда көбірек етіп жасалады.

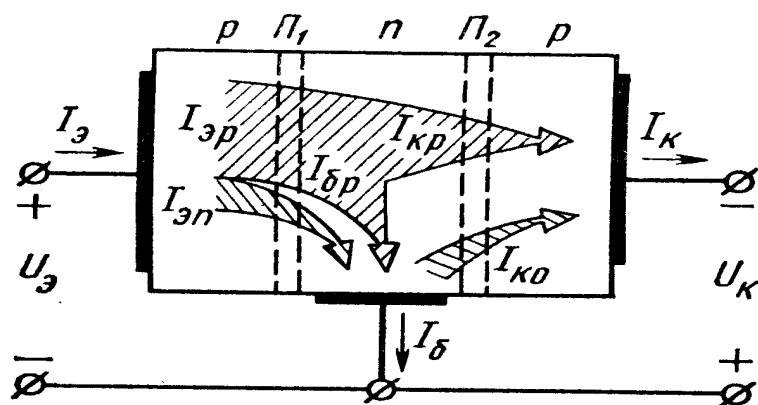
Ауысулар арасындағы қашықтық (базаның ені) өте аз: жоғары жиілікті транзисторларда ол 10 микрометрден аз (1 мкм = 0,001 мм), ал төмен жиілікті транзисторларда ол 50 мкм-ден аспайды.

*n-p-n* және *p-n-p* транзисторларының жұмыс істеу принциптері бірдей, айырмашылығы тек біріншісінде, ток түзетін заряд тасымалдаушылар электрондар да, екіншісінде – кемтіктер; осыған байланысты аталған заряд

тасымалдаушыларды жинау үшін  $n-p-n$  транзисторының коллекторына (электрондарды қабылдау үшін) оң кернеу түсіріледі де  $p-n-p$  транзисторының коллекторына теріс кернеу беріледі.

#### 1.4.2 Биполярлы транзистордың жұмыс принципі және оның негізгі параметрлері.

Биполярлы транзистордың жұмыс принципін  $p-n-p$  типті құрылым мысалында қарастырамыз (1.28 сурет). Бұл транзистордың түрі өндірісте жиі кездеседі. Ол үш  $p$  және  $n$  аймақтарынан тұрады.



1.28 сурет - Биполярлы транзистордың жұмыс принципіне түсініктеме

Транзисторлық құрылым қабаттарында заряд тасымалдаушылардың концентрациясының таралуы және сыртқы кернеулерге қосылмаған кезде  $p-n-p$  – ауысуларында көлемдік зарядтардың пайда болатын потенциалдар айырмасы келесідей болуы мүмкін:

1) Транзистордың эмитері мен коллекторлық қабаттарындағы негізгі заряд тасымалдаушылар концентрациясының қатынасы бір-біріне тең деп санауға болады.

2) Базадағы негізгі заряд тасымалдаушылардың концентрациясы эмитердегі негізгі заряд тасымалдаушылардың концентрациясынан әлдеқайда аз болуы керек. Эмиттер мен базалық қабаттардың негізгі заряд тасымалдаушыларының концентрацияларындағы айырмашылық өте маңызды болып келеді, өйткені ол транзистордың параметрлеріне, атап айтқанда  $\alpha$  ток беру коэффициентіне әсер етеді.

Сонымен, транзистор үшін базаның негізгі қабаты эмиттерден гөрі жоғары омдық кедергілі болуы керек. Бұған  $n$  типті жоғары омдық бастапқы шалаөткізгішті қолдану арқылы қол жеткізіледі.

Транзисторда сыртқы кернеулер болмаған кезде оның үш қабатының бөліну шекараларында көлемді зарядтар пайда болады да, ішкі электр өрістерді туғызып қабаттар арасында ішкі барьерлік потенциалдар айырмасына әсер етеді. Ауысулардың әрқайсысында барьерлік потенциалды қарама-қарсы бағытта

ауысулар арқылы қозғалатын заряд тасымалдаушыларының диффузиялық және дрейф ағындарының тепе-теңдігін қамтамасыз ететіндей етіп орнатылады, яғни олар арқылы өтетін ток нөлге тең болады. Эмиттер мен коллекторлық қабаттардағы негізгі (және негізгі емес) заряд тасымалдаушылардың концентрациясы бірдей болғандықтан, р-п ауысуларындағы ықтимал кедергілер тең болады.

### 1.4.3 Биполярлы транзистордың жұмыс режимдері.

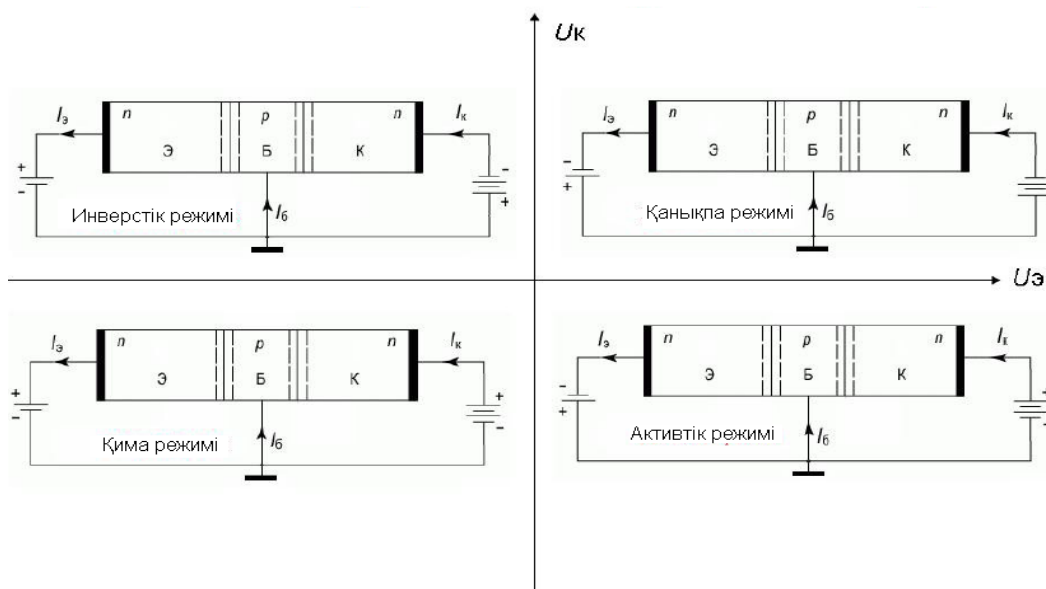
Салыстырып қарағанда, *n-p-n* және *p-n-p* транзисторларының жалпы жұмыс істеу принциптері бірдей, айырмашылығы тек біріншісінде, ток түзетін заряд тасушылары негізінен электрондар да, екіншісінде – кемтіктер.

Транзистордың электродтарына түсірілген кернеулерге байланысты транзистор әртүрлі, қанығу, белсенді (күшейту), инверстік және қима режимдерде жұмыс істей алады.

Транзистордың жұмыс режимдерінің орындалу шарттары (1.28 сурет):

- 1) Белсенді (күшейту) режимі - «эмиттер-база» *ашық*, «коллектор-база» *жабық*.
- 2) Инверстік режимі - «эмиттер-база» *жабық*, «коллектор - база» *ашық*.
- 3) Қанықпа режимі - «эмиттер - база» *жабық*, «коллектор - база» *ашық*.
- 4) Қима режимі - «эмиттер – база» *жабық*, «коллектор - база» *жабық*.

Транзистордың *p-n* ауысуларын сыртқы кернеу көздеріне қосу әдісіне байланысты ол белсенді (күшейту) режимде, қима режимде, немесе қанықтыру режимде жұмыс істей алады.



1.29 сурет - Транзисторды жұмысқа қосу режимдері



*Қима режимінде* эмиттер және коллекторлардың *p-n* ауысулары сыртқы қоректендіру көздеріне кері бағыттарда қосылады. Бұндай жағдайда екі *p-n* ауысулары жабық жағдайларда болады да, транзистордың бойынан тек қана эмиттер мен коллектордың кері токтары жүреді.

*Қанықпа режимінде* эмиттер және коллекторлардың *p-n* ауысулары сыртқы қоректендіру көздеріне тіке бағыттарда қосылады. Бұндай жағдайда екі *p-n* ауысулары ашық жағдайларда болады да, транзистордың бойынан эмиттер мен коллектордың қанықпа токтары жүреді.

Қима және қанықпа режимдері транзисторлардың импульстік сұлбаларда жұмыс істегенде және ажыратып-қосу режимдерінде қолданылады.

*Белсенді немесе күшейту режимде* заряд тасушыларын жинау үшін *n-p-n* транзисторының коллекторына (электрондарды қабылдау үшін) оң кернеу түсіріледі де, *p-n-p* транзисторының коллекторына теріс кернеу беріледі.

Олардың база кернеуі мен токтарының бағыттары да қарама-қарсы бағытта болады.

Суретте көрсетілгендей эмиттер тогы ( $I_э$ ) коллектор ( $I_к$ ) және база ( $I_б$ ) токтарының қосындысына тең:  $I_э = I_к + I_б$ . Оның үстіне  $I_к$  -ның сан мәні  $I_э$  - ге жақын да,  $I_б$  өте аз болады.

Транзистордың күшейткіштік қасиетінің өзі осында: өте аз шамалы база тогымен үлкен коллектор тогын басқаруға мүмкіндік аламыз.

Ал база тогының пайда болу себебі, ондағы электрондар мен кемтіктердің бір-бірімен қосылып, өзара бейтарап бөлшектер құруы болғандықтан (бұл процесті *рекомбинация* деп айтады), осы құбылыстың әсерін азайтуға тырысады.

Ол екі түрлі жолмен жүргізіледі:

- *біріншіден*, база аймағының қоспа мөлшерін эмиттер қоспасынан әлдеқайда аз жасап, эмиттерден келген) электрондарға базадан табылатын кемтіктерді жеткіліксіз етеді;

- *екіншіден*, эмиттерден келген электрондардың базадағы кемтіктермен рекомбинацияға түсіп үлгермей коллекторға бірден өтіп кетуі үшін базаның енін өте тар жасайды (микрондармен өлшенеді).

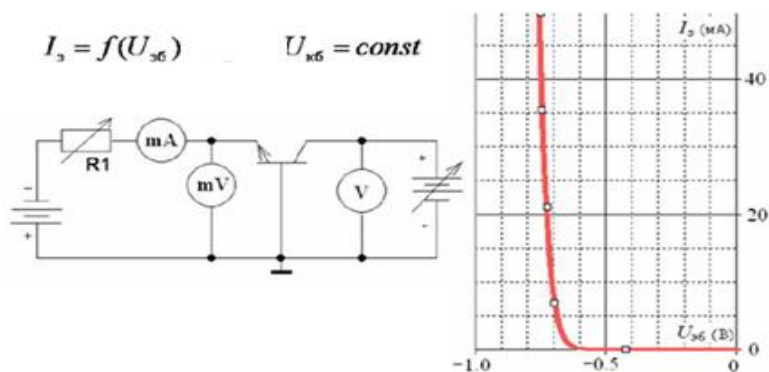
Міне, осы айтылған екі себептің арқасында база тогының шамасын өте азайтып, транзистордың күшейткіштік қасиетін әлдеқайда арттыруға болады.

#### **1.4.4 Биополяр транзисторының қосылу сұлбалары мен сипаттамалары.**

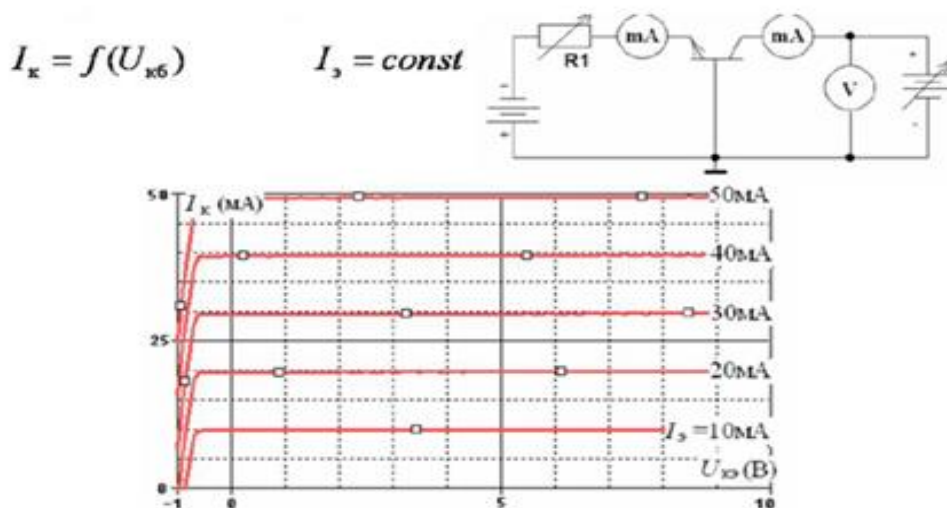
Сұлбаларда кіріс, шығыс нүктелерінің өзара орналасуына байланысты транзистор әртүрлі қосылу сұлбаларында жұмыс істеуі мүмкін.

Мысалы, транзистордың ену нүктесі эмиттерде, шығу нүктесі коллекторда болса, ол ортақ нүктесінің базада болатынына байланысты *ортақ базалы (ОБ)* сұлба деп аталады.

Эмиттері ортақ болса, *ортақ эмиттерлі (ОЭ)*, ал коллекторы ортақ болса, *ортақ коллекторлы (ОК)* сұлба болып саналады.



1.30 сурет - Ортақ база арқылы қосылған транзистордың кіріс сипаттамасы



1.31 сурет - Ортақ база арқылы қосылған транзистордың шығыс сипаттамасы

1.3 кесте - Күшейткіш каскадтарда биполяр транзисторының қосылу сұлбаларын салыстыру

Қосылу сұлбасы	Кіріс кедергісі	Шығыс кедергісі	Ток беру коэффициенті	Кернеу коэффициенті	Қуат күшейту
ОБ	Төмен (ондаған Ом)	Өте жоғары (ондаған МОм)	0,92 – 0,999	жоғары	жоғары

ОЭ	төмен	Жоғары (жүздеген кОм)		жоғары	өте жоғары
ОК	жоғары	Төмен жоғары	10 -1000	<1	жоғары

## 1.5 Өрістік транзисторлар

### 1.5.1 Өрістік транзисторлардың түрлері.

Өрістік транзистор электр өрісімен (токсыз) басқарылады. Кіріс кедергісі өте жоғары болғандықтан сигнал көзінен токпен қуат жұмсамайды.

Өрістік транзистордың негізі шалаөткізгіштен жасалған екі шығарғышы (электроды) бар  $n$  немесе  $p$  типті электр өткізгіштік қасиеті бар арна болып келеді. *Арна* деп транзистордың орталық облысын атайды.

Өрістік (униполярлы) класқа жұмыс принципі тек бір белгінің заряд тасымалдаушыларын (электрондар немесе кемтіктер) пайдалануға негізделген транзисторлар кіреді. Өрстік транзисторлардағы токты басқару электр өрісінің әсерінен транзистордың тогы өтетін арнаның өткізгіштігін өзгерту арқылы жүзеге асырылады. Нәтижесінде униполярлы транзисторларындағы өріс эффектiсi деп те аталады.

Арнаны құру әдісіне сәйкес  $p-n$ -өткелі бар өріс транзисторлары, кіріктірілген канал және индукцияланған канал ерекшеленеді. Соңғы екі түрі МДШ (метал-диэлектрик-шалаөткізгіш) транзисторларының түрлеріне жатады.

Бұл құрылғыларға деген қызығушылықтың артуы олардың жоғары өнімділігіне, қажетті параметрлердің жақсы көбеюіне, сондай-ақ биполярлы транзисторлармен салыстырғанда арзан болуына байланысты. Электр параметрлерінен өріс транзисторлары жоғары кіріс кедергісімен ерекшеленеді.

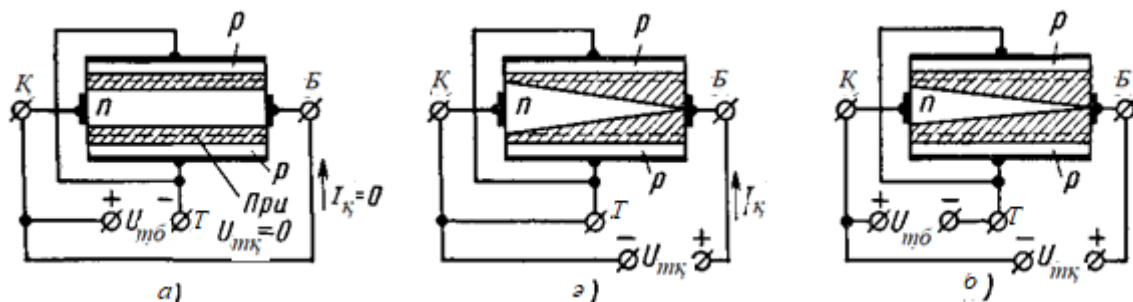
Негізгі заряд тасымалдаушылар кіретін электродты *бастау* (исток) деп, ал оларды арнадан шығаратын электродты *құйма* (сток) деп атайды. Каналдың көлденең қимасының ауданын реттеу үшін қолданылатын электрод *тиек* (затвор) деп атайды.

Өрістік транзистордың екі түрі бар:  $p-n$  ауысуы бар өрістік транзистор және оқшауланған (изоляцияланған) тиекті өрістік транзистор.

Аспаптың атауы	Белгіленуі
Басқарылатын $p-n$ ауысуы бар $n$ -арналы өрістік транзистор	
Басқарылатын $p-n$ ауысуы бар $p$ -арналы өрістік транзистор	
Оқшауланған тиекті қондырылған $n$ -арналы өрістік транзистор	
Оқшауланған тиекті қондырылған $p$ -арналы өрістік транзистор	
Оқшауланған тиекті индукцияланған $n$ -арналы өрістік транзистор	
Оқшауланған тиекті индукцияланған $p$ -арналы өрістік транзистор	

### 1.5.2 p-n ауысуы бар өрістік транзистор.

Транзистордың бұл түрі *бір ғана p-n ауысуынан* тұрады. p-n ауысуы бар өрістік транзистордың қарапайым құрылысы төменгі суретте келтірілген: негізгі n кремний кристалын екі жағынан p аймағы, яғни тиек (Т) (затвор) қапсыра қоршап тұр. p-n ауысулы өрістік транзистордың жұмыс істеу принципіне түсініктеме 1.32-суретте келтірілген. Олардың ортасында орналасқан n аймағы *арна* деп аталады да, оның ток тізбегі жалғанған екі шетінің бірі *бастау* (Б) (исток), екіншісі *құйма* (К) (сток) деп аталып, токтың шығу және жиналу көздерін көрсетеді.



1.32 сурет - p-n ауысулы өрістік транзистордың жұмыс істеу принципіне түсініктеме

p - n ауысулы өрістік транзистордың жұмыс істеу принципі мынадай.

Тиекке  $U_{\text{бт}}$  теріс кернеу беретін болсақ, онда кәдімгі p-n ауысуының кері қосылуындағыдай оның ені арта түседі. Ауысу ішінде жылжымалы заряд бөлшектерінің болмайтындығын ескере отырып, оны диэлектрикке балауға болады.

Онда осы диэлектрик аймағы арнаның енін екі жағынан қусыра қыса түсіп, оның ток өткізу қабілетін азайтып, оның кедергісін арттырады.

Сонымен тиек кернеуінің арқасында арна енін өзгерте отырып, бастаудан құймаға ағатын ток күшінің шамасын реттеуімізге, басқаруымызға болады (1.32 сурет). Транзистордың басқару принципінің мәні осында.

Ал енді құймадан ток алу үшін оған қандай бағытта кернеу беруіміз керек. Егер тиекте (бастаумен салыстырғанда) кернеу жоқ деп есептесек, онда түсірілген құйма кернеуінің арқасында p-n ауысуы тағыда кері қосылады да, оның да, оның өзгеруі құйма түсінен өтеді. Бұл жағдай 1.32, б-суретте көрсетілген.

Сонымен тиек пен құйма кернеулерінің көмегімен арна енін өзгерте отырып, керегімізше құйма тоғын шамасын реттеуге, басқаруымызға қолымыз жетеді.

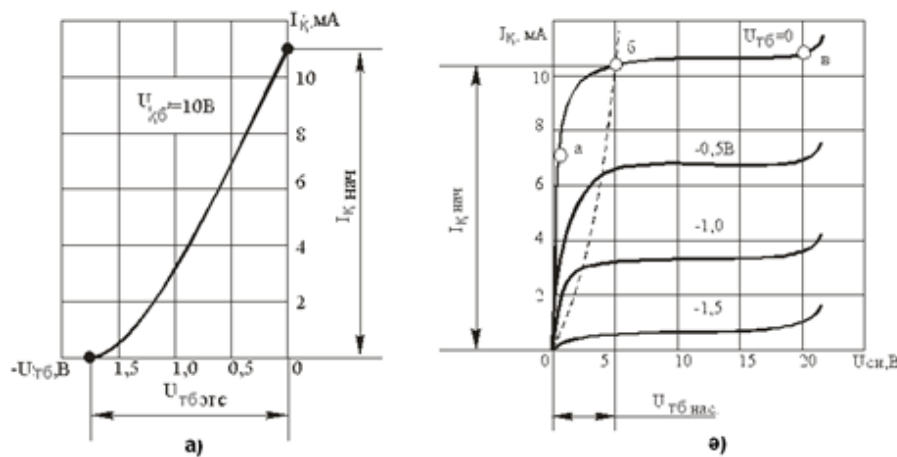
Жоғарыда тиек аймағына теріс полюсты ернеу беріледі деп есептедік. Ал оған оң бағыттағы кернеу түсірсек қалай болар еді? Транзистор жұмыс қабілетін сақтап қалар ма еді? Бұл сұраққа жеңіл жауап беру үшін тиек-бастау өңіріне мұқият зер салғанымыз жөн. Егер осы өңірді p-n ауысуы деп қарап, оған тура

бағытта кернеу түсірсек, онда транзистор кірісі тура бағытта қосылған диодқа сәйкес келеді. Сондықтан да тиек-бастау аралығын тура бағытта ығыстыратын кернеу бағытын өрістік транзистордың  $p-n$  ауысулы түрінің жұмыс істеу қасиетіне қайшы келетін жағдай деп есептейміз. Бұл транзистордың құйма-тиектік сипаттамасынан да көрініп тұруы керек.

Мысалы, 1.33, а - суретте 2П303 транзисторының осы сипаттамасы тиек кернеуінің транзистордың тек теріс бағытына арналып сызылған. Айтылып отырған транзистордың құймалық сипаттамасы 1.33, ә - суретте көрсетілген.

Арнамыз  $n$  текті болып, оның жылжымалы заряд тасушылары қосылатын электрондар болса, құймадан ток алу үшін оған әрине оң полюсті  $U_{бк}$  кернеу беруіміз керек.

Сонымен, тиек пен құйма кернеулерінің көмегімен канал енін өзгерте отырып, керегімізше құйма тогының шамасын реттеуге, басқаруымызға қолымыз жетеді.



1.33 сурет -  $p-n$  ауысулы өрістік транзисторының құйма-тиектік (а) және құймалық (ә) сипаттамалары

### 1.5.3 Оқшауланған тиекті металл-диэлектрик-шалаөткізгіш транзисторлары

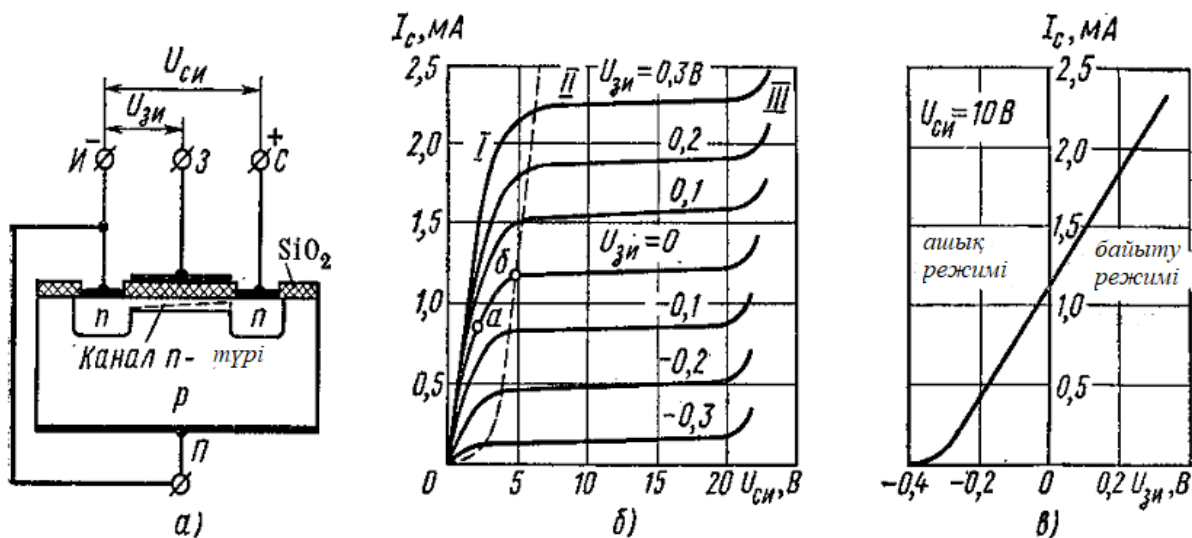
Металл-диэлектрик-шалаөткізгіш транзисторлары (МДШ).

МДШӨ деген транзистордың құрылысы *металл, диэлектрик және жартылай өткізгіш қабаттарынан* тұрады. Көптеген жағдайда транзистор кремнийден жасалып, ал диэлектрик ретіне кремний тотығы ( $SiO$ ) қолданылады. МДШ транзисторының бір түрі - индукцияланған каналды транзистордың құрылысы төменгі 1.34, а - суретте кескінделген.

Тиекке ток көзінің теріс полюсы қосылса (1.34 сурет) түсірілген кернеудің кесірінен тиектің астындағы электрондар одан алшақтай түседі. Табан ретінде пайдалынған  $n$  – текті шалаөткізгішінде кемтіктер аз болғанмен оған тартыла түседі. Кернеудің белгілі бір шамасында жеткенде (ток пайда болу кернеуі  $U_n$  -

деп аталады), кемтіктер тиектің астынан бастаудан құймаға дейін толық жабады да, олардың арасында белгілі бір жол (арна) ашылғандай болады (р – қабат). Енді бастау мен құйманың аралығына құйма кернеуін беретін болсақ, онда осы электродтарының арасында ток жүре бастайды. (Қаралып отырған жағдайда оң кеміктерді құймаға жинау үшін оған теріс кернеу түсіруіміз керек).

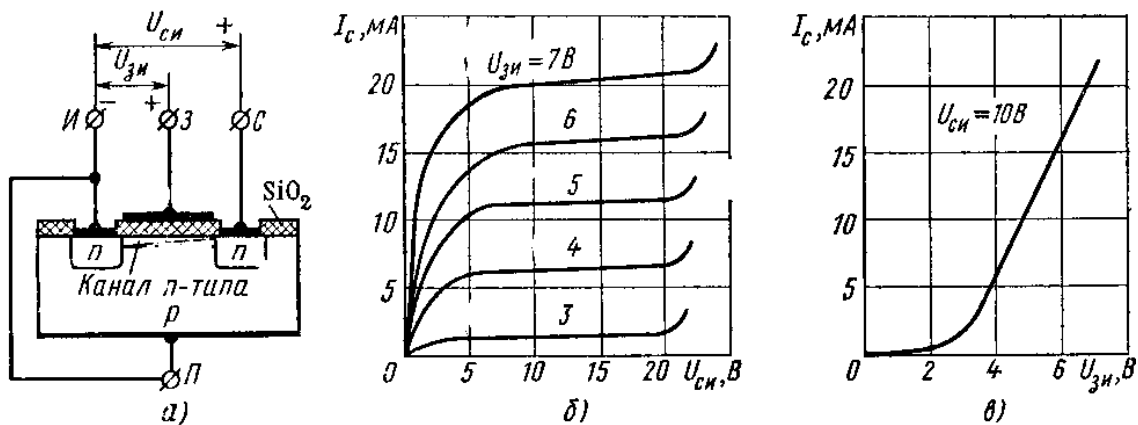
Бастапқы кезде болмаған арнаның кейіннен, тиек кернеуінің әсерінен пайда болуын, яғни индукциялануын атап өту үшін бұл транзистор индукцияланған арналы МДШ транзистор деп аталды.



1.34 сурет - МДШ транзисторының бір түрі - индукцияланған арналы транзистордың құрылысы және сипаттамалары

1.34-суретте қондырылған *n*-типті арналы МДШ-транзисторының құрылысы (а); және сипаттамалары (б, в) көрсетілген. Атына сәйкес, бұл транзистордың арнасы алдын ала қондырылып, технологиялық әдіспен арнайы жасалынады. Сондықтан да бұл транзистордың тиегіне кернеу түсірмей жатып-ақ, құйма тогы пайда болуы мүмкін. Оның үстіне тиекке теріс кернеу беретін болсақ, онда *n* арнадан электрондар аласталынып, оның өткізгіштігі төмендейді де, тогының шамасы азаяды; ал кернеу оң бағытпен түсірілсе, электрондар жан-жақтан арнаға тартыла түсіп, оны заряд тасымалдаушыларын қанықтыра отырып құйма тогының шамасын арттырады. Сондықтанда бұл режимді байыту режимі деп атайды, ал алдыңғысын кедейлену режимі деп атайды. Осы тұрғыдан алғанда индукцияланған арналы транзистор тек байыту режимінде ғана жұмыс істей алады.

1.35-суретте қондырылған *n*-типті арналы МДШ-транзисторының құрылысы (а); және сипаттамалары (б, в) көрсетілген.



1.35 сурет - Қондырылған *n*-типті арналы МДШ-транзисторының құрылысы (а); және сипаттамалары (б, в)

## 1.6 Тиристорлар

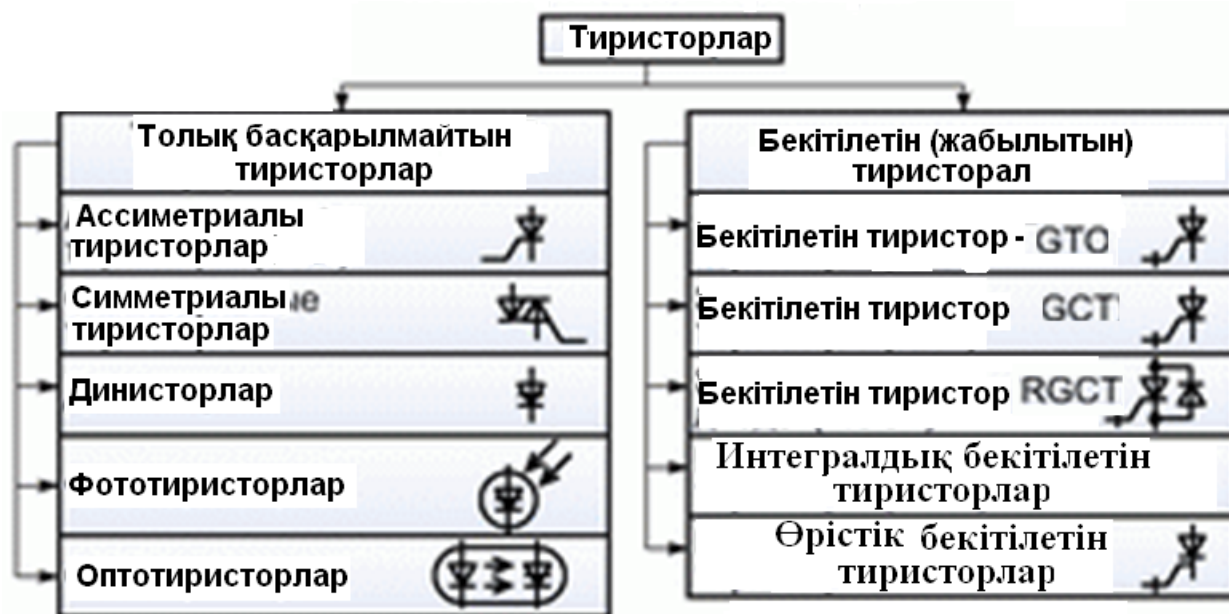
### 1.6.1 Тиристорлар жайлы түсінік

Тиристор — үш немесе одан да көп *p-n* өткелегінен (ауысуынан) тұратын, тұрақты екі күйі бар және бір күйден екінші күйге басқару импульсі арқылы ауысып-қосылатын мүмкіндігі бар электрондық аспап.

Өткен тарауларда қаралған транзистор үздіксіз басқарылатын электрондық аспап. Олай дейтініміз басқару тогын өзгерте отырып, транзисторды керегінше үздіксіз ашып немесе жаба аламыз. Онымен салыстырғанда тиристордың тек екі күйі ғана бар: толық ашық, немесе толығымен жабық. Сондықтан да оны үздікті электронды аспаптар қатарына жатқызу керек.

Тиристор түрлерінің сұлбалық шартты белгілері толығымен 1.36-суретте беріліп отыр. Тиристорлар электродтар санына қарай екі электродты динистор және үш электродты тринистор болып жіктеледі.





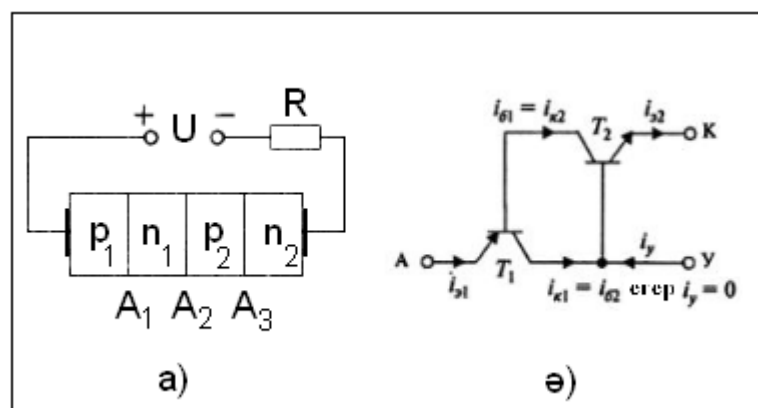
1.36 сурет - Тиристорларды топтау

Динистордың екі ғана электроды (анод пен катод) болғандықтан, оның кернеу түсірілетін кірісі мен шығысы бір болып, басқарылу мүмкіншіліктерін шектеп, қолдану ауқымдарын тарылтады. Тринисторда да шығыс кернеулері анод пен катодтан алынғанымен, оны меңгеру басқару электродының көмегімен атқарылып, оның пайдалану мүмкіншіліктерін кеңейтеді. Басқару электроды арқылы тиристордың тек қосылуы орындалып, ал оның тогын тоқтату анод арқылы жүргізілсе, мұндай тиристор бір операциялық, немесе *толық басқарылмайтын*, тіпті *жабылмайтын тиристор* деп аталады. Токты қосу да, ажырату да басқару электродының көмегімен атқарылатын болса, ондай тиристор екі операциялық (қосылу, ажыратылу) *толық басқарылатын, жабылатын тиристор* деп аталады. Толық басқарылатын тиристорды өндірісте пайдалану ыңғайлы болғанымен, олардың көпшілігі әзірге төменгі қуатты болып, өндірісте қанатын кең жая алмай отыр. Әйтсе де оны жақын болашақтың үлкен үміт күттіретін аспабы десек қателеспейміз.

Екі тиристорды қарама-қарсы параллель қоссақ онда айнымалы токты екі бағытта да өткізіп, оны реттей алатын симметриялық тиристорды, яғни симисторды аламыз. Шетел әдебиеттерінде оның екі электродтысы - *диак* деп, үш электродтысы - *триак* деп аталады.

### 1.6.2 Динистордегі физикалық процестер

Динистор құрылымындағы *p-n* ауысуларының өзара орналасуы мен ондағы заряд тасушыларының ағындары 1.37, а-суретте көрсетілген.



1.37 сурет - Динистордың құрылымы (а) және оның транзисторлық балама сұлбасы (ә)

Динистор құрылымы үш  $p-n$  ауысуынан ( $A_1, A_2, A_3$ ) тұрады. Сыртқы ток көзінің оң полюсі анодқа қосылғанда  $A_1$  және  $A_3$  ауысулары тұра ығысады да, ал  $A_2$  ауысуы кері ығысады.  $A_1$  мен  $A_3$ -те инжекция басталып,  $A_1$ -де кемтіктер ағыны (тогы)  $I_p$ ,  $A_3$ -те электрондар ағыны  $I_n$  (ток бағыты кері бағытталған) пайда болып, олар көрші аймақтарға ( $n_1$  және  $p_2$ ) еніп, тіпті өз екпіндерімен одан арғы аймақтарға ( $p_2$  және  $n_1$ ) да өте бастайды. Осының салдарынан  $p_2$  аймағында кемтіктер пайда болып, ал  $n_1$  аймағына электрондар келіп қосылып, ондағы негізгі заряд тасушылар санын көбейтеді. Олай болса,  $p_2$ -де кемтіктердің оң зарядтарының көбеюі,  $n_1$  - де электрондардың теріс зарядтарының көбеюі қандай өзгерістерге екеп соқтыруы мүмкін?! Әрине, осы зарядтарды бейтараптандыру үшін көрші қабаттардан қарама-қарсы заряд тасушылар ағыны пайда болар еді:  $n_2$  аймағынан қосымша электрондар, ал  $p_1$  аймағынан қосымша кемтіктер қозғалысы. Егер осы қосымша тартылған заряд тасушылар саны бастапқы заряд тасушылар санынан артық болса, онда бұл процесс үсті-үстіне үдей түсіп,  $p_2$  аймағында шектен тыс оң зарядтар,  $n_1$  аймағында электрондар жиналып, орталық  $A_2$  ауысуының тура бағытта ауысуына (сыртқы кернеудің  $A_2$ -ге теріс бағытта түскеніне қарамастан) әкеп соғар еді. Сонымен,  $A_1, A_2, A_3$  ауысуларының бәрі бірдей тура қосылуға ығысып, динистор шексіз ток өткізе бастар еді. Токтың бұдан кейінгі кедергісі (сыртқы жүктеме кедергісі болмаған кездегі) жартылай өткізгіш қабаттарының ( $p_1, n_1, p_2, n_2$ ) өзіндік кедергілерімен ғана анықталып, олардың өте аз шама болуына байланысты, динистор токты шексіз үлкен шамада өткізіп жатыр деп есептеуімізге болар еді.

Жоғарыда айтылған үдемелі процестің пайда болу себебі, кейінгі заряд тасушыларының алғашқы заряд тасушылар санының артық болуынан. Ал, егер кейінгі заряд тасушыларының саны алғашқыларының санынан кем болса ше? Әрине, онда заряд тасушылар саны бірте-бірте кеми түсіп, олардың мүлдем жойылуына әкеп соғар еді. Бұл жағдайда динистор ток өткізбейтін күйге ауысады, яғни ажыратылады. Бұл оның тұрақты екінші күйі. Ендігі туатын сұрақ: осы екі күйді бір-біріне қалай ауыстырып отыруға болады, яғни ол үшін

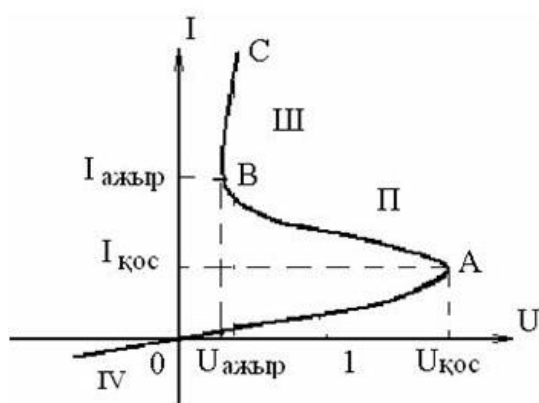
динисторды қалай қосып, ажыратуға немесе ток өткізетін күйден ток өткізбейтін күйге (немесе керісінше) ауыстыруға болады? Бұл сұрақтың жауабы беріліп те қойылды: егер ток көзі қосылғанда, оның әсерінен пайда болған заряд тасушыларының саны алғашқыларынан артық болса, онда динистордың қосылу күйіне көшкені. Осы шарттың орындалу мүмкіндігін математикалық тұрғыдан қарастырып көру үшін динистор құрылымының (1.37,а сурет) кез келген қимасындағы токтар қатынасын алуға болады (қималар бір-бірімен тізбектеле қосылғандықтан, ондағы токтар шамасы тұрақты).

Енді, мысал ретінде орталық А2 өткелегіндегі (ауысуындағы) токтар қатынасын алып көрейік. Ондағы толық ток  $I_a$ , үш токтың қосындысына тең:

$$I_a = \alpha_1 I_p + I_0 + \alpha_2 I_n,$$

мұндағы,  $I_0$  - А2 ауысуының кері қосылу кезіндегі тогы;

$I_p$ ,  $I_n$  -  $p_1$  және  $p_2$  аймақтарындағы кемтіктер мен электрондар тогы (ағындары).



1.38 сурет- Динистордың вольтамперлік сипаттамасы

Ал транзистордың ток беру коэффициенттері  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  қайдан пайда болды? — деген сұрақ тууы мүмкін. Оған динистор құрылымына қарай отырып жауап беруге болады (1.38 сурет). Бірінші  $p_1$ ,  $n_1$  және  $p_2$  қабаттарын жеке алып қарайтын болсақ бұл  $p-n-p$  транзисторының құрылымы екен; оның ток беру коэффициенті  $\alpha_1$  - мен белгілініп отыр. Оның  $n_1$  база қабатында қалатын ток бөлігі  $(1 - \alpha_1) I_p$  болады да, ал коллекторға берілетін бөлігі -  $\alpha_1 I_p$ . Осыған орай,  $p_2 - p_2 - n_1$  қабаттары  $n-p-n$  транзисторын құрайды. Оның ток беру коэффициенті  $\alpha_2$ . Көріп отырғанымыздай, динистор дагеніміз  $p-n-p$  және  $n-p-n$  транзисторларының қосындысы (1.38 сурет). Тіпті өмірде динисторды осылай екі транзистор құрылымын қосу арқылы да алуға болады екен.

Енді динистордың кез келген қимасындағы токтың тұрақтылығына, яғни  $I_a = I_p = I_n$  теңдігіне қайта оралып, динистордың вольтамперлік сипаттамасын аламыз:

$$I_a = I_0 / (1 - (\alpha_1 + \alpha_2)). \quad (1.12)$$

Алынған теңдеуде кернеу шамасы жоқ. Онда ол қалай вольтамперлік сипаттама бола алады? - деген сұрақ туайын деп отыр. Теңдеуге кернеу айқын түрде кірмесе де, ол  $\alpha_1$  мен  $\alpha_2$ -нің құрамына жасырын еніп отыр. Яғни,  $\alpha_1$  мен  $\alpha_2$ -нің өзі де кернеуге теуелді шамалар.

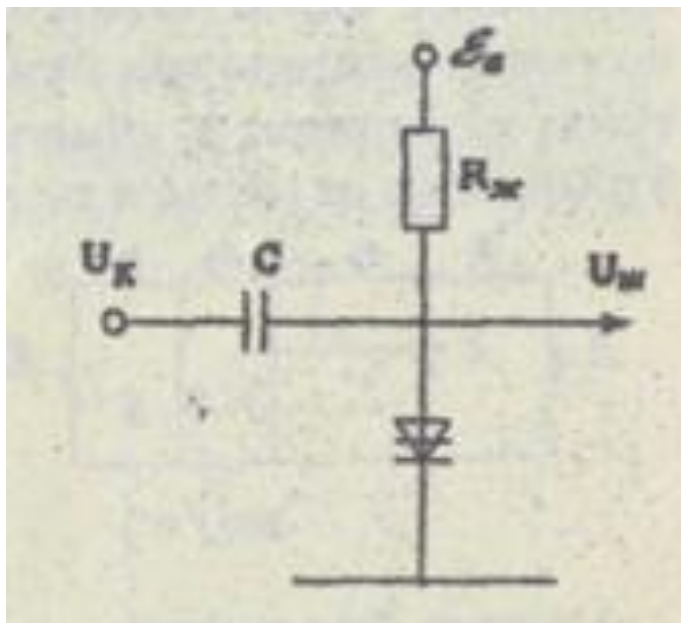
(1.12) теңдеуін зерттей отырып, мынадай бір ерекшеліктерін байқауымызға болады: егер  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  қосындысы бірге жақындай түссе, онда  $I_a$  тогы шексіздікке ұмтылады екен! Бұл тәжірибе жүзінде шындыққа сәйкес келер ме екен!?... Әбден келеді!  $I_a \rightarrow \infty$  дегеніміз динистордың қосылу күйіне ауысып, токты шексіз шамада өткізуге ұмтылады деген сөз. Әрине, шексіз ток алу мүмкін емес. Токтың шамасы жоғарыда айтылғандай динистор құрылымын құрайтын қабаттардың өзіндік кедергілерімен шектеледі. Ал (1.12) теңдеуінде бұл кедергілер есепке алынбай отырғандықтан, токтың шексіздікке ұмтылуы да заңды.

Динистордың қосылу күйін қарастырып өттік. Ал оны ажыратылу күйіне қалай ауыстыруға болады? Оны да (1.12) теңдеуімен негіздеуге болады:  $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$ , тіпті  $(\alpha_1 + \alpha_2) \ll 1$  болса, онда  $I_a \approx I_0$ , ендеше ток жоқтың қасы, яғни динистор жабық. Сонымен, динистордың жабық немесе ашық болуы  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  шамасына тікелей байланысты болып отыр.

Транзистордың ток беру коэффициенті ( $\alpha$ ) токтың өз шамасына да байланысты: ток шамасы өте аз болса,  $\alpha$ -де төмен. Екінші жағынан ток шектен тыс жоғары болған жағдайда  $\alpha$ -де төмендейді. Дегенмен де өмірде кездесетін ток шамаларында токтың өсуі  $\alpha$ -ның де өсуімен қатар жүреді деген тұжырымға келуге болады (1.37, а сурет). Сонымен, динисторды қосылу күйіне аудару үшін ондағы ток шамасын белгілі бір деңгейге жеткізу керек. Ток кернеуге байланысты болғандықтан, динистордың қосылуы ондағы кернеу шамасына байланысты. Міне, біз вольтамперлік сипаттамаға тікелей шықтық. Енді оның графигіне назар аударайық, (1.37, ә сурет).

Анодтық кернеуде ( $U_a$ ) нөлден бастап көтере түссек (суреттегі 0-А бөлік), токтың шамасының аз болатындығын, бірақ аз да болса да өсе түсетінін байқаймыз. А1, А3 ауысулары тура қосылғанымен, ток шамасын кері қосылған А2 ауысуы шектеп, тиристор күйі осы А2-нің кері қосылуындағы вольтамперлік сипаттамасымен анықталып отыр. Яғни тиристор сипаттамасының 0-А бөлігі А2  $p-n$  ауысуының кері қосылудағы вольтамперлік сипаттамасы. Токтың аздап болса да өсе түсуіне байланысты  $(\alpha_1 + \alpha_2)$  қосындысы да өсіп, «А» нүктесінде оның шамасы  $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$  болады. Осы нүктеден бастап динистордың күйі күрт өзгеріп, ол жабық күйден ашық күйге ауысады (сипаттамада А-Ә-Б бөліктер). Енді динисторге түсетін кернеу аз да (суретте  $U_B \approx U_{\Theta}$ ), ал ток үлкен (Б нүктесіне сәйкес). Көріп отырғанымыздай, динисторды қосу үшін оның анодындағы кернеуді динистордың қосылу кернеуіне ( $U_K$ ) дейін жеткізу керек, ал ажырату үшін оның тогы ажырату тогынан  $I_{аж}$  төмен болу керек (мұндай талап анод кернеуін қайта алумен немесе динистор тогына қарама-қарсы кері ток жіберумен

қамтамасыз етіледі). Бұл, әрине, кіріс-шығыс жолдарының бірлігіне байланысты (екі ғана электрод болғандықтан кіріс кернеуі қайда берілсе, шығыс кернеуі де содан алынады, 1.38 сурет) едәуір ыңғайсыздықтар туғызады. Осы орайда үшінші басқару электродының болуы қажет-ақ! Міне, біз осы жағдайда тринисторға келеміз.



1.39 сурет

### 1.6.3 Тринистор

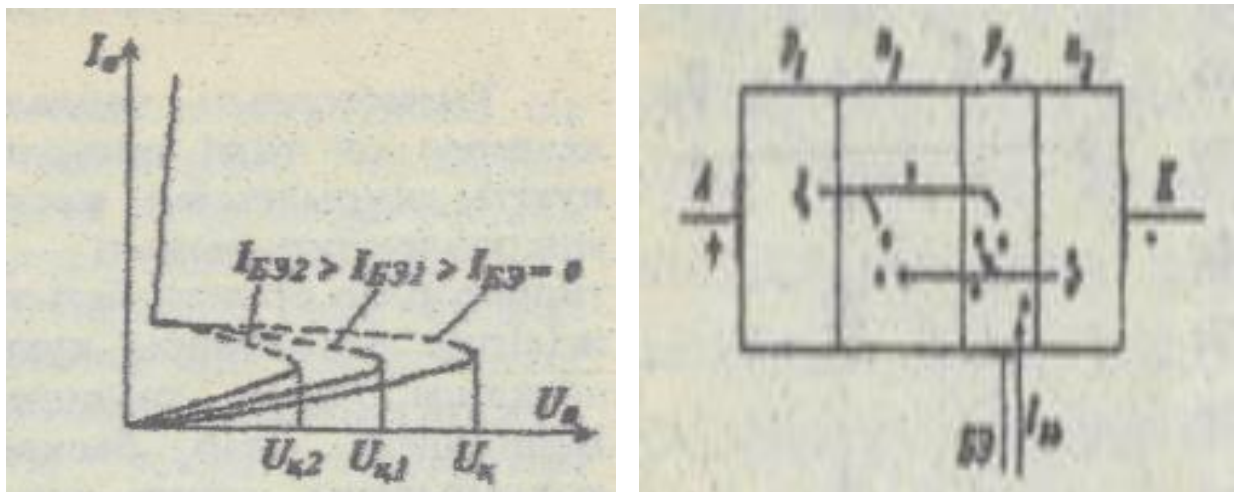
Тринистордың (ары қарай тиристор) анод пен катодтан бөлек үшінші басқару электродының болуы, біріншіден, кіріс-шығыс жолдарының өзара тәуелсіз болуын қамтамасыз етеді (1.40 сурет), екіншіден, ол арқылы шамасы аз токпен (кернеумен) анодтағы үлкен токты (кернеуді) басқаруға мүмкіндік аламыз.

Басқару электродтың кез келген ортадағы базалардың бірінен (Б1, Б2) шығаруға болады. Бірақ оны жұқа база Б2-ден шығарған тиімді.

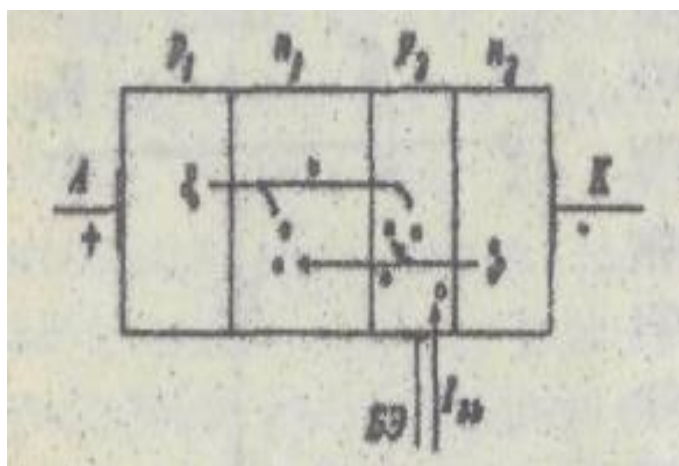
1.41-суреттегі тиристор құрылымына назар аударсақ онда сырттан берілген аз ғана басқару тогынан ( $I_{G3}$ ) туған кемтіктерге ( $p_2$  аймағында) көршілес  $n_2$  катодынан қарсы электрондар қозғалысы пайда болады екен. Олардың біразы кемтіктермен рекомбинацияға түседі, ал қалғандары кең база Б1 аймағына өтіп, ондағы электрондар санын көбейтеді де, өздігінше  $p_1$  аймағынан қарсы кемтіктер қозғалысын туғызады. Қарсы қозғалған кемтіктердің біразы  $n_1$  аймағында рекомбинацияға түсіп, қалғандары  $p_2$  аймағына өтіп, ондағы кемтіктер санын бұрынғыдан да арттыра түседі...

Осы дүркіндік процестің ары қарай дами түсуі, әрине, анод пен катод аралығына түсірілген анодтық кернеуге ( $U_a$ ) және бастапқы себепші болған басқару электродының тогының ( $I_{G3}$ ) шамасына байланысты болады. Егер  $U_a$

шамасы жеткілікті болса ( $U_a > U_K$ ), онда тиристор басқару электродының тогынсыз-ақ іске қосылып, ток өткізе бастайды (динисторлық режим). Оның шамасы аздау болған жағдайда ( $U_a < U_K$ ), басқару электроды көмекке келіп, ол тиристордың ертерек қосылуын қамтамасыз етеді.



1.40 сурет



1.41 сурет

Басқару тогы  $I_{B3}$  неғұрлым үлкен болса, тиристордың қосылуы анод кернеудің соғұрлым төмен шамасында іске асырылады. Бұл жағдай 1.40-суретте тиристор сипаттамасының басқару тогының шамасына қарай тарамдала түсетіндігімен көрсетіліп отыр. Көріп отырғанымыздай тиристордың қосылу кернеуі ( $U_{K1}, U_{K2}, \dots$ )  $I_{B3}$  тогы артқан сайын төмендей түсіп, тиристордың қосылуын жеңілдетеді. Жоғарыда тиристардың қосылуы  $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$  шартына сәйкес дедік. Ал кәдімгі транзисторлардағы  $\alpha$  коэффициентінің бірге жақын екенін ескерсек, онда тиристордық іске қосылуы ток пен кернеудің өте төмен

шамаларында жүрмей ме?... Сондықтан да тиристорларды жоғары кернеулерге арнап шығару үшін  $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$  шартын үлкен кернеу шамаларында орындауымыз керек. Міне, осы талапты орындау үшін тиристор құрылымына мынадай екі түрлі ерекшеліктер енгізіледі. 1)  $\alpha_1$  шамасын өсірмеу үшін бірінші база Б1, яғни  $n_1$  аймағы кең жасалынады (мұны біз жоғарыда келтірілген 1.38, 1.39-суреттерде де көрсетуге тырыстық) Бұл жағдайда  $p_1$  аймағынан енгізілген кемтіктердің көпшілігі кең база Б1-де рекомбинацияға түсіп,  $p_2$  аймағына ( $p-n-p$  транзисторының коллекторына) аз өтіп,  $\alpha_1$  шамасын өсірмейді. 2) Катод пен басқару электродын өзара қосымша өткізгішпен қосып (эммиттерлік тұйықтау), басқару тогының бір бөлігін осы өткізгішпен өткізеді. Мұнда көзделген негізгі мақсат, кернеудің аз кезінде токтың көп бөлігі осы қосымша өткізгішпен тұйықталып ( $p-n$  ауысуымен өтпей),  $\alpha_2$  шамасын өсірмейді де, ал кернеу артқанда  $p-n$  ауысуының өзінен өтіп, оның шамасын күрт өсіреді. Яғни кернеудің өсуіне байланысты токтың  $p-n$  ауысуымен тұйықталатын бөлігі де артып, тиристордың қосылуы да кенеттен тез арада өтеді. Мұның тәжірибе жүзіндегі қосымша пайдасы, оның қосылу мерзімінің тез арада, кернеу шамасының шашыраңқылығынсыз іске асуында.

Эмиттерлік тұйықтаудағы токтар мен кернеулердің өзара қатынасын 1.30-суретте келтірілген сипаттамалардан көруге болады.

### **3. Аналогтық электронды құрылғылар**

#### **3.1 Күшейткіштер туралы түсініктер**

Электрондық құрылғылар аналогтық және сандық болып бөлінеді. Өртүрлі процестерді, соның ішінде технологиялық процестерді басқарудың заманауи жүйелерінде екі типтегі құрылғылар бар. Аналогтық құрылғылар, әдетте, жетектер мен механизмдердің жетектерін басқару жүйесінің сенсорларынан бастапқы ақпаратты алуды қамтамасыз етеді, сигналдарды күшейтеді және түрлендіреді, ал сандық құрылғылар процестің өзін берілген бағдарламаға сәйкес басқарады.

Аналогты электронды құрылғы деп электрондық аспаптардың негізінде жасалған, аналогты электр сигналдарды күшейтетін, түрлендіретін және өндейтін құрылғыны айтады.

Аналогты электронды құрылғы екі үлкен топқа бөлуге болады:

- күшейткіштер;
- күшейткіштер негізінде жасалған құрылғылар.

Электрондық күшейткіш - электрлік сигналдарды, олардың формасын өзгертпей, сыртқы қоректену көзінің энергиясының арқасында, қуатын ұлғайтып күшейтетін құрылғы.

Күшейткіштер негізінде істелген құрылғылар - электрлік сигналдарды генерация жасайтын – сигнал генераторлары, кедергілер мен электрлік сигналдарды түрлендіретін және өңдейтін, құрылғылар.

Сигнал генераторы - нақты қасиеті және берілген сипаттамасы мен параметрлері бар, электрлік сигнал алуға мүмкіндік беретін құрылғы.

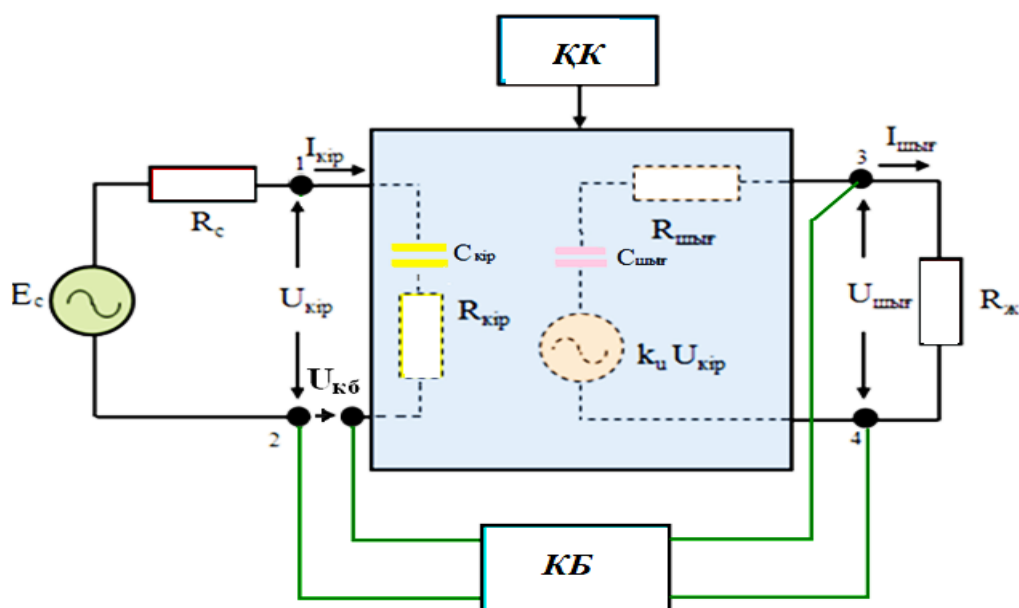
Сигналдарды түрлендіру құрылғысы - әдейі кері байланысы бар күшейткіштер негізінде жасалынады, мысалы: қосқыштар, интегралдауыштар, дифференциалдуыштар, логарифмдеуіштер т. т.

Сонымен кез келген аналогты электронды құрылғының құрамында күшейткіш бар.

Электрондық күшейткіш деп электрлік сигналдарды, олардың формасын өзгертпей, қоректену көзінің энергиясы арқасында, қуатын ұлғайтып, күшейтетін құрылғыны айтады. Сонымен күшейту процесінің мақсаты, қоректену көзінің энергиясын күшейткіштің шығыс сигналының энергиясына түрлендіруде болып табылады.

Электрлік сигналдарды күшейту үшін күшейту элементтері - биполярлық транзисторлар, өрістік транзисторлар және интегралдық микросұлбалар кеңінен қолданылады.

Күшейткіш электр сигналының (кернеу, ток, қуат) параметрлерін күшейтуге арналған құрылғы деп аталады. 1.42-суреттерде күшейткіштің төрт полюс ретінде құрылым сұлбасы келтірілген.



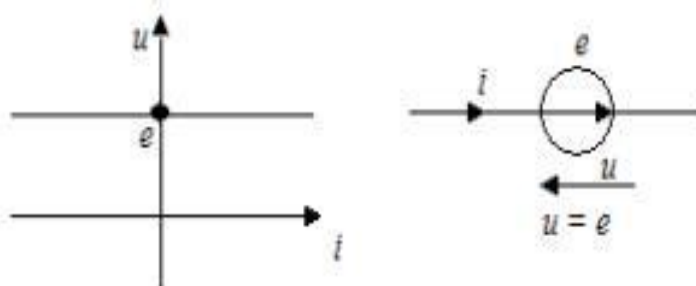
ҚК – қоректендіру көзі;  $E_c$ - аналогты сигнал көзі;  $R_c$  - сигнал көзінің ішкі кедергісі;  $R_{кір}$  – күшейткіштің активті кіріс кедергісі;  $C_{кір}$  - күшейткіштің кіріс сиымдылық кедергісі;  $R_{шығ}$  - күшейткіштің активті шығыс кедергісі;  $R_ж$  – жүктеме; КБ кері байланыс блогы.

1.42 сурет - Күшейткіштің төрт полюсты күшейткіш ретіндегі түрі

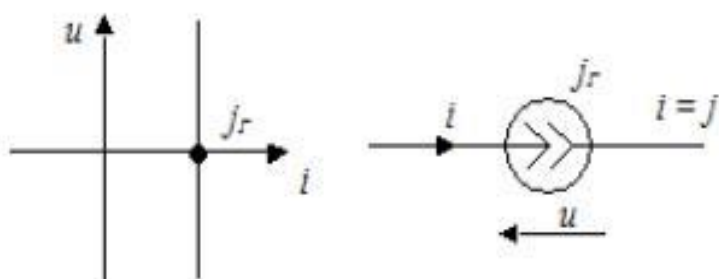


Күшейткіштердің кірісіндегі сигнал көздері алуан түрде болуы мүмкін. Жалпы түрде сигнал көздерін екі түрге бөлуге болады, біреуін кернеу көзі деп атайды, екіншісін – ток көзі дейді.

Сигнал көздері (1.43 және 1.46 суреттер).



1.43 сурет - Идеалды кернеу көзінің сипаттамасы мен шартты белгісі



1.44 сурет - Идеалды ток көзінің сипаттамасы мен шартты белгісі

Күшейтілген сигналдардың түріне қарай күшейткіштерді екі топқа бөлуге болады:

1) Гармоникалық сигналдардың күшейткіштері – әртүрлі шамадағы және формадағы гармоникалық немесе квазигармоникалық (гармоникалық деп есептеуге болатын) яғни периодтық және периодты емес сигналдарды күшейтуге арналған.

2) Импульстік сигналдардың күшейткіштері.

3) Тұрақты ток күшейткіштері.

### 3.2 Күшейткіштердің көрсеткіштері (негізгі параметрлері)

Күшейту бойынша күшейту коэффициенті: Кернеу  $U$  немесе ток  $I$ , немесе қуат  $P$  бойынша күшейту коэффициенттері делініп, күшейткіштің шығыс жағындағы күшейтілген шаманың қанша есе үлкен болатынын сан айтылады.

Кернеу бойынша күшейту коэффициенті:

$$K_U = \frac{U_{\text{шығ}}}{U_{\text{кір}}}$$

Ток бойынша күшейту коэффициенті:

$$K_I = \frac{I_{\text{шығ}}}{I_{\text{кір}}}$$

Қуат бойынша күшейту коэффициенті:

$$K_P = \frac{P_{шығ}}{P_{кір}}$$

Пайдалы әсер коэффициенті

$$\eta = \frac{P_{шығ}}{P_0}$$

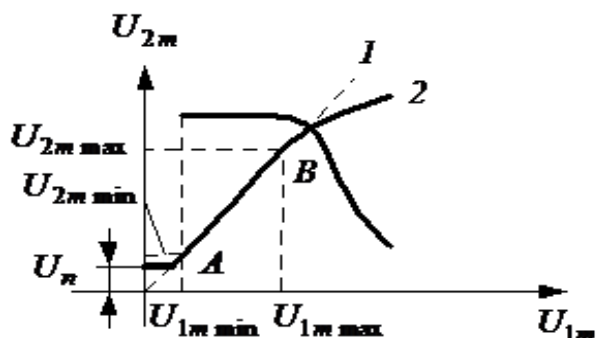
Күшейту коэффициенті логарифмдік бірліктерде көрсету өте ыңғайлы, өйткені адамның құлағы қабылдайтын дыбыс қаттылығы соған сәйкесті дыбыс энергиясының өзгеруінің логарифміне пропорционал екені анықталған. Сондықтан, күшейту коэффициенті логарифм түрінде былай жазамыз.

$$K_U(\text{дБ}) = 20 \lg \left( \frac{U_{шығ}}{U_{кір}} \right) = 20 \lg K_U,$$

$$K_I(\text{дБ}) = 20 \lg \left( \frac{I_{шығ}}{I_{кір}} \right) = 20 \lg K_I,$$

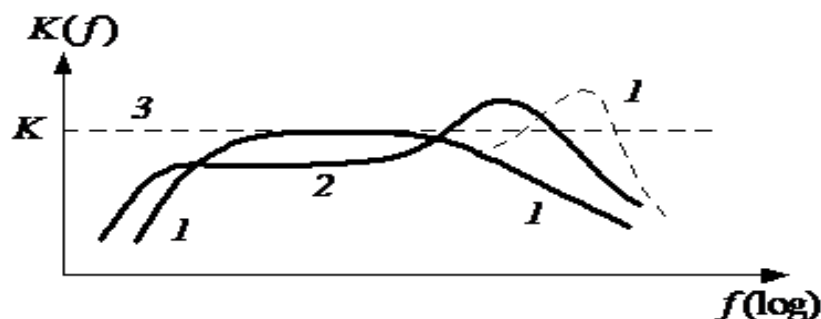
$$K_P(\text{дБ}) = 10 \lg \left( \frac{P_{шығ}}{P_{кір}} \right) = 10 \lg K_P$$

### Күшейткіштің сипаттамалары



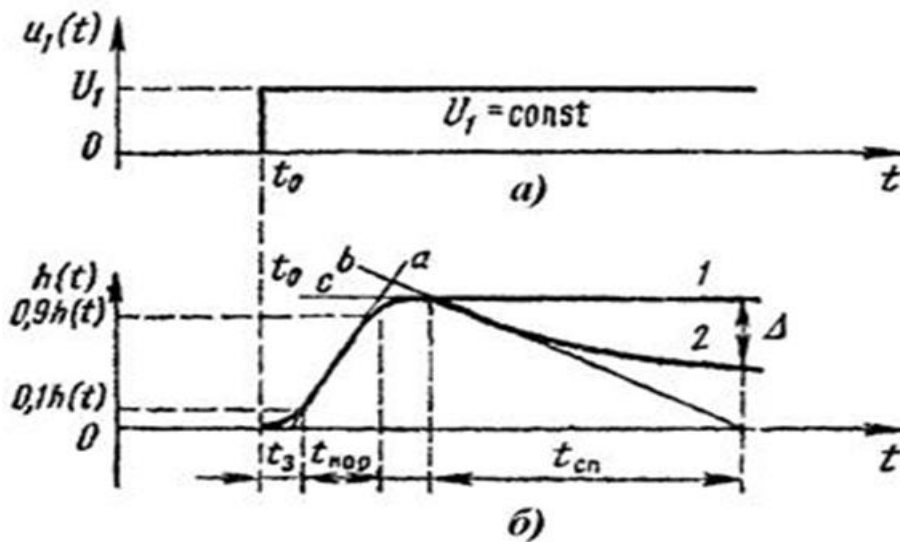
1 – идеалды; 2 – реалды.

1.45 сурет - Амплитудалық сипаттама (АС):



1, 2 – реалды сипаттамалар; 3 – идеалды сипаттама.

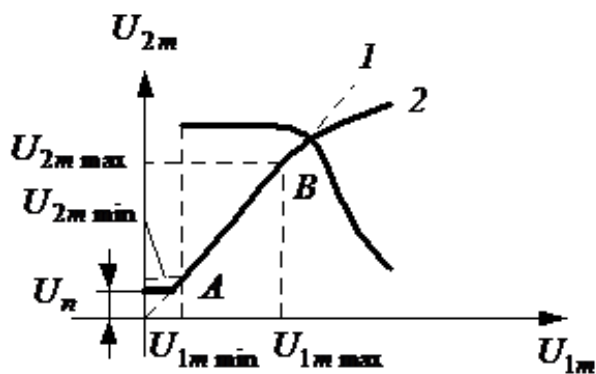
1.46 сурет - Амплитудалы - жиілікті сипаттама (АЖС)



Күшейткіштің кірісіндегі кернеудің диаграммасы (а) және өтпелік сипаттамасы (б): 1 – тұрақты токтың күшейткіші; 2 – айнымалы токтың күшейткіші.

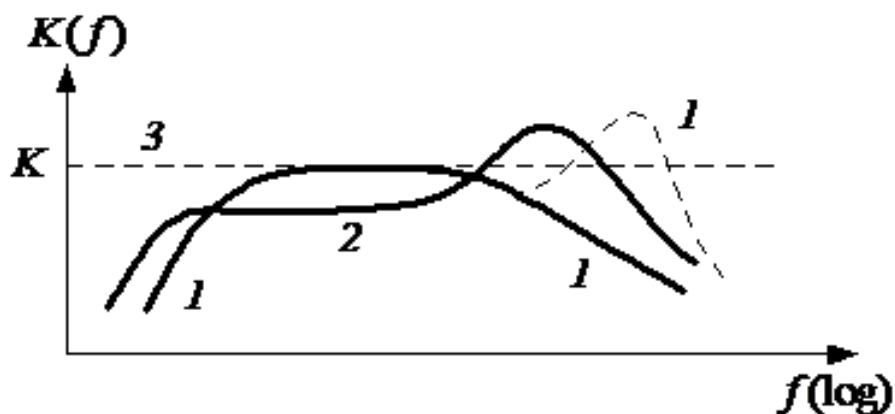
1.47 сурет - Өтпелік сипаттамасы (ӨС)

Күшейткіштің сипаттамалары:



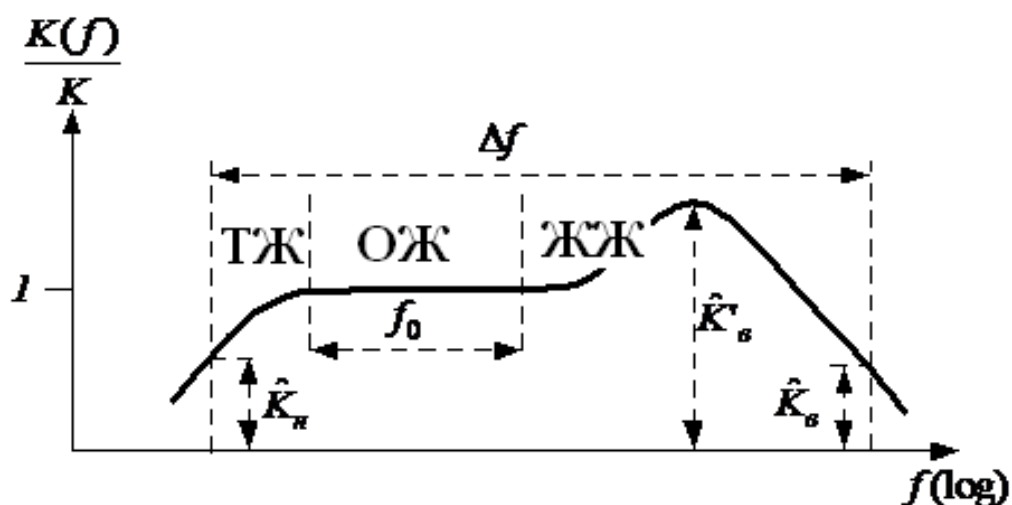
1 – идеалды; 2 – реалды.

1.48 сурет - Амплитудалық сипаттама (АС)



1, 2 – реалды; 3 – идеалды.

1.49 сурет - Амплитудалы - жиілікті сипаттама (АЖС)



1.50 сурет - Нормаланған амплитудалы - жиілікті сипаттама

### 3.3 Ортақ эмиттерлі сұлбасымен қосылған күшейткіш каскады

Күшейткіштерде көбінесе транзистордың ортақ эмиттермен (ОЭ) қосылу сұлбасы қолданылады, бұл сұлбаның қуат бойынша ең жоғары күшейту мүмкіндігі бар. Бұл жағдайда транзистордың шығыс электродына (коллекторға) жүктеме кедергі  $R_k$ , ал кіріс тізбегіне (база мен эмиттер арасына) электроқозғалытқыш көзі (сигнал көзі) қосылады (1.51 сурет) бұл сұлбада транзистордың коллектор тогы мен кернеудің арасында мынандай байланыс бар:

$$U_{кэ} = E_k - I_k R_k \quad (1.13)$$

Транзистордың мұндай жұмыс режимін динамикалық деп атайды, ал жүктеме кедергісі бардағы транзистордың шығыс токтары мен кернеулерінің арасындағы байланысты анықтайтын сипаттамаларды да динамикалық деп атайды. Коллектор тізбегінің ток көзі деп атайды. Динамикалық сипаттамаларды (1.51 сурет) транзистордың статикалық сипаттамалар тобы арқылы коллектор

тізбегінің кернеуі  $E_k$  мен жүктеме кедергі  $R_k$  – ның берілген мәндерін тұрғызады. Ол үшін тік сызық теңдеу болып табылатын (1.13) өрнекті пайдаланамыз және осы тік сызық  $I_k, U_{кэ}$ , - координат системасы осьтерінен кесіп өтетін кесінділерді табуымыз керек. Егер  $\rho = 0$  болса, онда (1.13) өрнектен  $U_{кэ} = E_k$  және егер  $U_{кэ} = 0$  болса, онда  $I_k = E_k/R_k$ . Тиісті осьтерге (1.52 сурет)  $E_k$  - ға тең кернеу мен  $I_k = E_k/R_k$ . – ға тоқты салып, сол алынған нүктелер арқылы жүктемелік тіке сызығы деп аталатын АВ сызығын жүргіземіз.

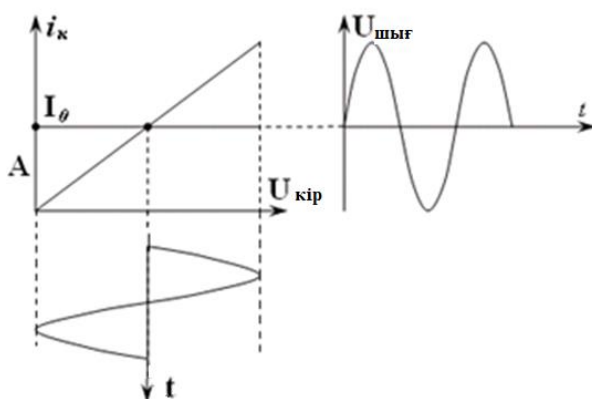
Динамикалық шығыс сипаттаманы пайдалана отырып, қандай да болмасын коллектор тогы үшін, оған сәйкес келетін коллекторға кернеу мен кіру тізбегіндегі тоқты  $I_{0б}$  табуға болады.

Транзистордың базасындағы кернеу  $U_{б0}$  (кіріс кернеуі) анықтау үшін транзистордың анықтамаларда берілетін статикалық кіріс сипаттамалары қолданылады. Өйткені, транзистордың динамикалық кіріс сипаттамаларының айырмасы аз. Транзистордың шығыс сипаттамасынан коллектор тогы  $I_k$  - сәйкес келетін  $I_б$  тогын табамыз. Сосын транзистордың кіріс сипаттамасынан осы токқа сәйкес  $U_{б0}$  кернеуін табамыз (1.53 сурет).

Ауысу көзі  $E_б$  мен анықталатын, берілген база тогында  $I_б$  жүктемелік тіке сызықтың статикалық сипаттама қисығымен қиылып өтетін нүктесін жұмыс нүктесі деп атайды, ол оның жүктемелік тіке сызықтағы (айнымалы кіріс сигналдың жоғында) алғашқы орын – тыныштық нүктесі 0 деп те атайды. Тыныштық нүктесі шығыс коллектор тізбегінің тыныштық тогы  $I_{0к}$  мен тыныштық кернеуі  $U_{0к}$  - ны анықтайды.

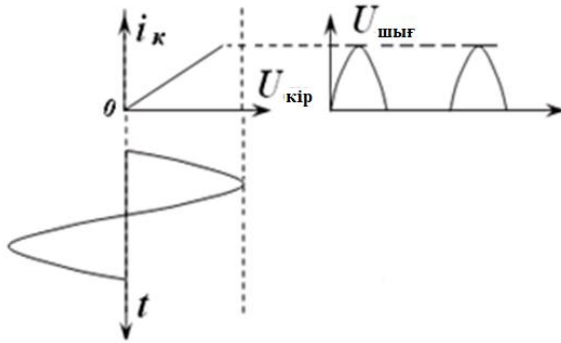
### 3.1.4 Қуат күшейткіштерінің ерекшеліктері

Қуат күшейткіштері ток немесе қуатты күшейтуге арналып, жүктемеде белгілі бір қуат шамасын алуды көздейді. Олар жұмыс атқару нүктесін (ЖАН) орналасуына қарай, А, В және С атты немесе А, В, С класс режимдерінде жұмыс істеуі мүмкін. А класс режимінде ЖАН нүктесі сипаттаманың дәл ортасында орналасып, сигналды оңда, солда өзгере алуына мүмкіндік береді (1.51 сурет).



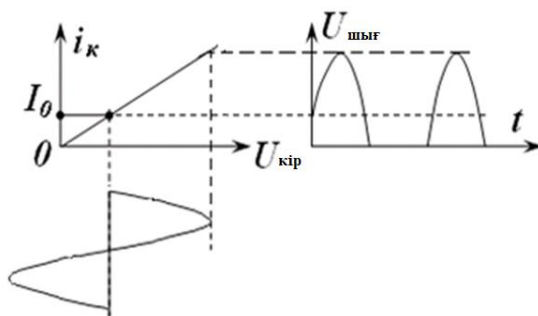
### 1.51 сурет - Күшейткіштің «А» режимінде жұмыс істеуі кезіндегі ЖАН – ның орналасуы

Сигналдың түрін дәл қайталанып бергенімен, бұл режимнің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) өте төмен болып (50% - тен аспайды) оның өмірде кең таралуын шектейді ПӘК – тың төмен болуы ЖАН – ның өте жоғары орналасып, кіріс сигналының жоқ кезінде транзистордан үлкен токтың ағуына байланысты болады. Сондықтан бұл режим де кіріс сигналы жоқ кезде ПӘК өте төмен.



### 1.52 сурет - Күшейткіштің «В» режимінде жұмыс істеуі

Егер сигналы А нүктесін төмендете түсіп, сипаттаманың ең төменгі тұсына келуіміз керек (В – нүктесі). Бұл біздің В класс режиміне көшкеніміз. Әрине енді ПӘК шамасы едәуір артады, бірақ сигнал біраз бұрмалануы мүмкін. В режимінде сигналдың төменгі жағы өте бұрмалана, қисая түседі. Өйткені, транзистор сипаттамасының (әсіресе, кіріс сипаттамасының) төменгі жағы өте қисық. Мұндай бұрмалануды болдырмау үшін В режимінің бей сызықтық бөлігінен өте түсіп, сипаттаманың түзу сызықты бөлігіне көшуге тырысады. Мұндай режим АВ класс режимі деп аталады.

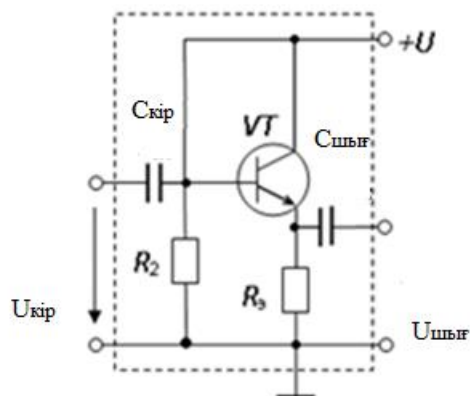


### 1.53 сурет - Күшейткіштің «АВ» режимінде жұмыс істеуі

## 3.1.5 Ортақ коллекторы бар күшейткіш каскады

Ортақ коллекторлы күшейту каскадының сұлбасында (1.52 сурет) ток пен кернеудің айнымалы құрамы бойынша транзистордың коллекторы тікелей

каскадтың жалпы нүктесіне қосылған (қорек көзінің ішкі кедергісін ескермеген кезде)



1.54 сурет - Ортақ коллекторлы күшейту каскадының сұлбасы

Балама сұлбасын қарастырмай, ОК каскадының негізгі параметрлерін келтіреміз. ОК каскадта кернеуді күшейту коэффициенті теория бойынша бірден аса алмайды, яғни нақты айтқанда  $K_U = 0,8...0,99$  шамасында болады. Шығыс кернеуі транзистордың эмиттер тізбегінен шығарылатындықтан, шығу кернеуінің фазасы кіріс кернеуінің фазасына сәйкес келеді. Шығыс кернеуі ОК каскадта шығу кезінде кіріс кернеуін толығымен қайталайды, демек, каскадтың атауы – эмиттер қайталағышы деп аталады.

ОК каскадтың кіріс және шығыс кедергісінің мәндері келесі шамалар арқылы анықтауға болады:

$$R_{кпр} = \frac{h_{11}}{1 - K_U}; \quad R_{шығ} = \frac{h_{11}}{1 + h_{21}}$$

Кернеуді күшейту коэффициенті  $K_u$  1-дегі мәнге жақындаса кіріс кедергісі үлкен мәндерге жететінін және жүздеген және мыңдаған кОм болатындығын байқауға болады. Шығу кедергісі салыстырмалы түрде төмен (ондаған Ом). Осылайша, эмиттер қайталағышы салыстырмалы түрде жоғары кіріс және төмен шығыс кедергісіне ие деп нақты түрде айтуға болады. Бұл каскад тоқты күшейтетін күшейткіш, тоқты күшейту коэффициентті  $k_I = 1 + h_{21}$  тең ток күшейткіші.

Ортақ эмиттерлі және ортақ коллекторлы каскадтарды өзара салыстырсақ, айта кетерлік жайт мынадай.

Ортақ эмиттерлі каскад салыстырмалы мәнді төмен кіріс және жоғары мәнді шығыс кедергілеріне ие. Мұндай каскадты жоғарғы омды кіріс сигнал көзіне қосуға болмайды, себебі ол сигнал көзін тұйықтап тастауы мүмкін. Сонымен қатар ОЭ каскады сигнал фазаларын 180 градусқа өзгертіп жібереді.

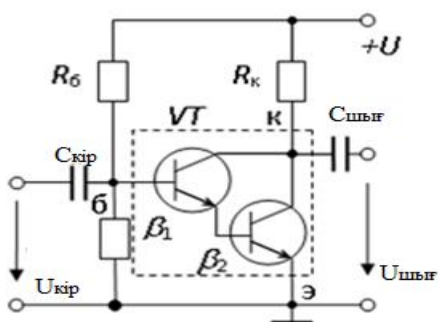
ОК каскадын алсақ ол өте жоғары шамада кіріс кедергіге, өте аз шамадағы шығыс кедергіге ие. Сондықтан ОК каскадын жоғары мәнді шығыс кедергілері

бар сигнал көзіне қосуға болады. Ал шығысы бойынша төмен мәнді кіріс кедергісі бар сигнал көзіне қосқан дұрыс. ОК каскады күшейтілген сигналдың фазасын өзгертпейді.

ОЭ және ОК каскадтарының аталған ерекшеліктері бір-бірін өзара толықтыруға мүмкіндік береді. Мысалы, жоғары кедергілі сенсордан кернеуді күшейту үшін алдымен қарсылықтарды үйлестіру үшін ОК каскадын пайдаланып, содан кейін қажетті  $K_U$ -ға жету үшін ОЭ каскадын дәйекті түрде қосу керек.

### 3.1.6 Құрама транзистор қолданған күшейткіш каскад

Құрама транзистордан тұратын күшейткіш сұлбасы 1.55-суретте көрсетілген. Бұл сұлба Дарлингтон сұлбасы деп те аталады.



1.55 сурет - Құрама транзистордан тұратын күшейткіш сұлбасы

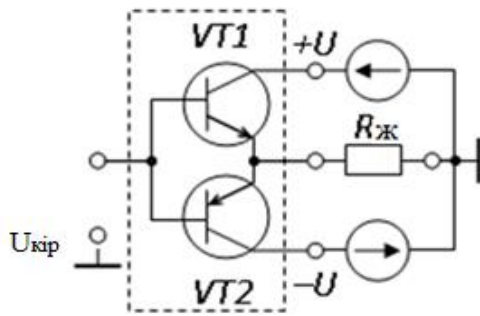
Одан құрама транзистордың (суреттегі бөлектелген бөлік) дәйекті түрде қосылған екі транзистор екенін көруге болады, ал екіншісінің негізгі тогы біріншісінің эмитер тогы болып табылады. Содан кейін құрама транзистордың базалық тогының жалпы берілу коэффициенті оны құрайтын транзисторлардың әрқайсысының ток беру коэффициенттерінің көбейтіндісіне тең болады:  $\beta = \beta_1 \beta_2$ . Өнеркәсіпте құрама транзисторларды бір корпуста шығарады. Олардың қарапайым биполярлық транзистормен бірдей шығу электродтарының атаулары бар.

Дарлингтонның сұлбасы салыстырмалы қарапайымдылықта жоғары сезімталдыққа ие (екі ОЭ каскадты ауыстырады), бірақ ол нашар термостабилизацияға және төменгі жиілікке ие. Сондықтан оның қолданылуы шектеулі.

### 3.1.7 Екі тактылы күшейткіш каскады

Екі тактылы қарапайым күшейткіштің сұлбасы 1.56-суретте көрсетілген. Ол бірдей параметрлері бар, бірақ әртүрлі өткізгіштігі бар екі транзистордан тұрады. Мұндай транзисторлардың жұптары қосымша деп аталады, ал күшейту каскады қосымша күшейткіш деп аталады.Е





1.56 сурет - Екі тактылы қарапайым күшейткіштің сұлбасы

Қарастырылып отырған сұлбаны қуаттандыру үшін екі полярлы көз қолданылатынын ескеріңіз.

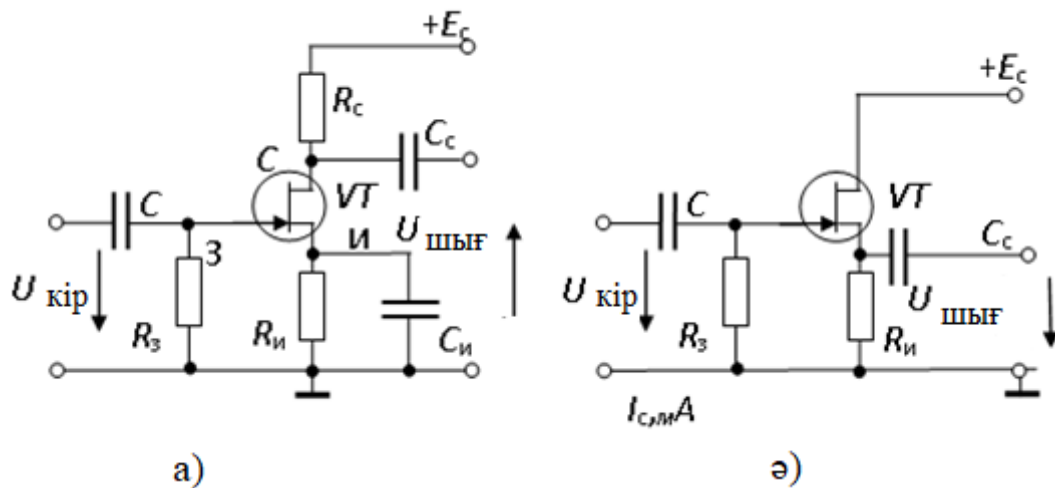
Каскад екі тактылы деп аталады, өйткені күшейтілген сигналдың бір тербеліс кезеңінде VT1 және VT2 каскадының транзисторлары кезекпен екі рет жұмыс істейді. Егер сіз бастықтарды ескермесеңіз транзисторлардың кіріс сипаттамасының сызықтық емес екендігін  $U_{\text{кір}} > 0$  кезінде VT2 транзисторы жабық, ал VT1 Транзисторы эмиттер қайталаушысы ретінде жұмыс істейді деп санауға болады.  $U < 0$  кезінде транзисторлар «рөлдермен» өзгереді. Осылайша, каскад екі полярлы эмиттер қайталаушысы болып табылады.

Екі сатылы каскадтың маңызды артықшылықтарының бірі-үлкен іске асырылатын қуат. Шынында да, ОЭ мен ОК-мен салыстырғанда кіріс кернеуінің өзгеру диапазоны екі есе артады, ал шығарылған қуат транзисторлар арасында жартысына бөлінеді. Тағы бір маңызды ерекшелігі-айнымалы және тұрақты (баяу өзгертін) токты бірдей жақсарту мүмкіндігі.

Кемшілікті екі полярлы көздің қажеттілігі деп санауға болады. Кейбір жағдайларда (және шектеулермен) бір полярлы қоректену кезінде екі сатылы каскадты жүзеге асыруға мүмкіндік беретін арнайы сұлбалық шешімдерді қолдануға болады.

### 3.1.8 Өріс транзисторларын қолданған күшейткіш каскадтар

Қазіргі уақытта өріс транзисторларын қолданған күшейткіш каскадтар кең таралған, өйткені олар биполярлы транзисторларды қолданған күшейткіш каскадтармен салыстырғанда айтарлықтай үлкен кіріс кедергісіне ие. Көбінесе ортақ бастауы бар күшейткіш каскады қолданылады, оның сұлбасы 1.57, а - суретте көрсетілген.



1.57 сурет - Ортақ бастауы бар күшейткіш каскадтары

Бұл каскадта күшейту құйма тізбегіне қосылған  $R_c$  резисторы арқылы жүзеге асырылады.  $VT$  өріс транзисторының бастау тізбегіне  $R_{и}$  резисторы кіреді, ол  $U_{30}$  тыныштық кернеудің қажетті бейімділігін қамтамасыз етеді, бұл тиек пен бастаудың арасындағы ығысу кернеуі деп аталады.

Ысырма тізбегіндегі  $R_3$  резисторы тыныштық режимінде ысырма потенциалдары мен күшейту сатысының жалпы нүктесінің теңдігін қамтамасыз етеді. Демек, ысырма потенциалы  $I_{и0}$  тұрақты ток компонентінен  $R_{и}$  және резистордағы кернеудің түсу потенциалынан төмен. Осылайша, тиектің потенциалы бастаудың потенциалына қарағанда теріс.

Кіріс кернеуі  $R_3$  резисторына  $C$  бөлу конденсаторы арқылы беріледі.

Айнымалы кіріс кернеуі өріс транзисторының арнасында берілген кезде бастау  $i_б$  тогының және  $i_к$  құйма тогының айнымалы компоненттері пайда болады. Резистордағы кернеудің төмендеуіне байланысты  $R_{и}$  және токтың ауыспалы компонентінен  $i_{и}$  және өріс транзисторымен күшейтілген тиек пен бастау арасындағы кернеудің ауыспалы компоненті кіріс кернеуінен едәуір аз болуы мүмкін:  $u_T = u_{кiр} - R_k i_k$ ,

Теріс кері байланыс деп аталатын бұл құбылыс күшейткіш каскадының пайдасының төмендеуіне әкеледі. Оны жою үшін  $R_{и}$  резисторына параллель  $C_{и}$  конденсаторы кіреді, оның кедергісі күшейтілген кернеудің ең төменгі жиілігінде  $R_{и}$  резисторының кедергісінен бірнеше есе (әдетте 10 есе) аз болуы керек. Бұл жағдайда кернеудің Автоматты ығысу байланысы деп аталатын  $R_{и}$  мен  $C_{и}$  тізбегіндегі бастапқы токтан төмендеуі өте аз, сондықтан токтың ауыспалы компонентінде көзді күшейту сатысының жалпы нүктесіне қосуға болады. Сондықтан бұл каскад жалпы бастауы бар күшейткіш каскад деп аталады.

Шығу кернеуі байланыс конденсаторы арқылы ағынмен және каскадтың жалпы нүктесімен алынады, яғни ол құйма мен бастау арасындағы кернеудің

ауыспалы компонентіне тең. Тыныштық режиміндегі жұмыс нүктесі, әдетте, өтпелі сипаттаманың сызықтық бөлігінің ортасына сәйкес келеді, өйткені күшейтілген кернеудің сызықтық емес бұрмалануы минималды болады. Жұмыс нүктесінің орнын таңдап,  $U_{z0}$  ығысу кернеуінің және  $I_{c0}$  ағымының тогының мәндерін анықтай отырып, олар автоматты ығысу байланысының резисторының кедергісін табады

Автоматты ығысу байланысы конденсаторының сыйымдылығы әдетте формула бойынша есептеледі

$$C_{II} = \frac{10}{2\pi f_i R_{II}},$$

мұндағы  $f_i$ -күшейтілген кернеудің ең төменгі жиілігі.

Айнымалы кернеудің күшейткіш сатысы кіріске қолданылған кезде,  $i_c$  ағымының айнымалы компоненті пайда болады. Бұл токтың өзгеруі ағын мен көздің арасындағы  $u_c$  кернеуінің өзгеруіне әкеледі;  $R_c$  резисторындағы кернеудің түсу фазасына сандық тең және қарама-қарсы оның айнымалы компоненті күшейткіш сатысының шығыс кернеуі болып табылады

Айнымалы кернеудің күшейткіш сатысы кіріске қолданылған кезде,  $I_c$  ағымының айнымалы компоненті пайда болады. Бұл токтың өзгеруі ағын мен көздің арасындағы  $u_c$  кернеуінің өзгеруіне әкеледі;  $R_c$  резисторындағы кернеудің түсу фазасына сандық тең және қарама-қарсы оның айнымалы компоненті күшейткіш сатысының шығыс кернеуі болып табылады

$$U_{шығ} = - R_c i_c.$$

Шығыс кернеуі кіріс кернеуіне қарсы екенін және кіріс кернеуінен едәуір үлкен екенін көруге болады, өйткені ағын тізбегіндегі кернеу қақпа тізбегіне қарағанда әлдеқайда көп.

Жалпы көзі бар күшейткіш каскадының кернеуі бойынша күшейту коэффициенті:

$$K_U = \frac{U_{шығ}}{U_{кір}} = S \frac{R_i R_c}{R_i + R_c} = S R_c,$$

мұнда  $S$  – крутизна, а  $R_i$  – өріс транзисторының ішкі кедергісі.

Өріс транзисторларының кіріс кедергісі, яғни қақпа мен көз арасындағы кедергі шамамен 108 Ом құрайды, сондықтан қарастырылып отырған күшейткіш сатысының кіріс кедергісі өріс транзисторының кіріс қысқыштарына параллель қосылған  $R_3$  резисторының кедергісімен анықталады:

$$R_{кір} \approx R_3 = 10^5 \dots 10^6 \text{ Ом.}$$

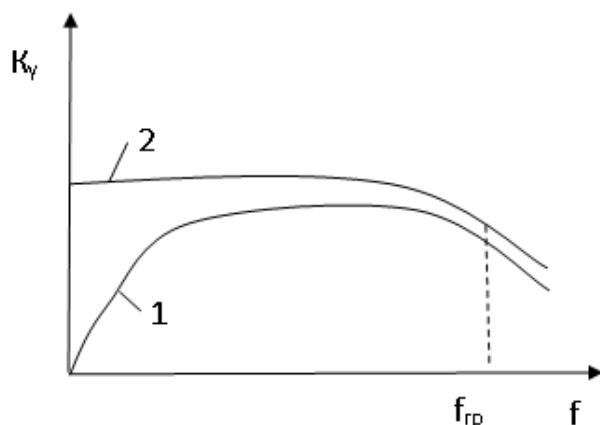
Қазіргі заманғы өріс транзисторларының шығыс кедергісі, яғни бастау мен құйма көзі арасындағы кедергі шамамен 104...105 Ом құрайды, сондықтан өріс транзисторындағы күшейткіш каскадтаының шығыс кедергісі  $R_c$  резисторының

кедергісімен анықталады:  $R_{\text{шығ}} \approx R_c = 103 + 104 \text{ Ом}$ , яғни  $R \ll R_{\text{кір}}$ , бұл өріс транзисторларындағы күшейткіш каскадтарының маңызды артықшылығы.

Жалпы бастау бар күшейткіш каскадтардан басқа, өнеркәсіптік электроника құрылғыларында жалпы құймасы бар күшейткіш каскадтар қолданылады (1.57, ә сурет). Бұл каскадта  $R$  және жүктеме резисторы бастапқы тізбекке қосылады, ал ток пен кернеудің айнымалы компоненттері бойынша ағын күшейткіштің жалпы нүктесіне қосылады. Резистордағы кернеудің төмендеуінің ауыспалы компонентіне тең шығыс кернеуі  $C_c$  байланыс конденсаторы арқылы алынады. Жалпы өріс транзисторындағы күшейткіш каскад оның қасиеттері бойынша эмитер қайталағышына ұқсас. Ол үлкен кіріс кедергісі мен ток күші, төмен шығыс кедергісі бар. Оны көбінесе бастаулық қайталағыш деп атайды.

### 3.1.9 Тұрақты ток күшейткіштері

Үлкен пайда алу үшін көп сатылы күшейткіштер қолданылады. Каскадтардың өзара байланысы конденсаторлардың көмегімен жүзеге асырылады. Сондықтан пайда жиілікке тәуелділігі 1.58-суретте көрсетілген. Төмен жиіліктерде пайда нөлге жетеді, өйткені конденсатордың кедергісі артады.



1.58 сурет - Пайда коэффициентінің тұрақты ток күшейткішінің жиілігіне тәуелділігі

Көптеген жағдайларда, әсіресе электрлік емес шамаларды бақылау және өлшеу кезінде тұрақты токтарды немесе төмен жиілікті сигналдарды күшейту қажет. Ол үшін тұрақты ток күшейткіштері қолданылады (ТТК), онда каскадтар арасындағы байланыс резисторлардың көмегімен жүзеге асырылады. Сондықтан ТТК пайдасы нөлден бастап шекара жиілігіне дейін үлкен жиілік диапазонында өзгеріссіз қалады (1.58 сурет).

ТТК-ның үлкен кемшілігі-нөлдік дрейф деп аталады, бұл уақыт өте келе күшейткіштің шығысында кіріс кернеуі болмаған кезде кернеу пайда болады.

Дрейфпен күресу үшін нөлдер қолданылады:

- қуат кернеуін тұрақтандыру;
- температуралық режимді тұрақтандыру;
- дифференциалдық (баланс) сұлбалары.

Көпір сұлбасын қарастырамыз (1.59, а сурет). Онда бос жүрістегі 1 және 2 нүктелерінің потенциалдары ( $R_H$  жүктемесі болмаған кезде) тең болады

$$\varphi_1 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2; \quad \varphi_2 = \frac{U}{R_3 + R_4} R_4$$

$\varphi_1 = \varphi_2$  делік, содан кейін

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Түрлендіруден кейін нәтижесін аламыз

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

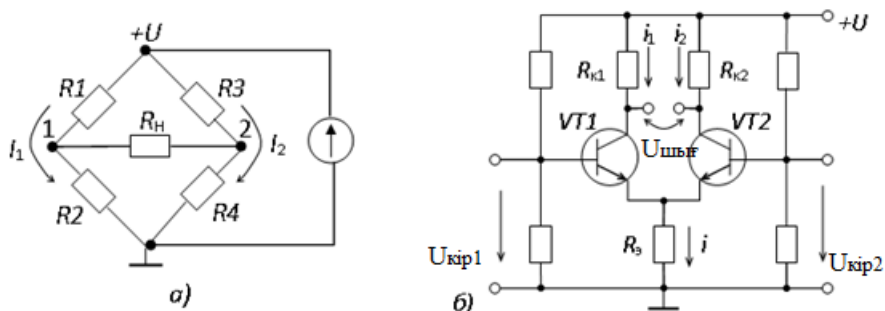
Көпірдің тепе-теңдігі ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) синхронды (бір уақытта) және  $R_1$ ,  $R_3$  немесе  $R_2$ ,  $R_4$  жұбының өзгеруі кезінде сақталады.

$R_2$  және  $R_4$  резисторларын бірдей транзисторлармен алмастырамыз (1.59, б сурет). Онда сұлбада екі иық бірдей, яғни  $R_{k1} = R_{k2}$ ,  $h_{21} = h_{21}$  және т. б.

Резисторлар арқылы өтетін ток  $i = i_1 + i_2$  болады. Егер  $u_{кiр1} = u_{кiр2}$ , болса, онда коллекторлық токтар  $i_1 = i_2$ , сондықтан  $u_{шығ} = 0$  болады.

Фазалық (фаза мен амплитудасы бірдей) кіріс сигналдарымен VT1 және VT2 транзисторларының коллекторларының потенциалдары да фазалық түрде өзгереді деп айтуға болады, сондықтан шығыс кернеуі  $u_{шығ} = 0$ .

Егер ұсынылған күшейткіштің кірістеріне дифференциалды (әртүрлі) сигналдар берілсе, онда олардың шығысында күшейтілген айырмашылық пайда болады. Осылайша, күшейткіш (1.59, б сурет) айырмашылық сигналының күшейткіші – дифференциалды күшейткіш. Бұл күшейткішті тұрақты ток күшейткіші ретінде де қолдануға болады.



1.59 сурет - Көпір тізбегі (а) және дифференциалды күшейткіш (б)

Сұлбаның симметриялы иықтарындағы температура өзгерген кезде, токтарда бірдей өзгереді және күшейткіштің шығысында кернеу  $u_{\text{шығ}} = 0$  болады. Демек,  $u_{\text{шығ}}$  теңгерілмеген сұлбаға қарағанда температура тұрақтылығына ие, ал теориялық тұрғыдан температура тұрақтылығы абсолютті болуы мүмкін.

Жалпы,  $u_{\text{шығ}}$  кез келген фазалық әсерге сезімтал емес. Мысалы, электр тізбегіндегі кедергі күшейткіш иығындағы токтардың бірдей өзгеруіне әкеледі және шығу кернеуі өзгермейді.

$u_{\text{шығ}}$  сапасын жақсарту үшін  $R_3$  резисторының орнына  $J = i1 + i2 = \text{const}$  ток көзі қолданылады.

Дифференциалды күшейткіш өріс транзисторларын қолданып та жасалуы мүмкін. Бұл операциялық күшейткіштер деп аталатын маңызды бөлігі, оның кіріс түйіні болып келеді.

### 3.1.10 Операциялық күшейткіш

Операциялық күшейткіш (ОК) – бұл жұмыс істеу кезінде күшейткіштегі теріс кері байланыс қасиеттерін пайдаланып, аналогтық шамаларда әртүрлі операцияларды орындауға арналған жоғары сапалы күшейткіш.

ОК тұрақты токтың күшейткіші болғандықтан, кірісі мен, шығысында және каскадтар арасында, конденсаторлар жоқ.

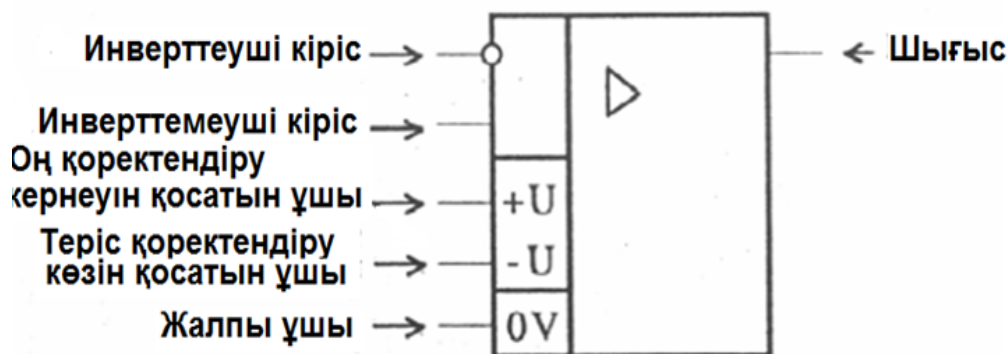
ОК алғаш рет XX ғасырдың 50-ші жылдарында жасалды және бастапқыда аналогтық компьютерлерде кейбір арифметикалық амалдарды (қосу, азайту, біріктіру және т.б.) орындауға арналған. Электрондық компьютерлердің дамуымен және аналогты құрылғылардың өмірден шеттетіліп, ығысуымен оның бастапқы функциясы жоғалды, бірақ олардың артында «операциялық» деген термині сақталды.

Өнеркәсіптік масштабта дискретті элементтерде жоғары сапалы ОК-ны жүзеге асыру мүмкін емес екенін атап өткен жөн. Сондықтан ОК электр тізбегінің күрделілігі маңызды емес және симметрия мәселесі оңай шешілетін интегралды технологияны кеңінен қолдану арқылы ғана кең таралды.

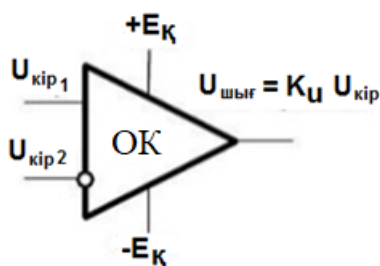
ОК-ның параметрлерінің жоғары жылуға деген тұрақтылығы және шуыл мен бөгетке қарсы тұрақтылығы, басқа да қасиеттерін қосқанда оны жоғары сапалы деп атауға болады. ОК-ны жасағанда ондаған және жүздеген транзисторлардың қолдануымен қол жеткізіледі. Біз білетіндей, интегралды технология элементтер параметрлерінің жоғары деңгейде қайталануымен ерекшеленеді. Сондықтан, ОК - ны транзисторлармен, резисторлармен және т.б. бірге тәуелсіз компонент ретінде қарастыруға мүмкіндік беретін бір корпуста берілген параметрлермен ОК жасай аласыз. Бір жағынан, ОК-ны жүздеген транзисторлардан тұратын өте күрделі күшейткіш, екінші жағынан ОК-ның өзіндік параметрлері мен сипаттамалары бар электр тізбектерінің құрамдас бөліктерінің бірі деп есептеуге болады.

Кез келген ОК құрамында кіріс дифференциалды күшейткіш, кернеуді күшейту каскады және қуатты күшейту каскады да бар. Сондықтан, ОК-да

инверторлық және инверторлық емес деп аталатын екі кіріс бар. ОК - ны белгілеудің екі нұсқасы мүмкін (1.60 сурет): қосымша кірістерсіз (а - нұсқа) және қосымша кірістермен (ә - нұсқа). Инверторлық кіріс белгілеуді шеңбермен ажыратады. Қосымша кірістер тікелей сызылады және олардың мақсатына сәйкес белгіленеді, мысалы, FC – жиілікті түзету кірістері, NC – теңдестіру кірістері.



а)



ә)

1.60 сурет - ОК – ны белгілеудің мүмкін варианттары

ОК – ны қолдану мақсатына қарай оны келесі топқа бөледі:

1) Жалпы қолдану жағдайларында оларға қатаң талаптар қойылмайтын және пайыз үлесінде қателіктерге жол беріледі.

2) Ұсақ дрейфтері мен шуылы, сондай-ақ жоғары күшейту коэффициенті бар дәлме-дәл.

3) Шығу кернеуінің жоғары өзгеру жылдамдығы бар және импульстік және кең жолақты құрылғыларды құру үшін пайдаланылатын жылдам әрекет ететіндер.

Кейде қуат көзінен аз тоқты (1 мА-дан аз) тұтынатын шағын қуатты ОУ бөлек топқа бөлінеді, оларды батарея жабдығында пайдалану ыңғайлы. Көпшілігінде шамадан тыс жүктемелерден және қысқа тұйықталудан қорғаныс бар.

Өндірісте шығарылған ОК - ның көпшілігінде 3...15 В кернеу көзі бар.

Барлық ои параметрлері екі топқа бөлінеді: статикалық (тұрақты ток) және динамикалық.

ОК – ның негізгі статикалық параметрлері:

1) Кернеудің күшейту коэффициенті (дифференциалды сигналды күшейту коэффициенті) )  $K_{yu} = \Delta u_{шығ} / \Delta u_{кір}$ . қосындысы / талдың қосындысы. Қазіргі ОК үшін ол бірнеше миллионға жетуі мүмкін.

2) Синфазалық фазалық кіріс сигналының әлсіреу коэффициенті  $K_{элс}$ . Ол 60...120 дБ тең.

3) Ығысу кернеуі  $U_{ығысу}$  – күшейту коэффициентіне кірісіне берілген нөлдік кіріс сигналы кезінде ОК шығуындағы кернеудің мәні. ОК – ның шығысында 0 алу үшін ОК кірісіне қандай кернеу қажет екенін көрсетеді.  $U_{ығысу} = 0$  алу үшін қосымша теңдестіру қажет. ығысу кернеуі  $U_{ығысу} = 0,005...50$  мВ шегінде болады.

4) Кіріс токтары  $I_{кір1}, I_{кір2}$ , кіріс токтарының  $\Delta I_{кір} = |I_{кір1} - I_{кір2}|$  қосындысы  $i_{кір} = 0$  кезінде анықталады. Дифференциалды каскадтың нормалау кірісі қалыпты жұмыс режимін қамтамасыз ету қажеттілігінен анықтайды. Токтардың айырмашылығы кірістер арасында дифференциалды кернеудің пайда болуына әкеледі.

5) Ығысу кернеуінің температуралық дрейфтері  $\Delta I_{кір}/\Delta$ , кіріс токтарының айырмасы – температура өзгерген кезде тиісті параметрлердің өзгеруін сипаттайды. Бұл параметрлер дәл күшейткіштер үшін маңызды, өйткені температураның өзгеруін өтеу қиын.

6)  $U_{қорек}$  қорек кернеуі. Номиналды қуат кернеуі мен рұқсат етілген қуат кернеуінің диапазоны бар.

7) Шығыс тогы (5 ... 20 мА).

8)  $R_{кір0}$  кіріс кедергісі (0,1...1000 МОм).

Динамикалық параметрлері:

1)  $f_B$  өткізу жолағының жоғарғы шекаралық жиілігі. Шекаралық жиілік ретінде пайда коэффициенті бір есе төмендейтін жиілік саналады ( $f = 0$ -мен салыстырғанда).

2)  $V_{U_{шығ}}$  - шығыс кернеуінің өсу жылдамдығы – оның амплитудасының ең жоғары мәні кезінде шығыс сигналының өзгеруінің ең жоғары жылдамдығы. Параметр шығыс сигналының ең аз ұзақтығын анықтайды.

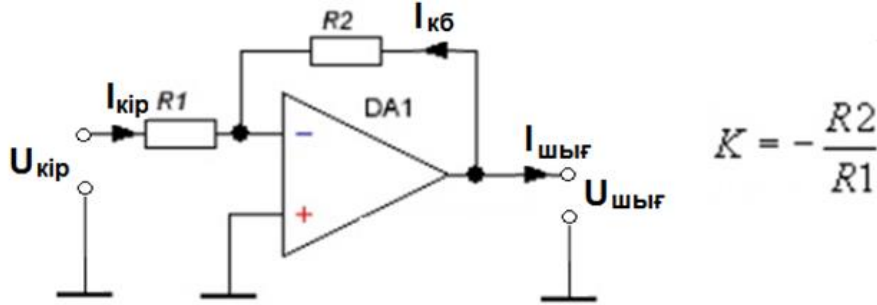
### **3.1.11 Операциялық күшейткіштер негізінде жасалған ауқымдаушы күшейткіштер**

Көбінесе қатаң дәл анықталған күшейту коэффициенті бар тұрақты ток күшейткіші болуы керек. Сондықтан мұндай жағдайларда ОК сөзсіз қолданылады.

Мысал үшін ОК – тен тұратын екі ауқымдаушы (масштабтаушы) күшейткіш сұлбасын қарастырайық:

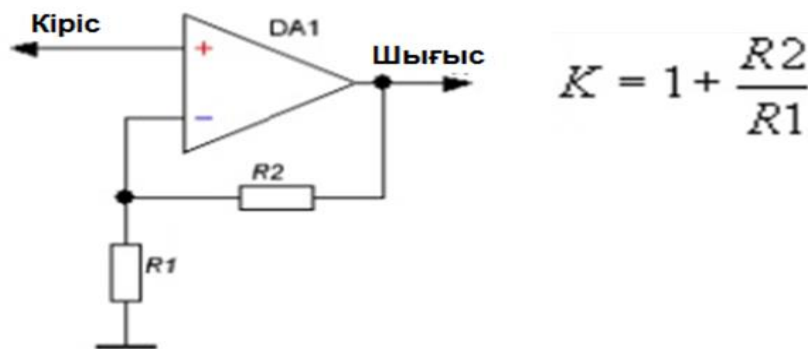


1) Инверттеуші күшейткіш (1.61 сурет).



1.61 сурет - Операциялық күшейткіштің инверттеуіш сұлбасымен қосылуы

Сигналды  $U_{\text{кір}}$  инверттейтін кіріске берсек, онда шығыс сигнал кіріс сигналға қарама-қарсы белгіде болады (фаза бойынша қарама-қарсы).



1.62 сурет - Операциялық күшейткіштің инверттеуіш сұлбасымен қосылуы

Ал егер, сигналды  $U_{\text{кір}}$  инверттемейтін кіріске берсек, онда шығыс сигнал мен кіріс сигналдың белгілері бірдей болады (фаза бойынша сәйкес болады).

### 3.1.12 Сигнал генераторлары

Сигнал генераторы (СГ) – берілген амплитуданың, жиіліктің және форманың мезгіл-мезгіл өзгертін кернеуін қалыптастыратын электрондық құрылғы.

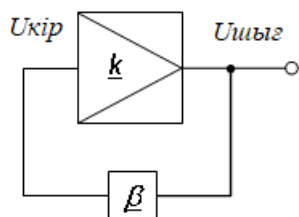
Егер СГ қосымша мерзімді сигналды қолданбай жұмыс істесе, онда ол автоматты генератор деп аталады, әйтпесе тәуелсіз қозуы бар СГ. Соңғысы-аз қуатты Автоматты генератордан сигнал берілетін таңдамалы қуат күшейткіші (мысалы, мониторлар мен теледидардың Кадрлық сканерлеу генераторы).

Нысан бойынша тербеліс генерация жасайтын СГ екіге бөледі:

синусоидальқ тербеліс генераторлары және арнаулы үлгілі сигналдар генераторлары.

### 3.1.13 Синусоидальды тербеліс генераторы

Бұл сигнал генераторы құрылымы 1.63-суретте көрсетілген. Ол Күшейту коэффициенті  $k$  – ға тең (комплекттік сан) күшейткіштен және кері байланыс коэффициенті  $\beta$  бар оң кері байланыс ұйымдастыратын (ОКБ) тізбегінен тұрады. Осыған сәйкес күшейткіш пен тізбек үшін келесі шамаларды жазуға болады:



1.63 сурет - Синусоидальды тербеліс генераторының құрылымы

$$\begin{aligned} \dot{U}_{шығ} &= \underline{k} \dot{U}_{kip}; \\ \dot{U}_{kip} &= \underline{\beta} \dot{U}_{шығ} \end{aligned}$$

Осыған байланысты

$$\dot{U}_{шығ} = \underline{k} \underline{\beta} \dot{U}_{шығ}.$$

Алынған теңдік  $\underline{k} \underline{\beta} = 1$  жағдайында дұрыс болады, оның орындалуы автоматты генераторда, өшпейтін тербелістердің пайда болуын қамтамасыз етеді.

$$\underline{k} = k e^{j\varphi}, \quad \underline{\beta} = \beta e^{j\psi}, \quad k e^{j\varphi} \beta e^{j\psi} = 1.$$

Содан кейін біз екі шартты орындау қажеттілігін аламыз:

-  $k \beta = 1$  - амплитудалық тепе – теңдік;

-  $\varphi + \psi = 0$  - фазалық тепе-теңдік.

Фазалық тепе-теңдік жағдайы сұлбада оң кері байланыс болуын білдіреді.

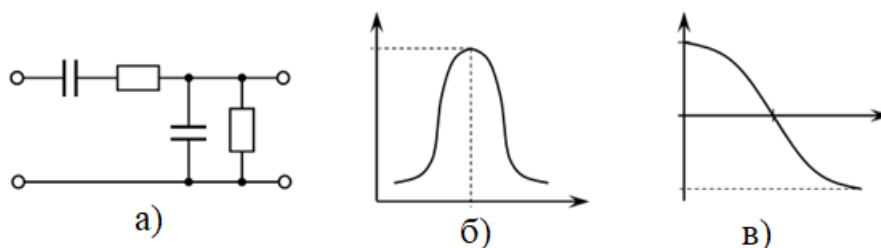
Амплитудалық тепе-теңдік шарты шығындарды қуат көзінің энергиясымен толтыру фактісіне сәйкес келеді. Әдетте  $i$  - нің мәндері  $k$ -тің 1-ші параграфы болатындай етіп таңдалады. Сонымен қатар, күшейткіштің сызықтық емес сипаттамаларына байланысты (кіріс кернеуінің жоғарылауымен  $k$  кірісі төмендейді) үлкен кіріс сигналдарында тербеліс амплитудасының тез қалпына келуі байқалады.

$k$  коэффициенттері жиілікке байланысты. Оң кері байланысы мен жабылған кез келген күшейткіш автоматты түрде генераторға айналуы мүмкін.

Алайда, төмен жиілікті тербелістерді (50 кГц-тен аз) алу үшін LC генераторларын қолдану индуктивтіліктің үлкен мәндеріне (демек, өлшемдерге)

және тербелмелі тізбектің сыйымдылығына байланысты мүмкін емес, сондықтан RC генераторлары қолданылады. LC генераторларымен салыстырғанда олардың өлшемдері, салмағы мен құны аз.

RC генераторларында қолданылатын жиілікке тәуелді төрт түрлі типі бар: L – тәрізді, RC тізбектері, Вин көпірі, T-тәрізді және қос T-тәрізді көпірлер.

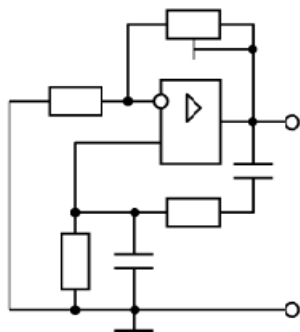


1.64 сурет - Вин көпірінің сұлбасы. Амплитудалық-жиіліктік сипаттамасы (а) және фазалық-жиіліктік сипаттамасы ( f )(в )

ОК-дағы қарапайым RC генераторында (1.64 сурет) R1, R2 кедергісі бірдей резисторлар және C1 және C2 сыйымдылығы бірдей конденсаторлар ПОС тізбегіне қосылып, шарап көпірін құрайды. ОК және R3, R4 резисторлары  $k_u = 1 + R4/R3$  кіріс коэффициенттері бар өзгермейтін күшейткіш болып табылады. Реттеу резисторының көмегімен R4 гармоникалық тербелістердің минималды бұрмалануына қол жеткізеді. Көбінесе ООС тізбегіне (R3 орнына) автоматты түрде пайда болатын түзету тізбегі (агу) кіреді, бұл синусоидалы тербелістерді автоматты түрде алуға мүмкіндік береді.

Генератордың жиілігін реттеу үшін R1, R2 және/немесе C1, C2 ретінде механикалық жұптасқан Резисторларды және/немесе конденсаторларды қосуға болады.

LC-және RC-генераторларының маңызды кемшілігі-өндірілетін кернеудің Төмен жиілік тұрақтылығы. Бұл, ең алдымен, катушкалар мен конденсаторлар сыйымдылығының температураға салыстырмалы түрде жоғары тәуелділігіне байланысты. Бірқатар шараларды қолдану  $F / f = 10^{-4} \dots 10^{-5}$  жиілігінің салыстырмалы тұрақсыздығына қол жеткізуге мүмкіндік береді. Алайда, генератордың жиілігін тұрақтандырудың ең тиімді әдісі - кварцты тұрақтандыру, онда кварц резонаторы немесе жай кварц тербелмелі жүйе ретінде қолданылады. Бұл жиіліктің салыстырмалы тұрақсыздығына  $10^{-10}$  дейін жетеді.



1.65 сурет - RC-генераторы

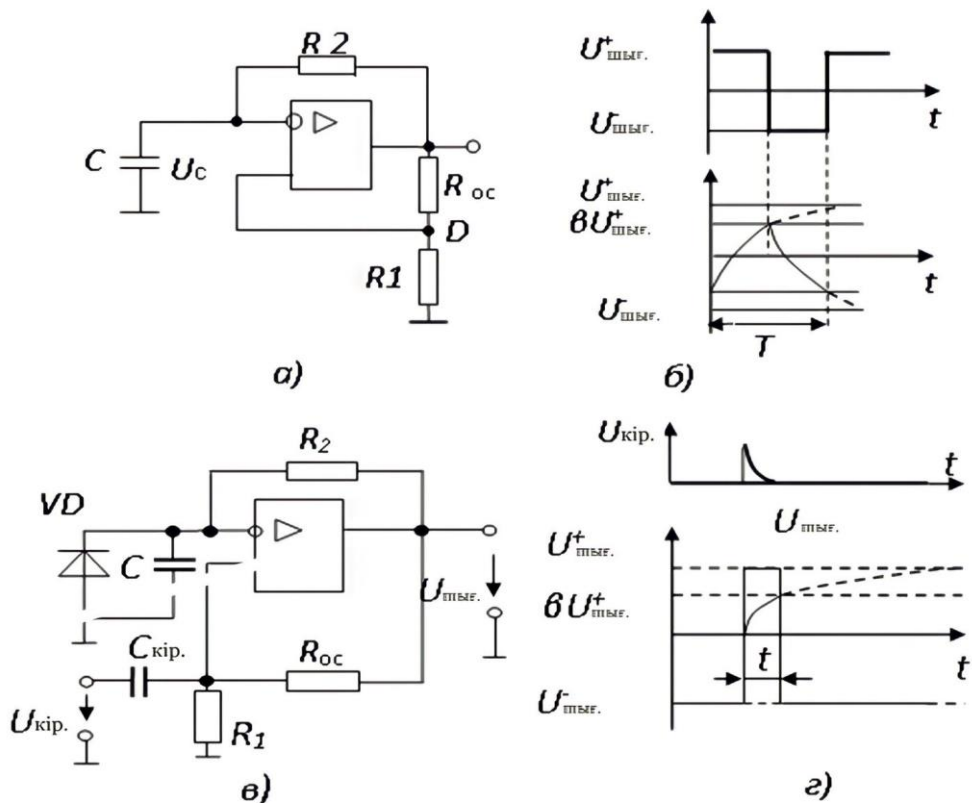
### 3.1.14 Мультивибратор

Мультивибратор-тікбұрышты пішінге жақын кернеу генераторы. Оның атауы Фурье қатарындағы ыдырау кезіндегі мұндай кернеудің көптеген жоғары гармоникалардан (мульти – көп) тұратындығын көрсетеді.

Күшейткіштің шығыс кернеуі тек өте тар диапазонда (бірнеше микровольт) кіріс кернеуіне сызықтық тәуелді екені белгілі. Егер кіріс кернеуі осы диапазоннан асып кетсе, онда шығыс сигналы тек екі мәнді қабылдай алады:  $+U_{\text{шығ}} \approx +12 \text{ В}$ ) және  $-U_{\text{шығ}} \approx -12 \text{ В}$ ). Мультивибратордың тікбұрышты кернеуін қалыптастыру принципі жұмыс күшейткішінің осы ерекшелігіне негізделген (1.66, а сурет).

Күшейткіштің кірістері арасындағы қосу кезінде теріс потенциалдар айырмасы аз (милливольт бірліктері жеткілікті) делік. Бұл жағдайда шығу кезінде кернеу  $+U^{\text{шығ}}$  пайда болады, ал R1 және R2 бөлгішінен инверттелмеген кіріске  $\beta U_{\text{шығ}}$  оң потенциалы беріледі. Макс, мұндағы  $\beta = R1/(R1+Roc)$ . Конденсатор «Uvuh–R3–с–корпус» тізбегі арқылы зарядтай бастайды,  $+Uvuh$  потенциалына жетуге тырысады. Инверттелген кірістегі Потенциал  $\beta U + \text{Шығыс}$  инверттелмеген кірістегі потенциалдан асқанға дейін өсе бастайды. макс. бұл кезде күшейткіш теріс кернеуді шығарады  $-Uvu$  және инверттелмеген кірісте теріс потенциал  $\beta U - oh$  жасайды. макс. енді конденсатор потенциалға жету үшін қайта зарядтай бастайды  $-Uvuh$ . Алайда, инверттелген кірістегі потенциал инверттелмеген кірістегі потенциалдан төмен болған кезде  $-UD$ , күшейткіш шығуда оң кернеу  $+u$  түзеді.

$+U_{\text{шығдейін}} - U_{\text{шығ}}$  шығыс кернеулері өзгерістерде болатын мұндай секіру процестері операциялық күшейткіште қорек кернеуі ажыратылмайынша қайталана береді. (1.66, б сурет).



1.66 сурет - Автоматты тербеліс режимінде жұмыс істейтін (а) және күту режимінде жұмыс істейтін мультивибратордың схемасы (в), олардың жұмысын түсіндіретін графиктер (б, г).

Тербелістің  $T$  кезеңі конденсатордың заряд уақытының тұрақтысымен анықталады  $\tau = R_3C_3$ , сондай-ақ  $R_1R_2$  бөлгішінің потенциалы  $U_V$  кернеуінен қаншалықты аз.

Күту мультивибраторы (1.67 сурет) берілген ұзақтықтың импульстарын қалыптастырады. Іске қосу импульсінің келуімен мультивибратор біраз уақытқа созылатын тұрақсыз күйге өтеді  $t$  және уақытша  $RC$  тізбегімен анықталады, содан кейін құрылғы бастапқы күйіне оралады.

Диод пен конденсаторда тұрақты күйді орнату үшін (күту режимінде)  $C$  конденсаторына паралель  $VD$  (1.67 сурет) полярлы диодын қосамыз, соған сәйкес ОК терістейтін кірісінде кернеу  $U_{тура}$  диодтың тура кернеуіне тең болады. Бұған шығыстағы бір вибратордың кернеуі  $U_{шығ.макс}$  сәйкес келеді. ОК терістемейтін кірісіне күтуші мультивибратор жағдайында біраз уақыт болатын  $\beta U_{шығ.макс}$  кернеуі беріледі. Осы кезде  $C$  конденсаторы  $\tau_3 = CR_2$  тұрақты уақытпен  $R_2$  резисторы арқылы  $\beta U_{шығ.макс}$  кернеуіне дейін зарядталуға тырысады. Конденсатор  $C$  кернеуі  $\beta U_{шығ.макс}$  кернеумен теңделсе, құрылғы секіру арқылы тұрақсыз күйден тұрақты күйге ауысады да келесі жіберілетін импульсті күтеді.

Қарастырылған мультивибраторлардан басқа, өнеркәсіп интегралды дизайндағы мамандандырылған мультивибраторларды шығарады.

### 3.1.15 Аратісті кернеу генераторы

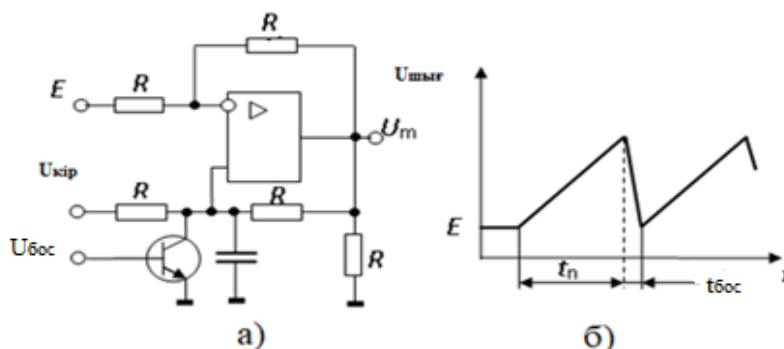
Егер конденсатордағы кернеу тікелей кернеуге тәуелді емес тұрақты токпен зарядталса және осы токқа жүктеме кедергісінің әсерін болдырмаса, яғни  $RH \gg R$  шарты орындалуы керек.

Өрнекті уақыт бойынша біріктіру арқылы:

$$I_C = C \frac{dU_C}{dt}, \quad \int dU_C = \frac{I_C}{C} \int dt \quad \text{немесе} \quad U_C = \frac{I_C}{C} t.$$

$I_C = \text{const}$  жағдайы операциялық күшейткішке негізделген кернеу генераторының (GPN) тізбегінде (1.67, а сурет.) и тұрақты кернеуімен қамтамасыз етіледі. Транзистор құлыпталған кезде, уақыт ішінде  $TN$ , конденсатордың заряды өтіп, ондағы кернеу түзу сызықта артады. Күшейткіш өзінің кірістеріндегі мүмкін айырмашылықты нөлге жақын етуге тырысып, конденсатордағы кернеуді қайталайтын Шығыс кернеуін құрайды.  $U_{\text{босату}}$  импульсін беру кезінде транзистор ашылады және конденсатор  $t_{\text{босату}}$  кезінде ол арқылы тез ағып кетеді, содан кейін зарядтау процесі қайталанады.

Сұлбаның шығыс кернеуі аратәрізді түрге айналады, ол  $-U_{\text{шығ}}$  таң  $+U_{\text{шығ}}$  дейінгі диапазонда кернеу нәтижесі орналаспағанша сақталады.



1.67 сурет - Ара тәрізді кернеу генераторы (а), шығу кернеуінің нысаны (б)

$t_n$  ұзақтығы  $U_{\text{kip}}$  және  $R$  резисторлар кедергісіне тәуелді  $C$  сыйымдылығы мен зарядтау тогымен анықталады.  $E_0$  кернеуін өзгерте отырып, кернеу кестесін тігінен ығыстыруға болады.

### 3.1.16 Аналогтық сигнал компараторлары

Сигналдарды салыстыру, қосу және ауыстыру (коммутация), сондай-ақ бірнеше көздерден келетін сигналдарды біріктіру компараторлар мен коммутаторлармен жүзеге асырылады.

### 3.1.17 Аналогтық кернеу компараторлары

Кернеу компараторлары екі кернеуді салыстыруға және салыстыру нәтижесін логикалық түрде беруге арналған интегралды сұлбалар деп аталады: көп немесе аз. Кернеу компараторы оның сигналдық кірістері арасында қолданылатын кернеудің полярлығына сезімтал. Шығу кернеуі жоғары болады  $U_1$ , инверттелмеген және инверттелген сигналдық кірістер арасындағы кернеу айырмашылығы оң болған кезде және керісінше, айырмашылық кернеуі теріс болған кезде компаратордың шығыс кернеуі логикалық нөлге сәйкес келеді  $U_0$ .

Аналогтық компараторлар оларды пайдалану кезінде ескерілуі керек. Параметрлер жиынтығымен сипатталады. Негізгі параметрлерді статикалық және динамикалық деп бөлуге болады. Статикалық параметрлерге оның күйін тұрақты режимде анықтайтындар кіреді:

- шекті сезімталдық - бұл компаратормен анықталатын және шығуда логикалық сигнал ретінде бекітілетін минималды айырмашылық сигналы;

- ығысу кернеуі  $e_{см}$  -компаратордың берілу сипаттамасының идеалды позицияға қатысты ығысуын анықтайды (бұл ығысуды түзету үшін тепе-теңдік қолданылады);

$I_{+кір}$  және  $I_{-кір}$  – компаратордың кіріс терминалдары арқылы өтетін токтар;

- кіріс токтарының айырмашылығы  $\Delta I_{кір} = I_{+кір} - I_{-кір}$  – қысқартылған кірістер арқылы өтетін ток;

- гистерезис кернеуі  $U_T$ -кіріс кернеуінің жоғарылауы немесе төмендеуі кезінде компаратордың пайда болуына әкелетін кіріс кернеулерінің айырмашылығы;

$K_{элс.}$  фазалық сигналының әлсіреу коэффициенті- $U_{сиф}$  фазалық сигналының  $K_{элс.} = 20 \lg(U_{сиф}/\Delta U_{кір})$  компараторының іске қосылуын тудыратын  $\Delta u_{кір}$ . дифференциалды сигналына қатынасы; кіріс кедергісі-кіші айырмашылық сигналы үшін толық кіріс кедергісі;

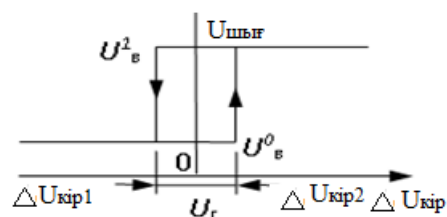
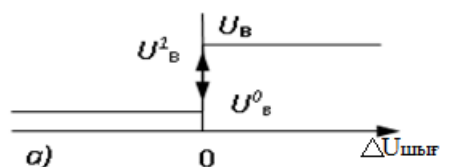
Шығыс логикалық деңгейлері- $U_1$  және  $U_0$  кернеуінің мәні;

Шығыс тогы  $I_{шығ}$  - компаратор жүктемеге берген ток.

Компаратордың аталған статикалық параметрлерінің кейбірі оның жалпы қателігіне әсер етеді. Бұл параметрлерге нөлдік деңгейдің ығысу кернеуі және оның  $desm / dT$  температуралық коэффициенті,  $I_{кір}$  кіріс токтары және олардың  $DivX$  айырмашылығы, сондай-ақ  $U_T$  гистерезисінің кернеуі кіреді,

Компаратордың гистерезисі  $U_0$  күйінен ауысу,  $U_1$  күйі кіріс кернеуінде  $\Delta U_{кір1}$ , ал  $U_1$ – ден  $U_0$ -ға оралу  $\Delta U_{vx2}$  кернеуінде болады. Айырмашылық  $\Delta u_{кір1} - \Delta u_{кір2} = U_T$ , гистерезис кернеуімен аталады (1.68 сурет). Гистерезис кернеуі, егер

$\Delta U_{вх}$  белгіні өзгертсе, компаратордың толық қателігіне енеді. Гистерезистің болуы Компараторда оң кері байланысты қолданумен байланысты, бұл  $\Delta U_{кір}=0$  кезінде  $u_{шығ}$ -тің бұзылуын жоюға мүмкіндік береді. Гистерезистің болуы белгісіздік аймағының пайда болуына әкеледі, оның ішінде  $\Delta U_{кір}$  мәнін анықтау мүмкін емес.



б)

1.68 сурет. Беріліс гистерезиссіз (А) және гистерезиспен (б) компаратордың сипаттамасы.

Оның жылдамдығын анықтайтын компаратордың негізгі динамикалық параметрі-секіргіш кіріс сигналының таралуының кідіріс уақыты. Кейде бұл уақыт компараторды ауыстыру уақыты деп аталады. Бұл уақыт кіріс сигналының  $\Delta U_{кір}$  берілген сәтінен бастап Шығыс сигнал  $u_{шығ}$  немесе  $u_{0шығ}$  деңгейіне жеткен сәтке дейін есептеледі. Таратудың кідіріс уақыты  $\Delta U_{кір}$  кіріс дифференциалды сигналының деңгейіне байланысты. Кернеудің жоғарылауымен  $\Delta U_{кір}$  таралудың кідіріс уақыты азаяды. Кіріс кернеуі тапсырыс бойынша өзгерген кезде, кідіріс уақыты шамамен 2,5 есе өзгереді.

Компараторлардың жіктелуі. Компараторлардың интегралды сұлбаларын параметрлер жиынтығы бойынша үш топқа бөлуге болады:

- жалпы қолдану ( $t_{зд,р} < 300$  нс,  $K_u < 100$  дБ);
- жылдам әрекет ететін ( $t_{зд,р} < 30$  нс);
- прецизионды ( $K_u > 100$  дБ,  $есм < 3$  мВ,  $D_{ікр} < 10$  нА).

Сонымен қатар, компараторларды стробирленетін және стробирленбейтін, сондай-ақ жадылы және жадысыз деп бөлуге болады.

Төмендегі кестеде стробациясы бар екі жылдам компаратордың негізгі параметрлері келтірілген. Екі компараторда үш дифференциалды Каскад бар,



бұл өте жоғары шекті сезімталдықты қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, олар үздіксіз стробация режимінде жоғары жылдамдыққа ие.

*Жылдам әрекет ететін компараторлардың негізгі параметрлері*

Параметрлер компаратор түрлері

KM597CA11 KM597C2A2

Шығу логикалық сигналдары ESL TTL

Шекті сезімталдық, мВ 0,25 0,25

Ығысу кернеуі, мВ 2 2

Кіріс тогы, мкА 10 10

Кіріс токтарының айырмасы, мкА 1 1

Фазалық сигналдың әлсіреу коэффициенті, дБ 80 80

Таратуды кідірту уақыты, нс 6,5 12

Іріктемені шешу уақыты, нс 3 6

Стробтаудың максималды жиілігі, МГц 125 80

Жадының болуы жоқ

Жалпы қолданылатын компараторлар кестеде көрсетілгендерге қарағанда қарапайым сипаттамаларға ие.

1. Алайда, бұл компараторлардың артықшылығы бар – олар аз қуатты тұтынады, төмен кернеуде жұмыс істей алады және бір корпуста төрт компараторға дейін орналасады. Сонымен, k1401sa2 типті орташа жылдамдықты және аз тұтыну тогының өлшенген компараторларында таралудың кідіріс уақыты 3 мкс-тен аз, тұтыну тогы 2 мА, пайда 90 дБ және нөлдік деңгейдің ығысу кернеуі 5 мВ-тан аз.

Жалпы қолданыстағы көптеген компараторларда ашық коллекторлы транзистор бар, бұл транзистордың жүктемесін сыртқы қуат көзіне қосуға мүмкіндік береді, оның кернеуі қолданылатын логиканың түріне байланысты таңдалады. Жүктеме резисторының кедергі мәні 100 шегінде таңдалады... 1000 Ом. Аз қарсылықтар жоғары ауысу жылдамдығын қамтамасыз етеді.

Дәл компараторлар жалпы қолдану компараторларынан бірқатар жақсартылған сипаттамаларымен ерекшеленеді. Олардың жоғарылаған пайдасы, шекті ауысу кернеуі, нөлдік ығысу кернеуі және аз кіріс тогы бар. Бұл компараторлардың өнімділігі әдетте өте жоғары емес, ауысу уақыты кестеде мысал ретінде 300 мың В – ден аз.

2. Дәл компараторлардың кейбір түрлерінің сипаттамалары келтірілген. PRECISIONMONOLITHICS компаниясының CMP-02 компараторы ең жоғары параметрлерге ие.

*Дәл компараторлардың негізгі параметрлері*

Параметр компаратор түрі

CMP - 02 K554CA3

Күшейту коэффициенті 500000 150000

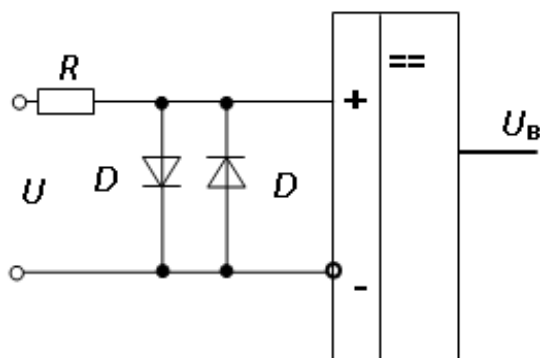
Ығысу кернеуі, мВ 0,8 3  
Кіріс тогы, 3 10  
Ауыстыру уақыты, нс 190 200

К554saz отандық компараторы шекті сезімталдық пен нөлдік ығысу кернеуінен сәл төмен. Бұл компараторлардың өнімділігі бірдей.

Аналогты компараторлардың негізгі ерекшеліктері олардағы жиілікті түзетудің болмауымен және үлкен пайда деңгейімен байланысты. Операциялық күшейткіштерден айырмашылығы, компараторларда теріс кері байланыс ешқашан қолданылмайды, өйткені бұл олардың жұмысының тұрақтылығын төмендетеді. Мамандандырылған кернеу компараторлары кішігірім кідірістерге, жоғары ауысу жылдамдығына ие, үлкен коммутациялық сигналдарға төзімді.

Компараторлардағы сигналдарды салыстыру кезінде бірнеше ауысуларды жою үшін оң кері байланыс жиі қолданылады. Оң кері байланыс компаратордың сенімді ауысуын қамтамасыз етеді және салыстыру кезінде Шығыс кернеуінің бұзылуын жояды. Алайда, оң кері байланыс енгізілгенде, гистерезиске байланысты белгісіздік аймағы құрылады. Егер компаратордың кірісіндегі сигнал монотонды түрде өзгерсе, онда гистерезистің болуы компарация қатесіне әсер етпейді.

Теріс кері байланыстың болмауына байланысты компаратордың кірістеріндегі кернеулер айтарлықтай өзгеруі мүмкін. Сондықтан, компаратордың кіріс кернеуін шектеу үшін екі жақты диод шектегіші жиі орнатылады, оның сұлбасы суретте көрсетілген. 3.25.



1.69 сурет - Екі жақты диод шектегіші бар компаратор сұлбасы

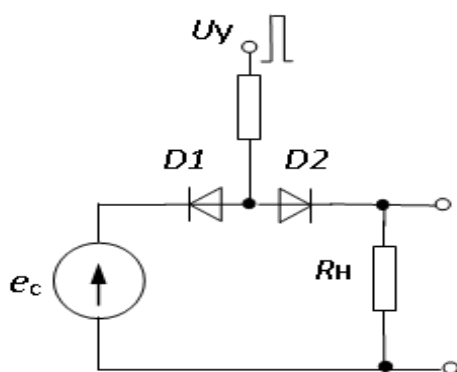
Компаратордың жылдамдығы кіріс дифференциалды сигнал деңгейіне байланысты. Кіріс сигналының белгілі бір мәнге жоғарылауымен коммутация уақыты азаяды. Алайда, кіріс сигналының одан әрі артуы компаратордың қанығуына және оның жылдамдығының төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осыған байланысты суретте көрсетілген екі жақты шектегіш 1.69-суретте кернеудің аз төмендеуімен Шоттки диодтарын пайдалану ұсынылады. Кіріс кернеуінің ұсынылған мәні компаратордағы анықтамалық мәліметтерде көрсетілген және әдетте 20 шегінде болады... 100 мВ.

Теріс кері байланысты қабылдамау кернеу компараторларын қолданудың тағы бір ерекшелігіне әкеледі – олардың кіріс кедергісінің төмендеуі және кіріс тогының жоғарылауы. Кіріс кернеуінің шекті мәннен жоғарылауымен компараторлар кіріс тогын күрт арттырып, кіріс кедергісін төмендетуі мүмкін. Бұл екі себепке байланысты: дифференциалды каскадты транзисторлардың негізгі тогының күрт артуы және қорғаныс диодтарының қосылуы.

Аналогтық сигналдарды құрастыру үшін жұмыс күшейткіштерін қолдануға болады. Бұл жағдайда Шығыс кернеуін шектеу үшін теріс кері байланыс тізбегіне сандық логикалық элементтің түріне байланысты кернеу қосылған зенер диоды қосылады. Ои компараторларының негізгі кемшіліктері- төмен өнімділік және көптеген сыртқы дискретті элементтер. Мұндай компараторларды ауыстыру уақыты әдетте 0,5...1,0 мкс құрайды. Паразиттік ұрпақты жою үшін сыртқы оң кері байланыс қолданылады, оның көмегімен гистерезис аймағы қалыптасады.

### 3.1.18 Электронды кілт

Электрондық кілт жүктемедегі токты ауыстыруға (ауыстыруға) арналған. Егер кілт өте жақсы болса, онда оның ашық күйдегі кедергісі шексіздікке тең, ал жабық күйде ол нөлге тең болады. Электрондық кілт идеалдан өзгеше. Жартылай өткізгіш кілт тізбегінде кілттің рөлін жалпы эмитенті бар сұлба бойынша қосылған биполярлы транзистор немесе жалпы көзі бар сұлба бойынша қосылған өріс атқарады. Бұрын диодтарға сұлбалар кеңінен қолданылды (1.70 сурет).



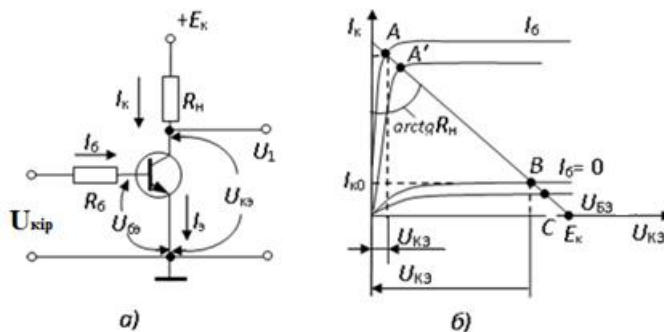
1.70 сурет

Басқару кернеуі болмаған кезде диод кілті құлыпталады. Диодтардың анодтарына оң басқару кернеуі берілген кезде диодтар ашылып, кілт жабылады. Диодтық кілттің ығысу кернеуі D1 id2 диодтарындағы тікелей кернеулердің айырмашылығымен анықталады. Таңдалған диодтармен ығысу кернеуі 1 шегінде болады 5 мВ. Коммутация уақыты диодтардың жылдамдығымен анықталады. Диодтық кілттер үшін әдетте Шотки диодтары немесе жұқа негізі бар кремний эпитаксиалды диодтар қолданылады. Осы диодтарда заряд

тасымалдаушылардың әсерлері және олардың пәрменділігі әлсіз екендігі бөгетті сыйымдылықтарды қайта зарядтауда анық көрінуде. Ашық диодтың дифференциалды кедергісі диодтардың дифференциалды кедергілерінің қосындысына тең және 1-ден 50 Ом-ға дейін болуы мүмкін.

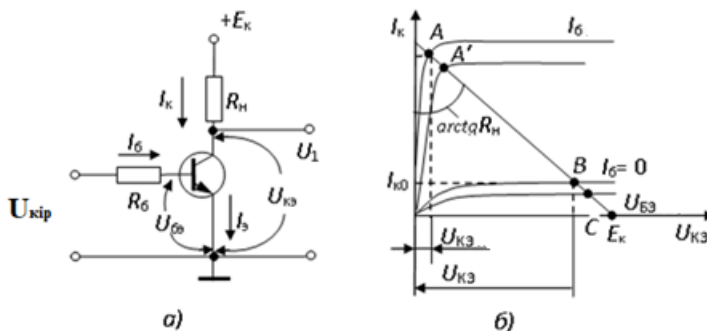
Бұл кілттің басты кемшілігі-басқару сигналының  $m_i$  жүктемесі арқылы тікелей өтуі. Кедергі кернеуін азайту үшін бұл тізбекті сигнал көзі мен жүктеме кедергісінің төмен кедергісі үшін қолданған жөн. Сонымен қатар, басқару тізбегіндегі токты азайту үшін  $r_u$  кедергісін арттырған жөн. Алайда, басқару тогының төмендеуі диодтардың дифференциалды кедергісінің жоғарылауына әкелетінін ескеру қажет.

Биполярлы транзисторлардың кілттері диодтық кілттерге қарағанда анағұрлым жетілдірілген және электронды тізбектерде жиі қолданылады. Бір биполярлық транзистордағы қарапайым кілт суретте көрсетілген. 2.27. Ол Т1 негізгі транзисторынан және Т2 транзисторындағы басқару тізбегінен тұрады. Құрылымы бойынша транзисторлық кілт суретте көрсетілген қос диодты кілтке ұқсас. 2.26. Базалық ток болмаған кезде Т1 Транзисторы жабылып, кілт ашылады, ал басқару тогының негізі арқылы өтетін кезде  $i_b > i_{b0}$  кілт бізге жабық. Бұл жағдайда коллекторлық және эмиттер өткелдері ашық және күріш сұлбасындағы ашық диодтар сияқты әрекет етеді.



1.71 сурет - Қарапайым транзисторлық кілт тізбегі

Негізгі режимде жұмыс істеген кезде пайда болатын транзистордағы процестерді қарастырыңыз (1.72 сурет).



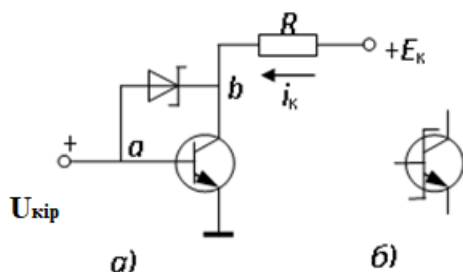
1.72 сурет - Биполярлық транзистордағы негізгі сұлба (а), оның шығыс вольт-Ампер сипаттамалары (б)

Мұндай кілтті басқару (1.72, а сурет)  $U_{кiр}$  сигналын жүзеге асырады.  $U_{кiр}=0$  кезінде базалық ток нөлге тең болады және тізбектің күйі В нүктесімен анықталады (1.72, б сурет)  $I_B=0$  кезінде транзистордың шығу сипаттамасымен жүктеме түзуінің қиылысуы. Транзистор ашық кілтке тең болатын кесу күйінде болады, ал К нүктесінің потенциалымен анықталатын шығыс кернеуі ике  $OT_S$ -ке тең, яғни  $E_k$ -тен сәл аз. Транзисторды қанықтыру режиміне өткізетін  $I_{B_{нас}}$  базалық тогын құру үшін жеткілікті  $U_{кiр}$  кезінде  $U_{кэ}$  кернеуі вольт үлесін құрайды. Бұл жағдайда тізбектің күйі а нүктесімен анықталады, ол жабық кілтке тең, ал шығыс кернеуі  $U_{кэнас}$ -қа тең, яғни нөлдік деңгейден сәл жоғары. Осылайша, транзистор идеалды емес кілт сияқты әрекет етеді.

Транзисторды бір күйден екінші күйге ауыстыру бірден пайда болмайды, ол аз, бірақ соңғы уақытты қажет етеді. Дәл осы уақыт барлық сандық құрылғылардың жұмысын анықтайды.

Ток биполярлы транзистор арқылы ағып жатқанда, базада негізгі емес тасымалдаушылар жиналады. Сонымен қатар, коллекторлық ток неғұрлым көп болса, осы сәтте көбірек тасымалдаушылар базада жиналуы керек, яғни базада  $Q_B$  заряды жасалады.  $U_б$  басқару кернеуі құлыптаулы болғаннан кейін, коллекторлық ток қуат көзі базадағы тасымалдаушылардың артық болуына байланысты біраз уақыт өзгеріссіз қалады.  $T_P$  уақытының бұл сегменті негізгі емес медианы базалық аймақтан шығару уақыты деп аталады. Тек  $T_P$  уақытынан кейін транзистордың қанықтыру күйінен кесу күйіне ауысуы орын алады және электр тогы негізгі тізбектің бекітілген күйіне сәйкес келетін  $I_{CO}$  деңгейіне дейін төмендейді (В нүктесі вольт-Ампер сипаттамаларында).

Егер транзистор ашылғаннан кейін қанықтыру күйі мен белсенді жұмыс режимі арасындағы шекарада болса, резорбция кезеңін жоюға болады. Ол үшін интегралды сұлбаларда транзистордың базалық-коллекторлық ауысуына параллель қосылған Schottki диоды қолданылады. Бұл құрылым Schottki Транзисторы деп аталады (1.73 сурет).



1.73 сурет - Schottki транзисторы: сұлбалық сұлба (а), шартты белгі (б)

Естеріңізге сала кетейік, белсенді режимде транзистордың негізгі коллекторы кері бағытта жылжиды, яғни  $u_{vх}$ -ке қосылған базаның әлеуеті

коллектордың әлеуетінен әлдеқайда төмен. Транзистор тогының жоғарылауымен коллектордың потенциалы төмендейді және қаныққанға жақындағанда базаның потенциалынан төмен болады. Сонымен қатар, транзистордың қанықтыру дәрежесін жоғарылататын артық негізгі емес медиа базада жинала бастайды. Егер сызбада күш болса 1.73 сурет, ал диод болмады, содан кейін токтың жоғарылауымен В нүктесінің потенциалы транзистордың қанығуы пайда болатындай болады. Бұл сұлбада болмайды, өйткені нүктенің потенциалы шамалы (0,1 В-тан аз) төмендеген кезде, А нүктесінің *botosnosito* нүктесінен Schottki диоды ашылады және артық заряд базаның аймағынан коллекторға шығарылады. Интегралды дизайндағы Schottki диоды-бұл металдың транзистордың коллекторлық аймағымен байланысы және бірыңғай құрылымды құрайды.

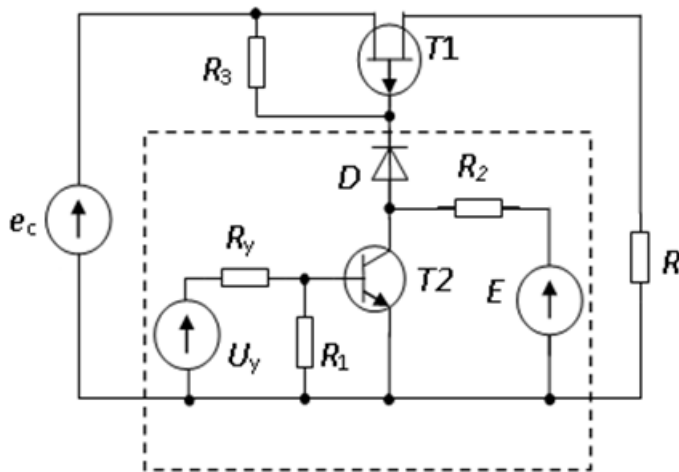
*P-n*-түйіспелері бар және оқшауланған қақпалары бар өріс транзисторларындағы кілттер қазіргі уақытта әртүрлі интегралды сұлбаларда кеңінен қолданылады. Ең алдымен, бұл кілттердің төмен ағып кету токтары, басқару тізбегінің төмен тұтынылуы, орын ауыстыру кернеуінің болмауы, өндіріс тиімділігі сияқты артықшылықтарына байланысты.

Транзисторлардағы өтпелі процестер кілттердің жылдамдығына айтарлықтай әсер етеді. Осыған байланысты оқшауланған қақпасы бар өріс транзисторлары басым қолданылады, олардың паразиттік сыйымдылығы аз. Ең көп таралған кілттер өрістік транзисторларының қосымша (келісілген) жұбында болды, олардың бірінде *p* типті арна бар, ал екіншісінде *n* типті арна бар.

Оқшауланған ысырмасы бар өріс транзисторларындағы кілттердің ерекшелігі ашық арнаның кедергісінің коммутациялық сигналға қатты тәуелділігі болып табылады, бұл кіріс сигналымен арнаның өткізгіштігін модуляциялауға және қосымша сызықты емес бұрмаланулардың пайда болуына әкеледі. Арнаның өткізгіштік модуляциясынан туындаған бұрмалануды азайту үшін мұндай кілттер кіріс сигналдарының деңгейін шектейді және кілттің салыстырмалы түрде үлкен жүктеме кедергісін пайдаланады. *P-n*-ауысуын басқаратын өріс транзисторларында да ұқсас әсер бар, бірақ оны азайту үшін кіріс сигналына байланысты Басқару сигналы қақпаға беріледі.

1.74 сурет T1 өріс транзисторындағы *p-n*-түйіспесі мен *p*-типті арнадағы кілт сұлбасы берілген. Басқару тізбегі T2 транзисторында орындалады және оның қуаты  $e_c$  кернеу көзінен алынады, *d* диоды кіріс сигналдарының кез келген мәні үшін Ысырма көзінің кернеуі нөлге тең болуы үшін қажет.

Кіріс сигналымен канал өткізгіштігінің модуляциясын болдырмау үшін R3 кедергісі арқылы Ысырма ЕО сигнал көзінің кернеуімен байланысты.



1.74 сурет - Басқарылатын  $p-n$ -ауысулы өріс транзисторындағы кілт сұлбасы

Басқару құрылғысы келесідей жұмыс істейді. Егер басқару кернеуі нөлге тең болса, онда T2 транзисторы құлыпталады және R2 кедергісі арқылы +E кернеуі және D диоды T1 транзисторының қақпасына жіберіледі, ол оны бекітеді. Нәтижесінде кілт жабық болады. Егер басқару кернеуі T2 транзисторын қосса, онда D диодының аноды қаныққан T2 Транзисторы арқылы жалпы шинаға қосылады, нәтижесінде T1 қақпасындағы кернеу нөлге дейін төмендейді және T1 Транзисторы кілттің жабылуына тең болады.

PP түйіспесі бар өріс транзисторларындағы кілттер бірқатар сериялы микросұлбалардың құрамына кіреді: 284, KR504 және т.б. сонымен, 284 КН1 чипінде PP түйіспесі және P типті арнасы бар өріс транзисторларында үш кілт бар. Әрбір кілттің параметрлері бар: жабық кілттің кедергісі 250 Ом, ағып кету тогы 10 нА, максималды коммутация жиілігі 1 мГц.

Оқшауланған жапқышы бар және P - және P-типті индукцияланған каналы бар өріс транзисторларындағы кілттер коммутаторларды жасау кезінде кеңінен қолданылады. Бұл кілттердің басты ерекшелігі-бастапқы күйде қақпадағы нөлдік кернеу кезінде олар құлыпталады. Арнаны заряд тасымалдаушылармен байыту тек шекті кернеуден асатын кернеу қақпаға берілген кезде ғана жүреді. Температураның жоғарылауымен олар 1011 кері токтар сияқты әрекет етеді... 1013 Ом, бұл қақпаның астындағы диэлектриктің қалыңдығы аз (шамамен 1 мкм) статикалық электрден қорғау қажеттілігіне әкеледі. Осындай шаралардың бірі-Ысырма мен канал арасында Қорғаныс зерер диодтарын немесе диодтарын орнату, бірақ бұл Ысырма тогының жоғарылауына, әсіресе температураның жоғарылауына әкеледі.

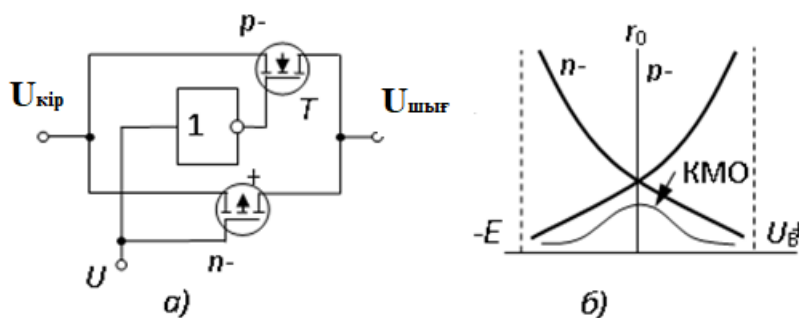
Сонымен, 168k2 микросұлбаларында басқару сұлбалары жоқ қос кілттер бар. Мұндай кілттердің шекті кернеуі 3-тен 6 В, тікелей кедергі 100 Омнан аспайды, қосу және өшіру уақыты шамамен 0,3...0,5 мкс. Бұл чипте басқару құрылғыларының болмауы оны қолдануды қиындатады. Жеке транзисторлардан

басқа, сұлбалар кілттер ретінде кеңінен қолданылады (1.75 сурет) арнаның өткізгіштігінің әртүрлі түрімен екі диодтың параллель қосылысы бар (қосымша транзисторлар).

Мұндай кілттер бір транзисторлардағы кілттердің көптеген кемшіліктерін жояды: кіріс сигналымен каналдың кедергісін модуляциялау жойылады, басқару тізбегіндегі кедергілер азаяды, кілттің кедергісі ашық күйде болады және ағып кету тогы азаяды.

Бір уақытта транзисторларды қосылған күйден өшірілген басқару сигналына ауыстыру үшін бір транзистордың қақпасына тікелей, ал екінші қақпаға инвертор арқылы беріледі.

Кіріс кернеуінің жоғарылауымен р-канал транзисторының кедергісі артады, ал N-канал транзисторының кедергісі төмендейді. Нәтижесінде, осы транзисторлардың параллель байланысы суретте көрсетілгендей ашық күйде R0 кедергісіне ие. 1.75, а сурет кілт транзисторлары қарама-қарсы полярлықтың сигналдарымен басқарылатындықтан, кедергі импульстары өзара өтеледі, бұл кіріс сигналдарының деңгейін төмендетеді..



1.75 сурет - Комплементарлы транзисторлардағы кілттің сұлбасы ( а); оның кедергісінің кіріс кернеуіне тәуелділігі (б)

Қосымша транзисторлардың кілттері интегралды сұлбаларда кеңінен қолданылады. Олар k590, K591, K176, K561 және I564 сериялы чиптердің бөлігі. Олардың ашық күйдегі кедергісі 20...100 Ом, олардың қосылу уақыты 10-нан 100 нс-қа дейін, Шығу тогын 10 мА-ға дейін қамтамасыз етеді және электр тізбегі арқылы 1 мкВт-тан аз қуат тұтынады.

#### 4 Екінші ретті электрмен қоректендіру көздері

Кез келген электронды құрылғы үшін бір немесе бірнеше тұрақты кернеу мәндерін беретін қуат көзі қажет. Әрине, гальваникалық батареяларды қуат көзі ретінде пайдалануға болады, бірақ қуатты көп тұтынған кезде бұл үнемді емес. Бұл жағдайда қажетті қуат кернеулерінің пайда болуын қамтамасыз ететін және



электрмен жабдықтау көздері деп аталатын арнайы электрондық құрылғылар қолданылады.

#### 4.1 Электрмен қоректендіру көздерінің құрылымы

Кез келген электронды жабдықты қуаттандыру үшін қажетті электр энергиясының көздері әдетте бастапқы және қайталама электрмен жабдықтау көздеріне бөлінеді.

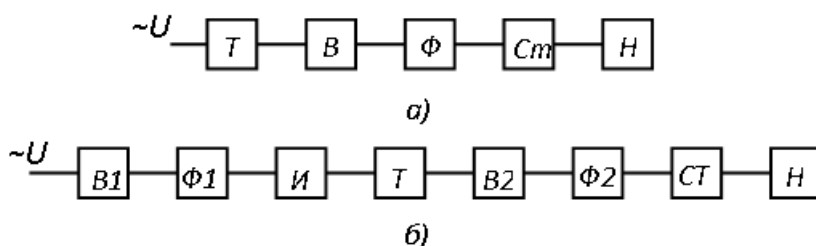
Бастапқы қуат көздеріне 50 Гц өндірістік жиіліктің үш фазалы (немесе бір фазалы) желісі (стационарлық жабдық үшін) және 400...500 Гц жиіліктегі тұрақты немесе ауыспалы кернеу генераторлары кіреді. Химиялық гальваникалық элементтер мен күн батареялары жылжымалы объектілерде орнатылатын және автономды электрмен қоректендіруді талап ететін борттық аппаратураны қоректендіру үшін ғана пайдаланылады.

Екінші реттік қуат көздері (ЕРҚК) ток түрін түрлендіру (айнымалы – тұрақты), кернеуді немесе тоқты тұрақтандыру және реттеу, коммутация, кернеуді тұрақтандыру және реттеу кезінде пайда болатын әртүрлі кедергілерді сүзу функцияларын орындайды. Бұл, әдетте, әртүрлі қорғаныстары бар жақсы дамыған, кішкентай, үнемді құрылымдар.

ЕРҚК түрлендірудің түрі бойынша:

- желілік көздер – айнымалы кернеуді тұрақты кернеуге түрлендіргіштер (AC–DC);
- тұрақты кернеу түрлендіргіштері-тұрақты кернеу түрлендіргіштері (DC–DC);
- инверторлар-тұрақты кернеуді айнымалыға түрлендіргіштер (DC–AC);
- жиілік түрлендіргіштері (AC–AC).

Ақпараттық-есептеу жүйелерінің көптеген құрылғылары электр энергиясын тұрақты ток түрінде тұтынады. Егер бастапқы көз  $u \sim$  айнымалы ток болса, онда екінші қуат көзі көбінесе суретте көрсетілген құрылымға ие болады. 1.76, а сурет қуатты трансформаторы, әдетте, кернеуді төмендетеді, содан кейін ол тұрақты кернеуді Вв түзеткішімен түрлендіреді, оның пульсациясы F сүзгісімен тегістеледі, қажет болған жағдайда Ст тұрақтандырғышының көмегімен осы кернеудің деңгейі желінің кернеуінің, температураның, Н жүктеме тогының және басқа тұрақсыздандыратын факторлардың өзгеруіне тәуелсіз өзгеріссіз сақталады..



1.76 сурет - Екінші реттік қуат көздерінің құрылымы

Қайталама электрмен қоректендіру көздері кез келген электрондық аппаратураның ажырамас бөлігі болып табылады және оның техникалық-экономикалық көрсеткіштерін елеулі дәрежеде айқындайды. Қуат көздерінің үлесі көбінесе жабдықтың жалпы массасы мен көлемінің 40% құрайды, сондықтан дизайнерлердің алдында тұрған міндеттердің бірі-оларды кешенді миниатюралау.

Барлық IVER түйіндерінің ішіндегі ең көлемдісі, әдетте, ферромагниттік материалдардан (трансформаторлар мен сүзгі дроссельдері) жасалған магниттік тізбектерде жасалған түйіндер.

Қуат көздерінің массасы мен жалпы өлшемдерін азайтуға деген ұмтылыс «импульсті IVER» деп аталатын құрылымдық сұлбаға әкелді (1.76 сурет). Бұл құрылымда бастапқы желінің айнымалы кернеуі алдымен В1 түзетіліп, Ф1 сүзіледі, содан кейін инверторда және айнымалыға айналады, бірақ 20 жиілікпен...100 кГц. Бұл жиілікте кернеу т-ны қажетті деңгейге түрлендіреді, В2 қайтадан түзетіледі, F2 сүзіледі және қажет болған жағдайда Ст тұрақтандырылады. трансформатор мен дроссельдің магниттік тізбегінің массасы мен өлшемдері айнымалы ток жиілігіне кері пропорционал. Сондықтан жоғары жиілікте трансформатор мен F2 сүзгісі мөлшерінің күрт төмендеуі байқалады. Осыған байланысты, түйіндердің көп санына және Ток түрінің Қос түрленуіне қарамастан, көзі массасы мен өлшемдері жағынан әлдеқайда аз.

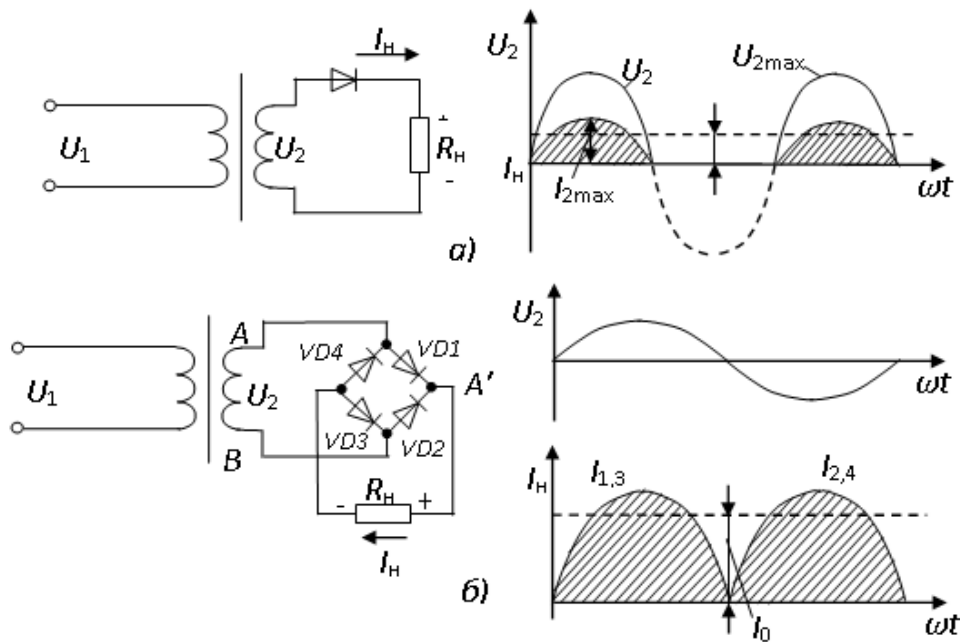
## 4.2 Түзеткіш құрылғылар

Түзеткіштер жартылай өткізгіш түзеткіш диодтардың көмегімен айнымалы (синусоидалы) кернеуді тұрақты ток кернеуіне айналдыру үшін қолданылады.

Жарты толқындық түзеткіш тізбегінде (сурет. 1.77, а) Диод арқылы  $I_{ж}$  тогы  $R_n$  жүктемесіне өтеді, тек  $U_2$  кернеуінің оң жартылай периодтарына, өйткені ол теріс жартылай периодтарға диодты құлыптайды. Жүктемедегі Ток (көлеңкеленген) үзік-үзік сипатқа ие, ал оның тұрақты құрамдас бөлігі  $I_0$  кезең ішінде өтетін токтың орташа мәні болып табылады және жүктемеде кернеудің тұрақты компонентін жасайды (Фурье қатарындағы функцияның ыдырауына сәйкес):

$$U_0 = I_0 R_n = \left( \frac{I_{2\max}}{\pi} \right) R_n = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} = 0,45 U_2$$

мұндағы  $U_{2\max}$  және  $U_2$ -трансформатордың қайталама орамасының синусоидальды кернеуінің амплитудасы мен белсенді мәні.



1.77 сурет - Жұмысты түсіндіретін түзеткіш құрылғылар мен графиктер: а-жарты толқын түзеткіші; б-жарты толқын

Теріс жарты циклде кері кернеу  $u_{\text{кері}} = U_{2\text{max}} = \pi U_0$  жабық диодқа қолданылады, сондықтан диод оның рұқсат етілген кері кернеуі  $U_{\text{рұқккері}} > \pi U_0$  шартын, ал Диод арқылы рұқсат етілген ток  $- I_{\text{рұқктур}} > I_0$  шартын қанағаттандыратындай етіп таңдалады.

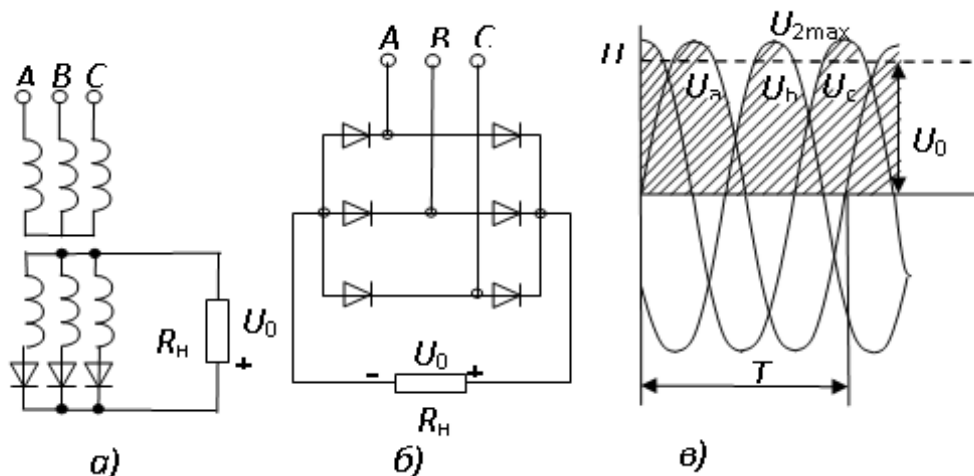
Жарты толқындық түзеткіштің тізбегі көпір тізбегі деп аталатын төрт диодтан тұрады (1.78 сурет). Кернеу  $U_2$  оң жарты толқын  $VD1$  және  $VD3$  диодтарын ашады және А нүктесінен В нүктесіне дейін  $VD-R-VD3$  тізбегі арқылы жүктеме тогы  $I_n = I_{1,3}$  өтеді. Бұл жағдайда  $vd1$  және  $VD4$  диодтары құлыпталады. Теріс жарты циклде  $U_2$  кернеуі  $VD1$  және  $VD4$  диодтарын және токты ашады

$I_n = I_{2,4}$  В нүктесінен  $VD2-R-V-D4$  тізбегінің Апо нүктесіне жүктеме арқылы бір бағытта өтеді. Бұл тізбекте  $I_0$  тогы мен  $U_0$  кернеуінің тұрақты компоненттері жарты толқындық тізбекке қарағанда екі есе жоғары:

$$U_0 = \left( \frac{2}{\pi} \right) U_{2\text{max}} = \left( \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right) U_2 = 0,9U_2.$$

мұндағы  $U_{2\text{max}}$  және  $U_2$ -фазалық кернеудің амплитудасы және әсер етуші мәні, ал  $I_{cp} = I_0/3$  диоды арқылы орташа ток.  $U_{\text{кері}} = \sqrt{3}U_{02\text{max}}$

$$U_0 = \left( \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \right) U_{2\text{max}} = 0,827U_{2\text{max}} = 1,17U_{2\text{max}};$$



*а-жартылай периодты, б-көпірлі, в-график, түзеткіштің жұмысын түсіндіру.*

1.78 сурет - Үш фазалы түзеткіштер

Бұл көпірлі үш фазалы түзеткіште (1.78 сурет) таза белсенді жүктеме үшін қатынастар тең

$$U_0 = \left( \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right) U = 1,35U ; \quad U_{кері} = 1,05U_0,$$

мұндағы  $U_{кер}$   $U$ -желінің сызықтық кернеуінің амплитудасы және әсер етуші мәні, ал әрбір  $I_{ор} = I_0/3$  диоды арқылы орташа ток.

*Мысал.* Көпір үш фазалы түзеткіштің түзетілген кернеуі қандай (1.78 сурет) сызықтық кернеуі  $U = 380$  В желіге қосылған және диодтар қандай кері кернеуге есептелуі керек?

Тұрақты кернеу  $U_0 = 1,35 \cdot 380 = 513$  В және диодтар кері кернеуге есептелуі керек

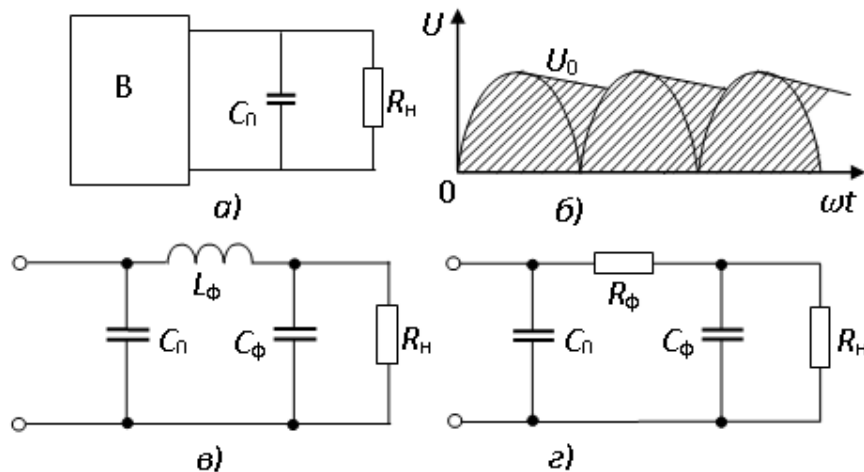
$$U_{кері} = U_{max} = \sqrt{2}u = \sqrt{2} \cdot 380 = 537 \text{ В.}$$

### 4.3 Тегістейтін сүзгілер

Электрондық жабдықты қуаттандыру үшін кернеудің пайыздық үлестен аспайтын пульсациясына рұқсат етіледі, бірақ түзеткіштердің шығуында пульсация әлдеқайда көп. Оларды азайту үшін тегістейтін сүзгілер қолданылады,

олар айнымалы компоненттерді мүмкіндігінше азайтуы (басуы) керек және түзетілген кернеудің тұрақты компонентін жоғалту мүмкін.

Қарапайым сүзгі-бұл түзеткіштің шығысында параллель жүктемеде қосылған конденсатор (1.79 сурет) түзеткіштің кернеуінің жоғарылауы кезінде зарядтау арқылы энергияны сақтайтын және ол төмендеген кезде жүктеме кедергісіне түсіп, (1.79, в сурет) екі жарты толқындық түзеткішпен  $U_c$  конденсаторындағы кернеу формасын көрсетеді (демек, параллель қосылған  $R_N$ ). Пульсацияны одан әрі азайту үшін  $L$ -тәрізді  $LC$  сүзгілері қолданылады (1.79 сурет).



Тегістегіш сүзгілер: *a* –  $RC$ -сүзгісі, *б* – график, сүзгі жұмысын түсіндіруші, *в* –  $LC$ -сүзгісі, *г* –  $\Pi$ -түрлі сүзгі  
1.79 сурет

Индуктивті кедергі  $X_L = \omega L_\phi$  негізгі тізбектен және  $R_{ж}$  одан жоғары жиіліктермен түзетілген кернеудің айнымалы компоненттері  $X_L$ -ге кернеудің төмендеуі  $\omega$  түрінде сүзгіден «кідіріп»,  $X_L$  жүктемеге жетпей-ақ, әлдеқайда көп  $R_N$  жасауға тырысады

$X_c = 1 / \omega C_\phi$  сыйымдылық кедергісі  $R_N$  қарағанда әлдеқайда аз орындалады, сондықтан түзетілген токтың айнымалы компоненттері  $R_N$ -ді айналып өтіп,  $X_s$  арқылы жабылады.

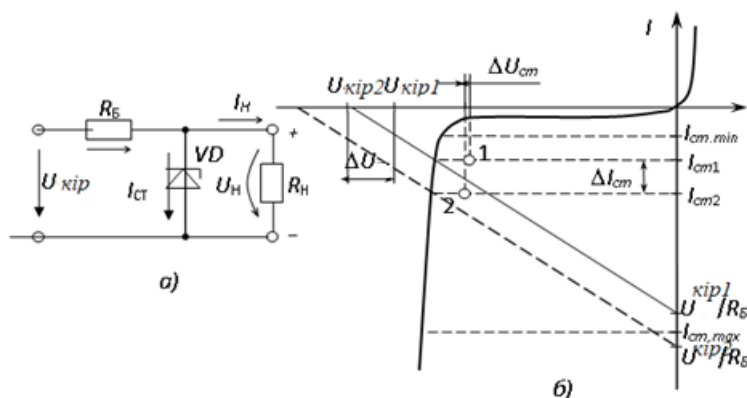
Бұл жағдайда токтың тұрақты компоненті, ол үшін  $X_L = 0$ ,  $X_c = \infty$ , кернеудің  $L_\phi$  төмендеуін тудырмайды, толығымен жүктемеге түсіп,  $C_\phi$  арқылы жабылмайды.

$LC$  сүзгілерінің кемшілігі-микроэлектрондық дизайндағы индуктивтілікті жасаудың қиындығы. Сондықтан, бірнеше миллиампердегі жүктеме токтарындағы интегралды сұлбаларда олардың біршама нашар тегістейтін қасиеттері мен тиімділігі аз болғанына қарамастан  $RC$  сүзгілері қолданылады (1.79 сурет).

#### 4.4 Кернеу тұрақтандырғыш

Кернеу тұрақтандырғышы-бұл бастапқы кернеу, жүктеме кедергісі, қоршаған орта температурасы сияқты тұрақсыздандырушы факторлардың белгілі бір шегінде өзгерген кезде жүктеме кернеуін автоматты түрде ұстап тұратын құрылғы. Тұрақтандырғыштардың үш түрі бар: параметрлік, компенсациялық және импульстік.

Параметрлік кернеу тұрақтандырғышы (PSN) олар арқылы өтетін ток өзгерген кезде кернеу өзгеріссіз қалатын элементтерді пайдаланады. Мұндай элементтер зенер диодтары болып табылады, онда ток өте кең диапазонда өзгерген кезде кернеудің төмендеуі пайыздық үлеске өзгереді. Параметрлік тұрақтандырғыштар, әдетте, қуатты компенсациялық тұрақтандырғыштарда тірек (сілтеме) кернеуінің көзі ретінде қолданылады (1.80 сурет) немесе жоғары ОМ тізбектеріндегі кернеуді тұрақтандыру үшін (RN үлкен болған кезде).



1.80 сурет - Стабилизатордың сұлбасы (А) және оның жұмысын түсіндіретін график (б)

Zener диод VD қарсы қосылады, сондықтан оның теріс Wash-ті қарастырған жөн. Ондағы жұмыс нүктесі жұмыс аймағында болуы керек (1.80 сурет). Жүктеме зенер диодына параллель қосылған, сондықтан  $U_{ж} = U_{ст} = U_{kip} - I_{ст}R_B$ . Теңдеудің шешімі зенер диодының ВАХ қиылысу нүктесі және ағымдағы кіріс кернеуі  $U_{kip}$  үшін жүктеме сипаттамасы болады.  $U_{kip1}$  және  $U_{vx2}$  кіріс кернеуінің екі мәні үшін 1 және 2 екі нүктені көрсетеді. Егер кірістегі кернеудің өзгеруін салыстыратын болсақ  $u_{vh}$  Шығыс-Ust, онда Шығыс кернеуін тұрақтандырудың әсері бар. Кіріс кернеуі шығу кернеуінен біршама жоғары болуы керек екені анық.  $R_B$  резисторы балласт деп аталады, өйткені ол артық кіріс кернеуін «сөндіреді». PSN есептеу кезінде зенер диодының тогы іс шегінде болуын бақылау қажет  $I_{ст\cdot max}$ . Зенер диодының тұрақтандырғыш қасиеттері оның тұрақтандыру аймағындағы  $R_D$ -нің дифференциалды кедергісіне тікелей

байланысты екенін есте ұстаған жөн ( $RD$  неғұрлым аз болса, сипаттаманың көлбеуі соғұрлым жоғары болады, сондықтан тұрақтандыру жоғарырақ).

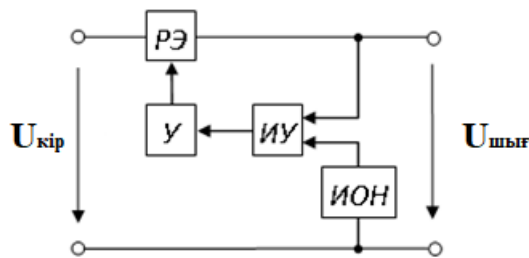
Тұрақтандырғыштың негізгі параметрі тұрақтандыру коэффициенті болып табылады – кірістегі кернеудің салыстырмалы өзгеруінің Шығыс кернеуінің салыстырмалы өзгеруіне қатынасы:

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{кір} / U_{кір}}{\Delta U_{шығ} / U_{шығ}} K_{ст} \approx \frac{R_B U_{ст}}{R_D U_{кір}}$$

PSN кемшіліктері:

- төмен тиімділік (балласт резисторын және зенер диоды арқылы айтарлықтай қосымша токты қолдануға байланысты);
- $K_{ст}$  тұрақтандырудың шағын коэффициенті (оны ұлғайту үшін ПСН екі каскадын қамтиды);
- шығу кернеуін реттеудің мүмкін еместігі;
- төмен жылу тұрақтылығы.

Өтемік кернеу тұрақтандырғышы (ҚБШ) автоматты реттеу жүйесі болып табылады (1.81 сурет).



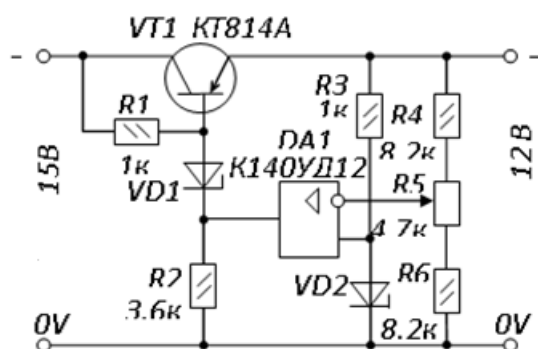
1.81 сурет - Компенсациялық кернеу тұрақтандырғышының құрылымдық тізбегі

Ол сондай-ақ үздіксіз әрекет ететін СН-ға жатады. Кернеуді тұрақтандырудың компенсациялық әдісінің мәні мынада: ТМ өлшеу құрылғысының көмегімен жұмыс барысында Шығыс кернеуін ионның тірек кернеуінің көзі шығаратын тірек немесе сілтеме арқылы салыстыру жүзеге асырылады. Айырмашылық кернеуі  $u$  күшейткішімен күшейтіледі және кедергісі Шығыс кернеуінің өзгеруіне тура пропорционал өзгеретін РЭ реттеуші элементіне беріледі.

РЭ-ны жүйелі түрде қосудан басқа, балласт резисторын қосумен оның параллель қосылу нұсқасы қолданылады (PSN-де бізде реттелетін  $RD$  бар РЭ бар), бірақ тиімділігі төмен болғандықтан, опция сирек қолданылады.

ТМ ретінде ОУ жиі қолданылады (оның дифференциалды кірісі және кернеудің жоғары пайдасы бар), ал РЭ Транзисторы ретінде.

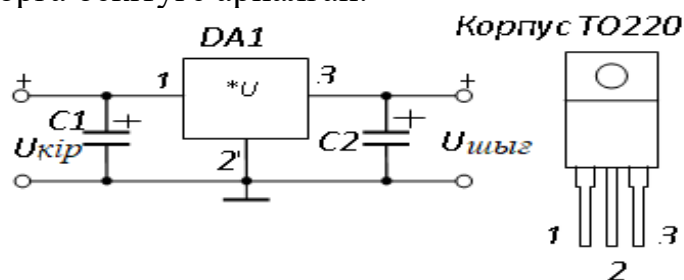
Мысал үшін 1.82-суретте КСН қағидаттық сызбасы келтірілген, ол кемінде 1000 Ксг қамтамасыз етеді. R4–R6 резисторлары реттелетін шығыс кернеу бөлгішін құрайды, оның шығысы DA1 түрлендіргіш кірісіне қосылған. ИОН рөлін атқаратын ПСН (R3, VD2) бар тірек кернеуі ауыстырылмайтын ОС кірісіне беріледі. R1, VD1, R2 тізбегі Vt1 транзисторында қажетті РЭ режимін орнатады. Көрсетілген тізбекке оу-дағы шығыс кернеуі әсер етеді. Әдетте, шығыс кернеуі номиналды кернеуге тең болған кезде, оу шығысында нөлдік кернеу және Vt1 Транзисторы есептелген белсенді режимде болады. Шығу кернеуі төмендеген кезде (кез келген себептерге байланысты) теріс кернеу оу шығысында пайда болады, ол транзистор режимін оның аз ауысу кедергісіне қарай өзгертеді, оған түсетін кернеу азаяды, бұл КСН шығысындағы кернеудің жоғарылауына әкеледі.



1.82 сурет - Компенсациялық кернеу тұрақтандырғышы

Қазіргі уақытта реттеу мүмкіндігімен де, шығу кернеуінің тіркелген мәндерімен де интегралдық орындаудағы (ИСН) дайын ҚБШ шығарылады. Мысал ретінде 142 және 1162 (теріс кернеулер) отандық серияларды атауға болады, олар сәйкесінше 78xx және 79xx серияларына шетелдік isn аналогтары болып табылады.

1.83-суретте KR142 сериялы isn қосу және толтыру үлгісі келтірілген. C1 және C2 конденсаторларының алюминий типтеріне арналған сыйымдылығы кемінде 10 мкФ болуы тиіс, олар ССН ықтимал өздігінен қозуын жоюға арналған. Құрамдас бөліктер терілген. Көрсетілген isn TO220 корпусында шығарылады. Корпустың фланеціндегі тесік жылуды кетіру үшін isn-ді радиаторға бекітуге арналған.





### 1.83 сурет - ИСН 142 сериялы кернеу тұрақтандырғыш сұлбасы

Миниатюралық орындалуына қарамастан, КР142 сериясының існ жеткілікті жоғары параметрлерге ие және шамадан тыс жүктеме мен қызып кетуден қорғауды қамтиды.

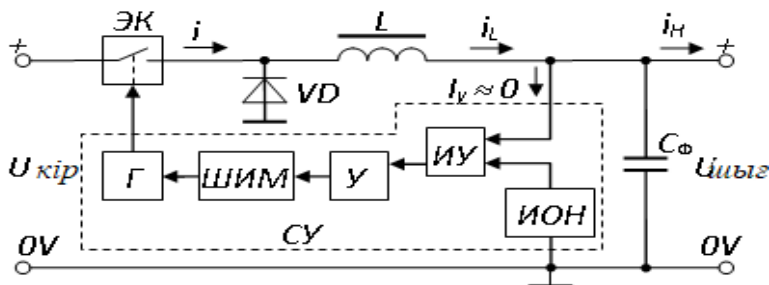
КСН ПСН-ге қарағанда анағұрлым жоғары ПӘК-ге ие, бірақ белсенді режимде жұмыс істейтін РЭ-де елеулі қуаттың жоғалуына байланысты әлі де аз.

Қарастырылған кернеу тұрақтандырғыштарында реттеуші транзистор әрдайым ашық, ал реттеудің өзі оның ашылу дәрежесін өзгерту арқылы жүзеге асырылады, яғни сызықтық. Сондықтан мұндай тұрақтандырғыштар сызықтық деп аталады.

Импульстік кернеу тұрақтандырғышы. Тиімділікті арттыру үшін реттеуші элементтің белсенді жұмыс режимінен бас тарту керек және не тек екі күйде болуы мүмкін – кесу және қанықтыру режимдері. Бірінші режимде ток РЭ арқылы өтпейді және ондағы қуат шығыны нөлге тең. Екінші режимде не минималды мүмкін (нөлге жақын) қарсылыққа ие, сондықтан ондағы шығындар аз болады.

Ре белсенді режимде жұмыс істеген кезде СН режимі үздіксіз деп аталады, ал не кілт режимінде жұмыс істеген кезде импульсті деп аталады. Жұмыс режиміне байланысты кез келген құрылғы үздіксіз немесе импульстік құрылғыларға жатады.

Импульстік СН сұлбасы (1.84 сурет) дәйекті ҚБШ құрылымына ұқсайды.



1.84 сурет - Импульстік тұрақтандырғыш сұлбасы

Осылайша, Шығыс кернеуін тірекпен салыстыратын ТМ өлшеу құрылғысы арқылы алынған дифференциалды кернеу күшейтіледі. Әрі қарай, күшейтілген сәйкессіздік кернеуі PWM-ендік импульстік модуляторға түседі, ол генератор шығаратын G бірполярлы тікбұрышты импульстардың енін өзгертеді. Өз кезегінде, еК электронды кілті генератордың импульстарымен басқарылады: ол импульс бойына жабық және олардың арасындағы үзілістерде ашық болады. Жабық ЭК моменттерінде I жүктемесінде және индуктивтілігінде өсіп келе жатқан электр тогы өтеді (контур +U<sub>kip</sub> – L – жүктеме – 0V). ЭК ашылған сәттерде индуктивтілік-бұл өсіп келе жатқан ток кезінде жинақталған энергия көзі. Ток тізбегі VD диодының (L – жүктеме – VD) арқасында пайда болады. Орташа шығыс кернеуі Г – дан келетін  $q = T/t_i$  импульстарының ұңғымасына кері

пропорционал болады, мұнда  $t$  – импульстардың өту кезеңі (PWM жүйелерінде тұрақты мән болады),  $t_i$ -импульстің ұзақтығы.

Импульстік СН Шығыс кернеуінің амплитудасы  $G$  генераторының жиілігінің жоғарылауымен төмендейді, сондықтан қазіргі тұрақтандырғыштар 30...1000 кГц және одан да жоғары жиіліктерде жұмыс істейді.

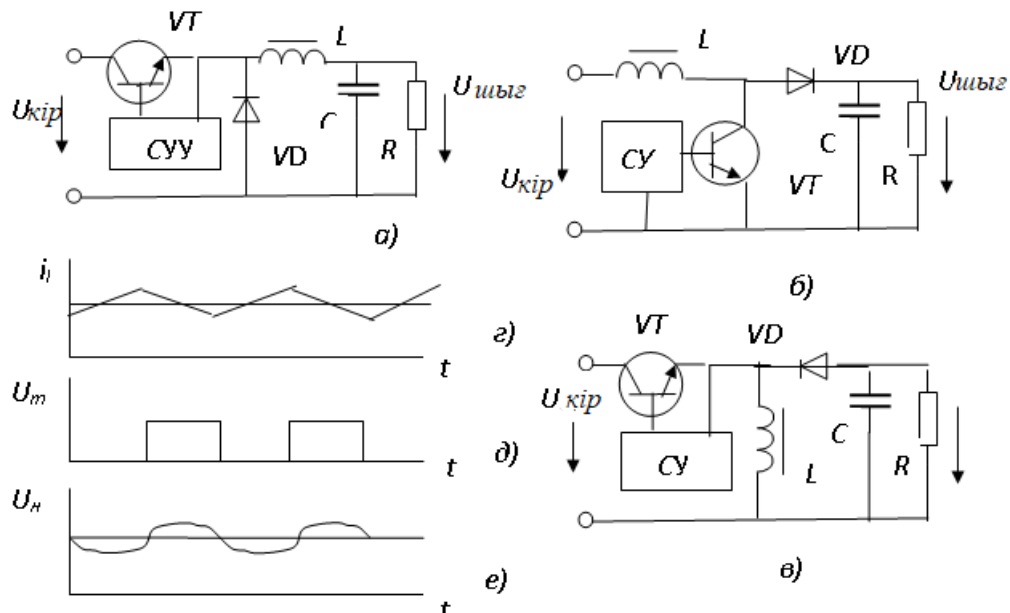
Қазіргі уақытта  $su$  импульстік СН, кейде  $ue$  басқару жүйесін білдіретін PWM контроллерлері интегралды технологиямен шығарылады. Сондықтан, егер сіз мамандандырылған чиптерді қолдансаңыз, күрделі импульстік СН КСН-мен салыстырғанда қарапайым сұлбалық болуы мүмкін.

Импульстік тұрақтандырғыштар жоғары тиімділікті қамтамасыз етеді, өйткені толық ашық күйде транзистордағы кернеудің төмендеуі өте аз, сондықтан транзисторға бөлінетін қуат сызықтық тұрақтандырғыштарда бөлінетін қуаттан әлдеқайда аз.

Кернеуді реттеу  $t$  импульстарының енін өзгерту арқылы жүзеге асырылатындықтан, бұл жұмыс принципі ендік импульсті модуляция (PWM) деп аталады.

#### 4.5 Тұрақты кернеу түрлендіргіштері

Тұрақты кернеу түрлендіргіштері (DC-DC түрлендіргіштері) тұрақты кернеу көзінен келетін энергияны (мысалы, батарея) басқарады, бұл кернеуді мәнге айналдырады. DC-DC түрлендіргіштерінің төмендету, көтеру және инвертирлеу сұлбалары бар. Төменгі типтегі түрлендіргіштер кіріс кернеуіне қарағанда аз болады. Мұндай түрлендіргіштің жұмыс принципін сұлбаның көмегімен анықтауға болады (1.85 сурет).



DC - DC-түрлендіргіштер: а-төмендету, в-көтеру, в – инвертирлеу, дроссельдегі  $i$ -ток графигі, д-транзистордағы кернеу, е-жүктемедегі кернеу

1.85 сурет

Su тізбегімен басқарылатын VT транзисторлық кілті I дроссельді және R жүктемесін t импульсі кезінде  $u_{vx}$  кіріс кернеуінің көзіне қосады. Бұл жағдайда іI дроссельіндегі ток сызықтық заңға сәйкес артады (1.85, г сурет). Үзіліс кезінде TP іI тогы R жүктемесінен өтіп, VD диоды  $iL_{min}$ -ге түседі (1.85, д сурет) үздіксіз токтар режимінде немесе үзік токтар режимінде нөлге дейін. Тұрақты режимде бір кезеңдегі дроссель тогының өзгеруі нөлге немесе  $\Delta iL = 0$ -ге тең (ток қанша өссе, сонша азаяды). Демек, дроссельдегі кернеудің орташа мәні де тұрақты болып қалады. Транзистор қосылған кезде дроссельдегі кернеу  $U_L = U_{kip} - U_{шығ}$ , ал  $U_L = - U_{шығ}$  өшірілгенде, біз  $(U_{kip} - U_{шығ}) t_u - U_{шығ} t_{п} = 0$  немесе  $U_{шығ} = U_{kip} t_u / (t_u + T_P)$

Өзгерте отырып, ара-қимылдың ұзақтығын  $t_u$  импульстің және кідіріс  $t_{п}$ , алып шығу (1.85, е сурет)  $U_{шығ} < U_{kip}$  кернеуінің орташа мәні. Мұндай түрлендіргіштің өлшемдері мен массасы транзистордың ауысу жиілігінің жоғарылауымен азаяды, алайда тізбектің барлық элементтеріндегі шығындар артады. Қолайлы ымыраға жүздеген килогерц жиіліктерінде қол жеткізіледі. Жүктеме кедергісі мен ондағы кернеу экспоненциалды заңға сәйкес азаяды.

Транзисторды өшіргеннен кейін іI дроссель тогы VD диоды мен жүктеме кедергісі арқылы жабылады, конденсаторды зарядтайды.

#### 4.6 Дроссельдегі кернеу

Дроссельдегі кернеудің орташа мәні өзгеріссіз қалады және транзистор қосылған кезде дроссельдегі кернеу  $U_L = U_{kip}$ , ал  $U_{kip} - U_{шығ}$  өшірілген кезде  $U_{kip} t_u + (U_{kip} - U_{шығ}) t_{п} = 0$  аламыз. Қайдан  $U_{шығ} = U_{kip} (t_u + t_{п}) / t_u$ .

Инверторлық түрлендіргіште (1.85 сурет) транзистор қосылған кезде көздің тогы дроссель арқылы жабылады. Транзисторды өшірген кезде, коммутация Заңына сәйкес дроссель тогы өзінің мәнін сақтайды және жүктеме мен диод арқылы жабылады, жүктеме кезінде кіріс кернеуіне қарама-қарсы кернеу пайда болады. Тұрақты режимде дроссель арқылы орташа ток және ондағы кернеу өзгеріссіз қалады.

Сондықтан  $U_{kip} t_u + U_{шығ} t_{п} = 0$  немесе  $U_{kip} t_{п} = U_{шығ} t_u / T_P$ .

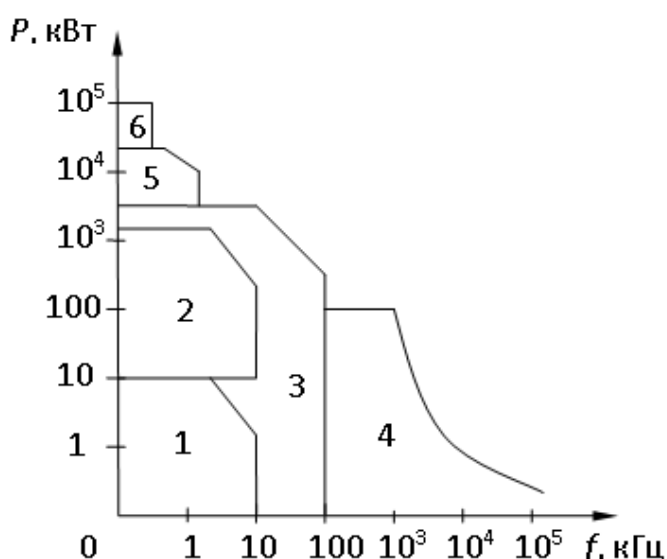
$t_u$  импульсінің уақыт қатынасын және  $T_P$  кідірісін өзгерту арқылы түрлендіргіштің шығысындағы кернеудің жоғарылауын немесе төмендеуін алуға болады.

Қарастырылған түрлендіргіштер көбінесе кернеуді реттеуші ретінде қолданылады. Инверторлық түрлендіргіш неғұрлым әмбебап болса да, ол басқа екеуіне қарағанда аз қолданылады, өйткені бәрі бірдей, L индуктивтілігі мен C сыйымдылығының үлкен мәндерін қажет етеді, сондықтан үлкен өлшемдер мен массаларға ие. Қарастырылғандардан басқа, DC–DC түрлендіргіштерінің

көптеген басқа сұлбалары бар. Олардың барлығы, әдетте, қуат импульсінің кедергісін азайту және шығыс кернеуінің импульстарын азайту үшін кіріс және шығыс сүзгілерімен толықтырылады.

#### 4.7 Тиристорлар негізіндегі күштік құрылғылар және қуатты транзисторлар

Қуат құрылғыларына электр тізбектеріндегі энергияны түрлендіруді қамтамасыз ететін электронды құрылғылар кіреді, олардың токтары ондаған, жүздеген және тіпті мыңдаған ампермен өлшенеді (1.86 сурет), ал кернеу мәні жүздеген және мыңдаған вольт.



Күштік транзисторлардың қолданылу аясы: 1 – биполярлы; 2-SIT; 3- IGBT; 4-MDP; 5-құлыпталатын тиристорлар; 6-ауыр тиристорлар.

1.86 сурет

Бұл құрылғылар келесі түрде келеді:

- реттелетін түзеткіштер (айнымалы кернеуді тұрақты, реттелетін мәнге түрлендіреді);

- жиілік түрлендіргіштері (бір жиіліктің айнымалы кернеуін басқа реттелетін жиіліктің ауыспалы кернеуіне түрлендіреді);

- инверторлар (тұрақты кернеуді айнымалыға түрлендіреді).

Басқарылатын түзеткіштер. Тиристорға негізделген басқарылатын түзеткіштер  $U_0$  кернеуінің тұрақты компонентін айнымалы токтың тұрақты кернеуімен диод түзеткіштері үшін формулалармен анықталатын максималды мәнге дейін өзгертуге мүмкіндік береді.

$U_{max}$  амплитудасы бар  $UC$  желісінің синусоидалы кернеуіне  $R$  жүктемесі және тиристор  $VS$  қосылған (1.87 сурет).



өзгеруі. Нәтижесінде  $U_0$  кернеуінің тұрақты компоненті жүктемедегі кернеу кезеңіндегі орташа мәнге тең өзгереді:

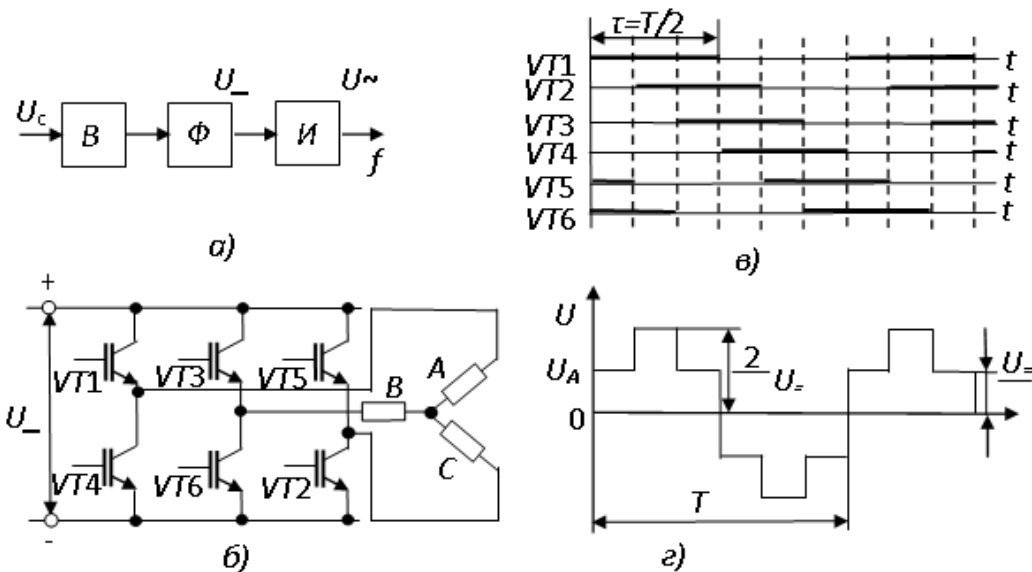
$U_0$  кернеуі екі-жартылай басқарылатын түзеткішті қолданған кезде екі есе артады. Бір жарты циклдегі жүктеме тогы  $vd1$ ,  $VD3$  диодтары арқылы, ал екіншісінде  $VD2$ ,  $VD4$  арқылы өтетіндіктен, әр жарты циклдегі токты басқару үшін бір тиристор жеткілікті. Осылайша, басқарылатын түзеткішті екі диодты ауыстыру арқылы көпір тізбегі негізінде құруға болады  $vd1$  және  $VD2$ , тиристорлармен.

Сол сияқты, үш фазалы басқарылатын түзеткіштер диодтарды тиристорлармен алмастырады. Мұндай басқарылатын түзеткіштер металл кесетін станоктар мен көлік құралдарының электр жетектеріндегі тұрақты ток қозғалтқыштарының жылдамдығын реттеу үшін қолданылады.

Инверторлар және жиілік түрлендіргіштері. Инверторлар тұрақты ток энергиясын қажетті жиіліктің айнымалы ток энергиясына түрлендіру үшін қолданылады.

Қайта қосу ретінде аспаптардың күшті нүктелі инверторларында тиристорлар қолданады. Ағып жатқан токтардың салыстырмалы түрде аз мәндері бар тізбектерде қуатты өріс немесе биполярлық транзисторларды қолдануға болады.

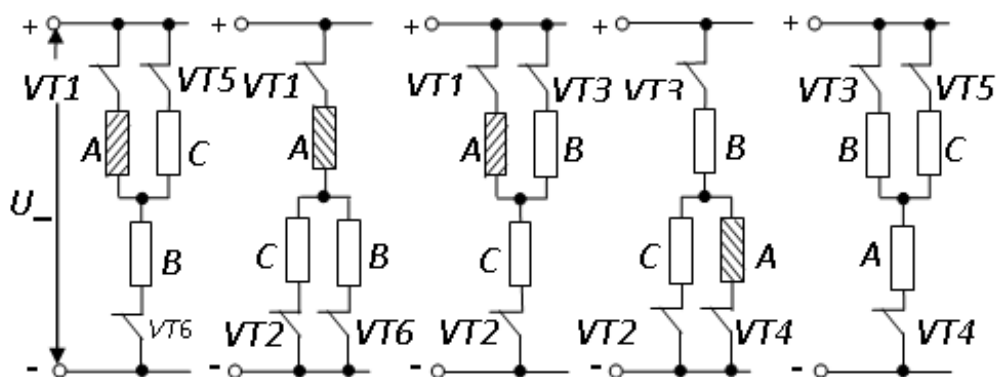
Жиілік түрлендіргішінің құрылымдық сұлбасы жұлдызбен байланысқан үш фазалы жүктемені, айнымалы үш фазалы кернеуді, оның  $U$  және  $F$  жиілігін реттей отырып қосу үшін Инверторды қолдана отырып берілген. Қуатты IGBT транзисторлары коммутациялық құрылғылар ретінде қолданылады.  $U_c$  өнеркәсіптік желісінің жиілігімен кернеу алдымен басқарылатын  $B$  түзеткішімен, қажетті мәнің  $U_-$  тұрақты ток кернеуінде  $F$  сүзгісі арқылы жасалады. Содан кейін бұл кернеу инверторға түседі және (1.88, б сурет.) суретте көрсетілген олардың қосылу реті бойынша нөмірленген алты  $Vt1$  —  $Vt6$  транзисторларынан тұрады. Әрбір транзистор талап етілетін айнымалы кернеудің бір  $T/2$  жарты толқынының ұзақтығына тең  $\tau$  уақытқа ашылады.



Инвертор негізіндегі жиілік түрлендіргіші: а – құрылымдық сұлба; Б- инвертор сұлбасы; в- уақыт диаграммасы.

1.88 сурет - Шығыс кернеуінің г-графигі

Диаграммаларда 1.88 сурет жабық кілттер түрінде инвертордың алты қатарлы күйлері үшін тек ашық транзисторлар көрсетілген, олар сурет уақыт диаграммаларына сәйкес келеді. Осы тізбектерді талдаудан *a* фазасы *v* немесе *c* параллель қосылған кезде *u* кернеуінің үштен бірі оған бөлінетінін көруге болады, ал *A* фазасы параллель қосылған *B* және *C* фазаларымен қатар қосылса, онда  $U_{\text{ш}}$  кернеуінің үштен екісі бөлінеді.



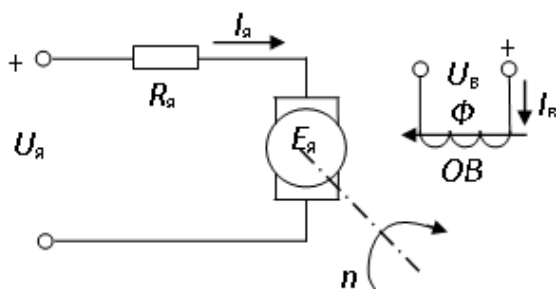
1.89 сурет - Жиілік түрлендіргішінің шығыс кернеуін қалыптастыру процесі

Сонымен қатар, алғашқы үш күйде *A* фазасындағы кернеу оң, ал соңғы екі – оған қолданылатын сатылы айнымалы ток кернеуінің теріс жарты толқынына сәйкес келеді. Осылайша, *B* және *C* фазаларына кернеудің *a* фазасымен бірдей қолданылатынына көз жеткізуге болады, бірақ сәйкесінше *t* кезеңінің үштен біріне және үштен екісіне ауысады.

Басқару тізбегін қолдана отырып, транзистордың ашық күйінің ұзақтығын өзгерте отырып, қалыптасқан үш фазалы кернеудің жиілігін кең көлемде реттеуге болады, сондықтан мұндай жиілік түрлендіргіштері үш фазалы асинхронды қозғалтқыштардың айналу жылдамдығын біркелкі реттеу үшін қолданылады.

*Тиристорлық басқармалы қозғалтқышы бар тұрақты ток.* Металл кесетін станоктардың негізгі қозғалысы мен құрал-саймандарының жетектерінде кең диапазонда айналу жылдамдығын реттеуге қабілетті тәуелсіз қозуы бар тұрақты қозғалтқыштар кеңінен қолданылады. Мұндай қозғалтқыш (1.89 сурет) статордан тұрады, оның полюстерінде қоздыру орамалары оралған және якорь деп аталатын Ротор бар.

UV кернеуінің әсерінен OV арқылы өтетін IV қоздыру тогы F магнит ағынын тудырады. Протекая бойынша виткам орамасының якорь тогы I<sub>я</sub>, байланыса отырып ағынын Φ тудырады айналу моменті M<sub>вр</sub>.



1.90 сурет - Тұрақты ток қозғалтқышын қосу сұлбасы

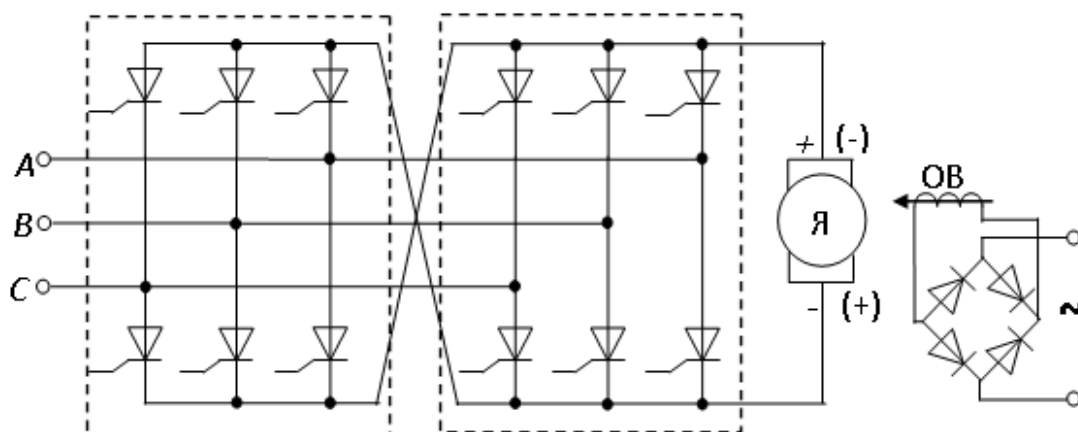
Қозғалтқыштың жылдамдығын басқарудың екі әдісі (екі аймақ) мүмкін). Бірінші аймақта жылдамдық 0-ден  $n_{\max}$ -ның номиналды мәніне дейін өзгереді, магнит ағынының тұрақты мәні F, яғни UV қоздыру кернеуінің тұрақты мәні кезінде  $u_{я}$  кернеуін арттырады. U кернеуі номиналды мәнге жеткенде, оны одан әрі арттыру мүмкін емес, өйткені ол оқшаулаудың бұзылуына әкелуі мүмкін. Сонымен қатар, жылдам қозғалу үшін, мысалы, бос тұрған құрал немесе шыбықтың жылдам айналуы үшін қозғалтқыштың айналу жылдамдығын  $V_{ном}$  — дан 3-5 есе арттыру қажет. Ол үшін II аймақ қолданылады, онда u тұрақты кернеу кезінде F магнит ағынының мәні UV тиісті төмендету арқылы азаяды, демек, I<sub>V</sub> қоздыру тогы. Алайда, II аймағында қозғалтқыштың тиісті төмендету мен моментіне төтеп беру керек.

Өнеркәсіп шығаратын тиристорлық түрлендіргіштерде бірінші аймақтағы айналу жылдамдығын реттеу екі басқарылатын қуатты (бірнеше ондаған киловаттқа дейін) үш фазалы түзеткіштерді (суретте) қолдану арқылы жүзеге асырылады. 1.91-суретте нүктелі сызықпен қоршалған).

Үш фазалы түзеткіштердің бірі қозғалтқыштың оң бағытын қамтамасыз етеді, ал екіншісі сол жақта, полярлықты өзгертеді. Әрине, бұл түзеткіштер олардың арасындағы қысқа тұйықталуды болдырмас үшін бөлек жұмыс істеуі керек, бұл түзеткіштердің басқару тізбегін қамтамасыз етеді, олардың біреуін екіншісін ажыратқаннан кейін бірнеше миллисекундтан кейін қосуға мүмкіндік береді.

Екінші аймақтағы айналу жылдамдығын басқару үшін OV қоздыру орамасын беретін тиристор түзеткішінің бір фазалы көпір тізбегі қолданылады. Сұлба оның полярлығын сақтай отырып, IV-ны азайтуға мүмкіндік береді.





1.91 сурет - Қозғалтқыштың айналу жылдамдығын тиристорлы реттегіш сұлбасы

Қуат коэффициентін электронды түзеткіштер. Км қуат коэффициенті-ваттметрмен өлшенген импульсті токтың белсенді қуатының вольтметрмен және амперметрмен өлшенген  $U$  және  $I$  ток кернеуінің белсенді мәндерінің көбейтіндісі ретінде анықталған  $S$  толық қуатына қатынасы:

Резистивтік жүктеме кезінде  $P = UI$ , яғни  $KM_{\max} = 1$  шекті мәні байқалады. Синусоидалы ток пен кернеу түрінде  $P = UI \cos \varphi$ , сондықтан

$$KM = \cos \varphi,$$

мұндағы  $\varphi$ -желідегі кернеу мен ток арасындағы фазалық ығысу.

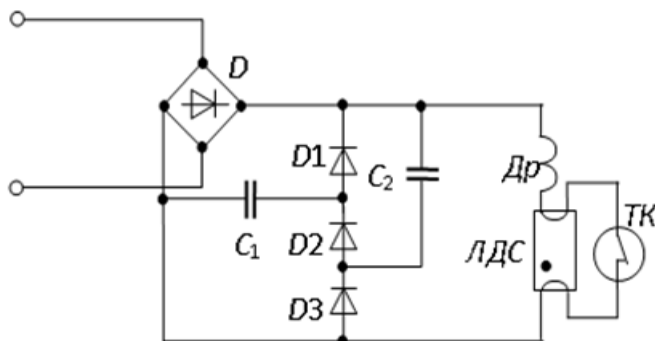
Халықаралық электротехникалық комиссия (IEC) барлық электронды құрылғылар үшін айнымалы ток желісіне енгізілген жоғары гармониканың, Шу мен кернеудің ауытқуының рұқсат етілген деңгейіне қойылатын талаптарды қамтитын IEC-555 стандартын жасады. Бұл ретте Км қажетті мәнін қамтамасыз ету желіден 300 Вт-тан астам қуатты тұтынатын және желілік түзеткіштің шығуында сыйымды сүзгісі бар кез келген электр жабдығы үшін міндетті.

IEC IEC жаңа стандарты-1000-3-2 (IEC-555-2 орнына) энергияны тұтынушылардың қуат коэффициентіне қойылатын талаптарды едәуір қатайтады. Осыған байланысты қуат тұтыну сапасын жақсарту міндеті қуат көздерін жасаушылар үшін өте маңызды болып табылады. Олардың қатарына индуктивті балласты бар люминесцентті лампалар, кіре берістегі сыйымды сүзгісі бар импульстік қуат көздері, асинхронды қозғалтқыштар және т. б. кіреді.

Қазіргі уақытта мұндай тұтынушылардың қуат коэффициентін арттыру үшін пассивті және белсенді қуат коэффициентін түзеткіштер қолданылады.

Пассивті қуат коэффициентін түзеткіштер әдетте конденсаторлар мен коммутациялық диодтарда орындалады. Мұндай түзеткіштер жүктеменің индуктивті сипатында қолданылады-бұл флуоресцентті лампалардың қуат көздері, асинхронды қозғалтқыштар және т.б. мысалы, 1.92-суретте қуаты 40 Вт

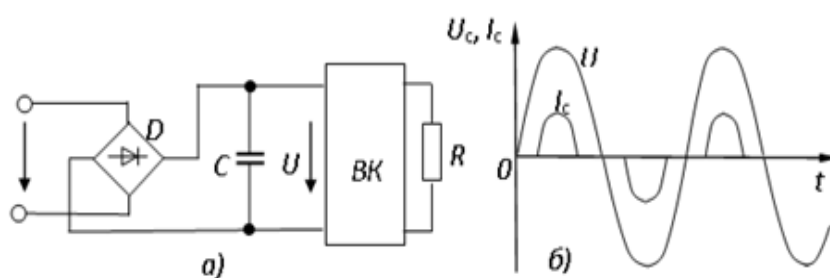
люминесцентті шамды (LDS) қуаттауға арналған пассивті қуат коэффициентін түзеткіш сұлбасы берілген. Осы сұлбада параллель  $D1D2, D3$  мен конденсаторларда  $C1, C2$  сыйымдылығы жүктеменің индуктивті сипатын, ал диодтарды өтеу үшін таңдалады.  $D3$  қуат кернеуінің лездік мәні өзгерген кезде олардың коммутациясын қамтамасыз етеді



1.92 сурет - Пассивті түзеткіш сұлбасы ЛДС үшін қуат коэффициенті

Пассивті түзеткіштердің басты кемшілігі-оларды өзгертін жүктеме мен токтың импульстік түрінде қолдану мүмкін еместігі. Суретте көрсетілген пассивті түзеткіш. ЛДС қуаты 40 Вт болғанда  $\cos\varphi = 0,95$  қамтамасыз етеді.

Коммутациялық қуат көзінің жеңілдетілген сұлбасы суретте көрсетілген. Бұл сұлба  $d$  желілік түзеткішінен, сүзгі контейнерінен және жоғары жиілікті ВК конвертерінен тұрады. Түрлендіргіштің шығыс кернеуі  $U_c$  жүктемесіне  $U_c$  желісінің синусоидальды кернеуі кезінде түседі.  $U_c$  түзеткішінің шығыс кернеуі және желіден тұтынылатын ток пульсирленген пішінге ие. Көрсетілгендей, уақытша диаграммалар келтірілген, 1.93, в сурет, желіден тұтынылатын ток формасы үлкен амплитудасы мен қысқа ұзақтығының тар импульсі түрінде болады.



1.93 сурет - Коммутациялық қуат көзінің сұлбасы (а), ондағы Токтар мен кернеулердің графигі (б)

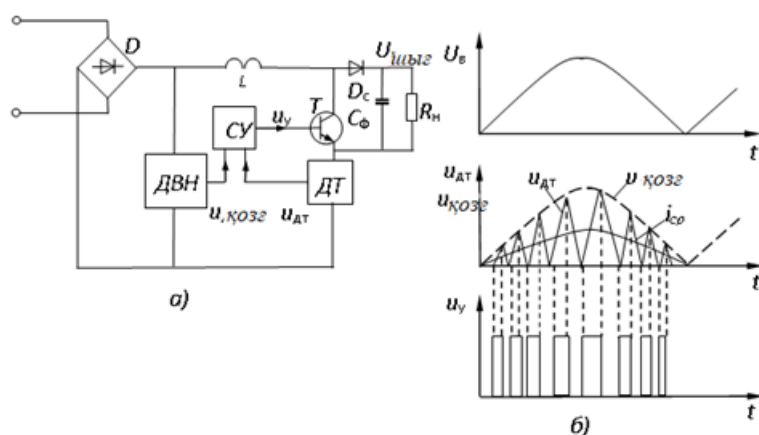
Ағымдағы импульстардың бұл түрінде олардың спектрі өте кең және көптеген гармоникалардан тұрады. Нәтижесінде қуат көзінің қуат коэффициенті 0,5 мәніне дейін төмендейді... 0,7. Қуат коэффициентін пассивті түзету сұлбасын

қолдана отырып арттыруға болады, бірақ мұндай сұлба 50 Гц жиілікте үлкен өлшемдер мен массаға ие болатын индуктивтілікті қамтуы керек. Сонымен қатар, мұндай сұлба жүктеме өзгерген кезде индуктивтіліктің өзгеруін қажет етеді. Мұның бәрі коммутациялық қуат көздері үшін пассивті қуат түзеткіштерін қолданудың мүмкін еместігін көрсетеді.

Қуат коэффициентінің белсенді түзеткіштері. Коммутациялық қуат көздерімен жұмыс істеу үшін MicroLinear 1989 жылы белсенді қуат түзеткішті басқарудың алғашқы ml4812 чипін жасады.

Кейінірек Siemens, Unitrode/Motorola сияқты ірі фирмалар ұқсас сұлбалардың дамуына қосылды. Осы әзірлемелердің нәтижесінде қазіргі уақытта қуат коэффициентін түзеткіштермен біріктірілген коммутациялық қуат көздерін басқарудың көптеген сұлбалары бар.

Алдымен қуат коэффициентін белсенді түзеткіштің жұмыс принципін қарастырыңыз. 1.94-суретте осындай түзеткіштің жеңілдетілген құрылымдық сұлбасы келтірілген. Сұлбадан көріп отырғанымыздай, бірлікке жақын қуат коэффициентін алуға түзеткіштен сүзгі сыйымдылығын алып тастау арқылы қол жеткізіледі, ол әдетте түзетілген кернеудің импульстарын тегістеу үшін импульстік қуат көздеріне орнатылады. Бұл сыйымдылықтың орнына сұлбаға жоғары жиілікті импульсті күшейткіш тұрақтандырғыш енгізіледі, төмен индуктивтілік  $L$ , кіріс индуктивтіліктегі үзіліссіз токтың шекаралық режимінде жұмыс істейді.



1.94 сурет - Қуат коэффициентінің (а) белсенді корректорының құрылымдық сызбасы және оның уақыт диаграммалары (б)

Транзистор  $t$  индуктивтілігі арқылы қосылған кезде жоғарылататын кернеу тұрақтандырғышының әрекет ету принципіне сәйкес  $L$ , сызықтық заңға сәйкес өсетін ток басталады. Транзистор  $t$  өшірілгенде,  $L$  индуктивтілігіндегі ток  $C_f$  сүзгісінің  $DC$  диоды арқылы зарядталып, сызықтық заңға сәйкес төмендейді.

$T$  негізгі транзисторын қосу және өшіру басқару құрылғысымен жүзеге асырылады, ол түзетілген кернеу ДАТЧИГІНЕН, индуктивтіліктегі  $DT$  ток

датчигінен және СУ басқару импульстарын қалыптастыру тізбегінен тұрады. Басқару импульстарын қалыптастыру процесі суретте көрсетілген уақыт диаграммаларымен суреттелген (1.94, ә сурет). Осы диаграммалардан көрініп тұрғандай,  $t$  транзисторының қосылуы ДТ ток сенсорының шығысындағы кернеу нөлге тең болған кезде пайда болады (яғни,  $I$  индуктивтілігінде нөлдік ток болған кезде). Т транзисторының өшуі ток сенсорынан сызықтық жоғарылаған кернеу түзетілген  $DV$  кернеуінің берілгішінің синусоидальды Заңына сәйкес өзгеретін кернеуге тең болған кезде пайда болады.

Транзисторды өшіргеннен кейін индуктивтіліктегі ток төмендей бастайды және токтың нөлдік мәні кезінде транзистор  $m$  қайта қосылады. Әрі қарай, процесс өте жоғары жиілікте қайталанады. Индуктивтіліктің орташа мәні синусоидалы және түзетілген кернеумен фазада сәйкес келеді. Осылайша, түзеткіш сұлбасының арқасында қуат коэффициентінің жоғары мәніне қол жеткізіледі.

Қуат коэффициентін түзеткіштің (БКМ) келтірілген сұлбасының кемшіліктері талдың шығу кернеуін тұрақтандырудың болмауын қамтиды. Желі кернеуі немесе жүктеме өзгерген кезде БКМ шығу кернеуі де өзгереді. Тұрақты шығу кернеуін алу үшін БКМ сұлбасына шығу кернеуі бойынша қосымша кері байланыс енгізіледі.

### Әдебиеттер тізімі

1. Жолшараева Т.М. Микроэлектроника. Полупроводниковые приборы: Учебное пособие. Алматы: АИЭС, 2006. – 79 с.
2. Т.М. Жолшараева, З.М. Рахимжанова Микроэлектроника. Шала өткізгішті аспапта: Оқу құралы: Алматы: АИЭС, 2009. – 81 с.
3. Микроэлектроника. Интегральные микросхемы: учеб. пособие Алматы: АИЭС, 2009. – 81 с.
4. Т.М. Букреев И. Микроэлектронные схемы цифровых устройств – М.: Высшая школа 2009. – 31 с.
5. Жолшараева Т.М. Электроника: Учебное пособие. АИЭС, 2010
6. Т.М. Жолшараева. Н.С. Бакирова. Электроника. Есептеу- графикалық жұмысты орындауға арналған ӘН. АУЭС, 2015
7. Т.М. Жолшараева. У.К. Дегембаева. Электроника. Жартылай өткізгішті аспаптар және аналогтық құрылғылар. Зертханалық жұмыстарға арналған ӘН. АУЭС, 2011
8. Т.М. Жолшараева. У.К. Дегембаева. Электроника. Цифрлық құрылғылар. Зертханалық жұмыстарға арналған ӘН. АУЭС, 2011
9. Лахин С.Н. Схемотехника ЭВМ. СПб, 2010
10. Опадчий Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника. М.: Высшая школа, 2005, 2007.

## Мазмұны

Кіріспе	3
1 Шалаөткізгіш құрылғылар	
1.1 Шалаөткізгіштердің электр өткізгіштігі	5
1.1.2 Шалаөткізгіштердегі дрейфтік және диффузиялық токтар	8
1.1.3 Шалаөткізгіш резисторлар	10
1.1.4 <i>p-n</i> ауысуының құрылымын жасау және оның қасиеттері	16
1.1.5 Реалдық <i>p-n</i> ауысуының қасиеттері	22
1.6 Металлды – шала өткізгіш ауысуы	24
1.7 Реалды <i>p-n</i> - ауысунің ерекшеліктері	26
1.8 Интегральды миросұлбалар мен шалаөткізгішті құралдар жасауда қолданылатын негізгі технологиялық процестер	30
1.2 Шалаөткізгіш диодттар	32
1.2.1 Шалаөткізгіш диодттар жайлы жалпы түсініктер	32
1.3 Диодтардың басқа түрлері	42
1.4 Биполярлық транзисторлар	45
1.4.1 Биполярлы транзисторлардың құрылымы мен құрылысы	45
1.4.2 Биполярлы транзистордың жұмыс принципі және оның негізгі параметрлері	47
1.4.3 Биполярлы транзистордың жұмыс режимдері	48
1.4.4 Биополяр транзисторының қосылу сұлбалары мен сипаттамалары	50
1.5 Өрістік транзисторлар	51
1.5.1 Өрістік транзисторлардың түрлері	51
1.5.2 <i>p-n</i> ауысуы бар өрістік транзистор	53
1.5.3 Оқшауланған тиекті металл-диэлектрик-шалаөткізгіш транзисторлары	55
1.6 Тиристорлар	56
1.6.1 Тиристорлар жайлы түсінік	56
1.6.2 Дниистордегі физикалық процестер	57
1.6.3 Тринистор	61
3 Аналогтық электронды құрылғылар	63
3.1 Күшейткіштер туралы түсініктер	63
3.2 Күшейткіштердің көрсеткіштері (негізгі параметрлері)	65
3.3 Ортақ эмиттерлі сұлбасымен қосылған күшейткіш каскады	68
3.1.4 Қуат күшейткіштерінің ерекшеліктері	69
3.1.5 Ортақ коллекторы бар күшейткіш каскады	71
3.1.6 Құрама транзистор қолданған күшейткіш каскад	72
3.1.7 Екі тактылы күшейткіш каскады	73
3.1.8 Өріс транзисторларын қолданған күшейткіш каскадтар	74
3.1.9 Тұрақты ток күшейткішітері	76
3.1.10 Операциялық күшейткіш	78

3.1.11 Операциялық күшейткіштер негізінде жасалған ауқымдаушы күшейткіштер	81
3.1.12 Сигнал генераторлары	82
3.1.13 Синусоидальды тербеліс генераторы	82
3.1.14 Мультивибратор	85
3.1.15 Араісті кернеу генераторы	87
3.1.16 Аналогтық сигнал компараторлары	88
3.1.17 Аналогтық кернеу компараторлары	88
3.1.18 Электронды кілт	92
4 Екінші ретті электрмен қоректендіру көздері	98
4.1 Электрмен қоректендіру көздерінің құрылымы	98
4.2 Түзеткіш құрылғылар	99
4.3 Тегістейтін сүзгілер	102
4.4 Кернеу тұрақтандырғыш	103
4.5 Тұрақты кернеу түрлендіргіштері	107
4.6 Дроссельдегі кернеу	109
4.7 Тиристорлар негізіндегі күштік құрылғылар және қуатты транзисторлар	109
Әдебиеттер тізімі	118

Бораш Абилович Жумагазин  
Арайлым Бекжанқызы Нусибалиева

## ЭЛЕКТРОНИКА

Оқу құралы

Редактор:

Изтелеуова Ж.Н.

Мөрге қол қою \_\_\_ 2015  
Тираж \_100\_ дана. Формат 60x84 1/16

Типографиялық қағаз № 2  
Есеп.- басп.п. 7.4 Тапсырыс № \_\_\_\_  
Бағасы \_3700\_ тг

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы АЭЖБУ»КЕАҚ  
Алматы қ., Байтұрсынұлы к. 126/1

«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы Энергетика және Байланыс  
Университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамының  
көшірме-көбейту бюросы  
050013 Алматы қ., Байтұрсынұлы к. 126/1