

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ

Құттыбай Н.Б.

Түрлендіру техникасы

«Өндірістік электроника және басқару жүйелері», «Радиотехника,
электроника және телекоммуникациялар» мамандықтары бойынша білім
алушы студенттерге арналған

Алматы

2 Дәріс

Тақырыбы: Күштік жартылай өткізгіш элементтер. Диодтар, тиристорлар, транзисторлар (IGBT, MOSFET): жұмыс принциптері, параметрлері, қолдану ерекшеліктері.

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Күштік жартылай өткізгіш элементтердің (диодтар, тиристорлар, MOSFET және IGBT транзисторлары) жұмыс принциптері мен құрылымдарын, негізгі электрлік параметрлерін және қолдану салаларын түсіну. Элементтердің ерекшеліктерін ажыратып, оларды әртүрлі электрондық және қуаттық құрылғыларда дұрыс тандап қолдана білу дағдыларын қалыптастыру.

Міндеттері:

1. Күштік жартылай өткізгіш элементтердің (диодтар, тиристорлар, MOSFET және IGBT транзисторлары) құрылымын және жұмыс принципін түсіндіру.
2. Әр элементтің негізгі электрлік параметрлерін анықтау және олардың маңызын түсіндіру.
3. Диодтар, тиристорлар, MOSFET және IGBT транзисторларының қолдану ерекшеліктерін көрсету.
4. Күштік жартылай өткізгіш элементтердің энергия түрлендіргіштердегі, инверторлардағы, DC-DC конвертерлердегі және қорғаныс схемаларындағы рөлін талдау.
5. Студенттерге элементтерді нақты қолдану жағдайларына сәйкес таңдау дағдыларын қалыптастыру.
6. Жоғары жиілікті, жоғары тоқты және жоғары кернеулі жүйелерде жұмыс істейтін құрылғыларда дұрыс қуат элементін таңдау қабілетін дамыту.
7. Күштік электроника саласындағы кәсіби құзыреттілікті қалыптастыру үшін теориялық білімді практикалық мысалдармен байланыстыру.

Түйінді ұғымдар мен терминдер

- Диод, P-N өткел, V_{drn} , I_R , T_{rr}
- Тиристор, SCR, Gate, Hold current
- MOSFET, $R_{DS(on)}$, $V_{GS(th)}$, T_{on} , T_{off}
- IGBT, V_{CEmax} , I_C , $V_{GE(th)}$, $R_{CE(on)}$
- Қуатты түрлендіргіштер, инверторлар, DC-DC конвертерлер

Дәріс жоспары

Кіріспе

1. Диодтар
2. Тиристорлар (SCR – Silicon Controlled Rectifier)
3. MOSFET транзисторлар (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
4. IGBT транзисторы (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

Қорытынды

Әдебиеттер тізімі

Кіріспе

Күштік жартылай өткізгіш құрылғылар – электр энергиясын басқару және түрлендіру жүйелерінің негізі. Олар жоғары токтар мен кернеулерде жұмыс істеу қабілетімен сипатталады және инверторлар, түрлендіргіштер, тұрақтандырғыштар, реттегіштер сияқты құрылғыларда кеңінен қолданылады.

1. Диодтар

Диод — бұл екі түрлі жартылай өткізгіш қабаттан тұратын электрондық құрылғы: р-типті және n-типті. Бұл екі қабаттың түйіскен жерінде р-n өткелі (p-n junction) түзіледі. Диодтың негізгі қызметі — токты тек бір бағытта өткізу. Осы қасиеті арқылы диод электр тогының біржақты өтуін қамтамасыз етеді, яғни:

❖ Алға бағытталған қосылу кезінде (анодта оң кернеу, катодта теріс кернеу) р-типтегі аймақтағы оң заряд тасымалдаушылар (тесіктер) мен n-типтегі теріс заряд тасымалдаушылар (электрондар) р-n өткел арқылы бірігіп, ток өтеді.

❖ Кері бағытталған қосылу кезінде (анодта теріс, катодта оң кернеу) өткел кеңейіп, өткізгіштік тежеледі, ток өте алмайды, тек өте аз ағып өтетін кері ток пайда болады (рұқсат етілген шектерде ғана).



Р-N өткелінің негізгі қасиеттері:

- ❖ Тасымалдаушылардың диффузиясы;
- ❖ Электр өрісі арқылы дрейф қозғалысы;
- ❖ Өткел аймағында тосқауылдық потенциалдың түзілуі.

1) Тік өткізгіштік кернеуі (V_f)

Диод арқылы токтың өтуі басталатын минималды кернеу. Кремний диодтарында бұл кернеу әдетте ~ 0.7 В, ал германиялық диодтарда ~ 0.3 В құрайды. Бұл кернеу тосқауылдық потенциалды жеңу үшін қажет.

2) Кері кернеу (V_R)

Диод зақымданбай ұстай алатын максималды кері кернеу мәні. Егер бұл шектен асса, р-n өткелі бұзылып, диод күйіп кетуі мүмкін. Бұл параметр кері тесіліп кету кернеуі (breakdown voltage) деп те аталады.

3) Максималды ток (I_f немесе I_{max})

Диод арқылы ұзақ уақыт немесе импульстік түрде өте алатын токтың максималды мәні. Артық ток өткен жағдайда құрылғы қызып, бұзылуы мүмкін. Сондықтан бұл параметр диодтың жылулық шектеулеріне байланысты анықталады.

4) Ақу

ток

(I_R)

Кері қосылған жағдайда диод арқылы өтетін аз ғана кері ток. Бұл ток диод сапасына, температураға және материал түріне байланысты болады.

5) Ауысу

уақыты

(T_{rr})

Диодтың кері күйге ауысу уақыты – жоғары жиілікті схемалар үшін маңызды параметр. Ультразвук диодтарда бұл уақыт өте аз (наносекундтармен өлшенеді).

Диодтар электр және электрондық тізбектерде өте кең қолданылады. Төменде олардың негізгі қолдану салалары келтірілген:

1) Түзеткіш

схемаларда

Айнымалы токты (AC) тұрақты токқа (DC) түрлендіру үшін диодтар бір немесе бірнеше фазалы түзеткіш схемаларда қолданылады:

- ❖ Жарты толқынды түзеткіш;
- ❖ Толық толқынды түзеткіш (орталық нүктелі трансформатор немесе көпірлік схема);
- ❖ Көпфазалы түзеткіштер (өндірісте).

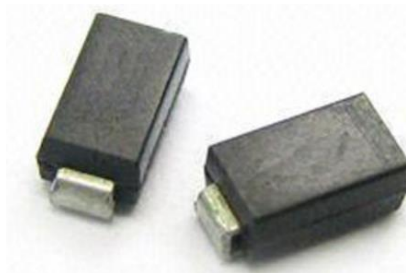


2) Қорғаныс

тізбектерінде

Диодтар кернеуден қорғау, кері токтың алдын алу, немесе индуктивті жүктемеден туындайтын кернеу импульсінен сақтау үшін қолданылады:

- ❖ Flyback диодтар – реле немесе индуктивті жүктемелерде;
- ❖ Zener диодтар – тұрақты кернеуді қамтамасыз ету;
- ❖ TVS (Transient Voltage Suppression) диодтары – кернеу импульстерінен қорғау.



3) Импульстік

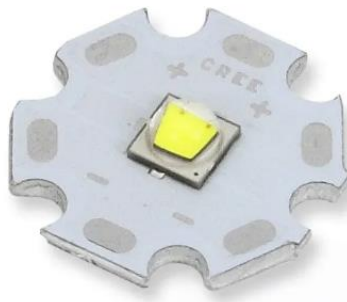
түрлендіргіштерде

Импульстік қуат көздерінде (SMPS) және жоғары жиілікті түрлендіргіштерде жылдам ауысатын диодтар қажет. Бұл мақсатта Schottky диодтар, ультразвук диодтар жиі қолданылады. Олардың артықшылықтары – төмен V_f және қысқа қалпына келу уақыты.



4) Жарық диодтары (LED)

Электр энергиясын жарыққа түрлендіретін арнайы типтегі диодтар. Олар сигналдық индикаторлар, жарықтандыру жүйелері және дисплейлерде кеңінен қолданылады.



2. Тиристорлар (SCR – Silicon Controlled Rectifier)

Тиристор — бұл төрт қабатты (PNPN) құрылымнан тұратын, үш р-п өткелі бар (р-п-р-п) күштік жартылай өткізгіш құрылғы. Ол анод (А), катод (К) және басқару электроды (Gate) деген үш негізгі электродтан тұрады.



Тиристордың жұмыс істеу принципі:

❖ Анод катодқа қатысты оң потенциалда болғанда және Gate электродына оң басқарушы импульс берілгенде, тиристор ашылады (ток өткізетін күйге өтеді).

❖ Тиристор ашылғаннан кейін, Gate-ке басқарушы сигнал қажет емес — ол анод-катод тізбегіндегі ток нөлге дейін төмендегенге дейін өткізгіш күйде қалады.

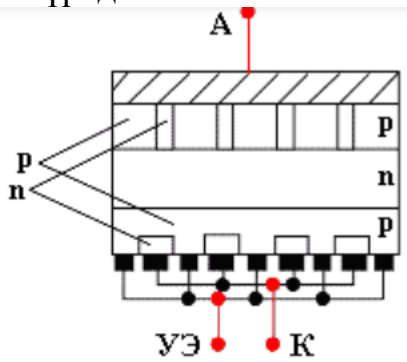
❖ Кері кернеу түсірілген жағдайда, тиристор ток өткізбейді — бұл оның бірбағыттылық қасиетін көрсетеді.

Қарапайым түсіндіру:

Тиристорды басқарылатын диод деп қарастыруға болады. Ол диод сияқты токты тек бір бағытта өткізеді, бірақ тек Gate сигналы берілгенде ғана жұмыс істейді.

Құрылымдық аналогия:

Тиристор – бұл бір-бірімен байланысқан pnp және npn типтегі екі транзистор сияқты жұмыс істейді. Басқару сигналы берілгенде осы «екі транзисторлы схема» өзін-өзі күшейтетін ток ағынын қамтамасыз етіп, құрылғыны ашық күйде ұстап тұрады.



1) Тік өткізгіштік кернеуі (V_{drm}) және кері кернеу (V_{rrm})
Бұл параметрлер тиристордың жабық күйде зақымдалмай шыдай алатын максималды кернеу шектері:

❖ V_{drm} (Repetitive Peak Off-State Voltage) – анод-катод арасындағы оң бағыттағы кернеудің шекті мәні;

❖ V_{rrm} (Repetitive Peak Reverse Voltage) – анод-катод арасындағы теріс бағыттағы кернеудің шекті мәні.

2) Тұрақты ток (I_T)

Бұл тиристор арқылы ұзақ уақыт бойы өтетін максималды ток мәні. Құрылғының жылу тарату мүмкіндігіне байланысты анықталады.

3) Қосу және ажырату уақыты (t_{on} , t_{off})

Тиристордың өткізгіштік күйге және қайтадан жабық күйге өту уақыты. Бұл параметрлер әсіресе жоғары жиілікті басқару жүйелерінде маңызды.

4) Gate тогы және кернеуі (I_G , V_G)

Тиристорды ашу үшін Gate электродына қандай ток пен кернеу қажет екенін көрсетеді. Бұл мәндер өте аз, әдетте бірнеше миллиампер.

5) Hold current (I_H)

Тиристор ашылғаннан кейін оны ашық күйде ұстау үшін анод-катод тізбегі арқылы өтіп тұруы тиіс минималды ток.

Тиристорлар жоғары қуатты және басқарылатын түзеткіштер, реттегіштер, импульстік қуат құрылғылары сияқты көптеген өнеркәсіптік және тұрмыстық қолданбаларда кеңінен қолданылады.

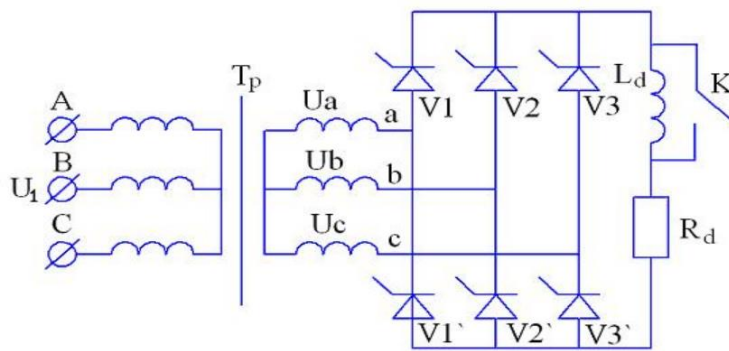
Негізгі қолдану салалары:

1) Жоғары қуатты түзеткіштер мен реттегіштер

❖ Көпірлік тиристорлы түзеткіш схемаларда;

❖ Айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіруде (мысалы, электровоздарда, металлургия пештерінде);

❖ Фазалық басқару әдісі арқылы кернеуді реттеу.



2) Кернеу реттеу жүйелерінде

- ❖ Жарық шамдарын (мысалы, диммерлерде) және электрлік жылытқыштарды басқару;

- ❖ Жартылай циклді басқару арқылы энергия үнемдеу және тиімді басқару.

3) Импульстік қуат көздерінде және жүктемені коммутациялау

- ❖ Импульстік генераторлар, плазмалық жүйелер, лазерлік генераторлар сияқты құрылғыларда;

- ❖ Жоғары кернеулі, қысқа импульстік токты басқару қажет болғанда тиристорлар таптырмас құрал.

4) АС басқару жүйелері

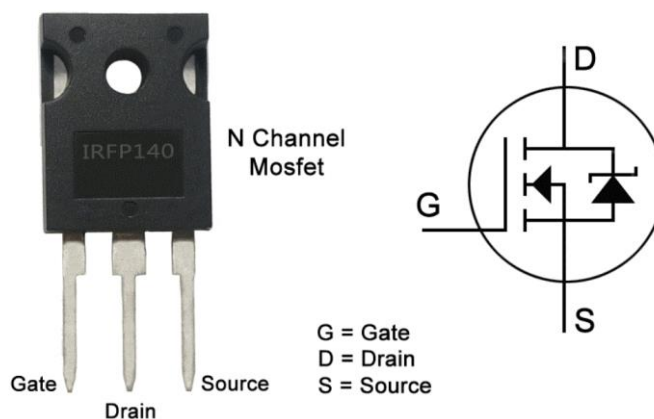
- ❖ АС вольт-регуляторлар, жүктеме фазасын басқару үшін;

- ❖ Симметриялы тиристорлар (TRIAC) – тұрмыстық құрылғыларда фазалық басқаруда қолданылады.

3. MOSFET транзисторлар (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

MOSFET (металл-оксид-жартылай өткізгіш өрістік транзисторы) — бұл электр өрісімен басқарылатын үш электродты жартылай өткізгіш құрылғы. Ол Gate (G) – басқару электроды, Drain (D) – сток, және Source (S) – исток деп аталатын үш негізгі бөліктен тұрады.

TO-247



Жұмыс істеу принципі:

- ❖ MOSFET-тің негізгі элементі – жартылай өткізгіш арна, оның өткізгіштігі Gate-ке түсірілген кернеудің әсерімен өзгеріп отырады.

❖ Gate пен арна арасында оксидті окшаулау қабаты (әдетте SiO_2) бар, сондықтан Gate-ке ток жүрмейді, тек кернеу арқылы басқару жүзеге асады.

❖ Gate-ке белгілі бір кернеуден жоғары ($V_{GS(th)}$) кернеу берілгенде, арна пайда болып, Source пен Drain арасында ток ағады.

Арна типіне байланысты:

❖ n-тип MOSFET: Gate-ке оң кернеу түсірілгенде ашылады.

❖ p-тип MOSFET: Gate-ке теріс кернеу түсірілгенде ашылады.

Артықшылығы:

❖ Жоғары кіріс кедергісі (Gate ток алмайды) → өте аз басқару қуаты қажет;

❖ Жоғары жиілікте жылдам қосылып/ажырау мүмкіндігі;

❖ Жылу шығару көрсеткіші жақсы.

4.2 Негізгі параметрлері

1) Канал түрі

❖ n-тип – жиі қолданылады, себебі өткізгіштігі жоғары;

❖ p-тип – кейбір арнайы схемаларда немесе CMOS құрылымдарда қолданылады.

2) $R_{DS(on)}$ – Арнаның қосылған кездегі кедергісі

❖ MOSFET ашық күйде болғанда, Drain мен Source арасындағы кедергі;

❖ Бұл параметр қуат шығынын және жылу шығаруын анықтайды – неғұрлым аз болса, соғұрлым жақсы;

❖ Типтік мәндері миллиом ($\text{m}\Omega$) шамасында болады.

3) $V_{GS(th)}$ – Басқару кернеуінің табалдырық мәні

❖ MOSFET-тің ашыла бастайтын Gate-Source арасындағы кернеуі;

❖ Әдетте 1-4 В аралығында болады;

❖ Мысалы, егер $V_{GS(th)} = 2$ В болса, онда Gate-ке 2 В-тан артық кернеу түсірілсе, құрылғы ашылады.

4) T_{on} , T_{off} – Қосу және өшіру уақыты

❖ Бұл параметрлер жоғары жиілікті жұмыста өте маңызды;

❖ T_{on} – Gate сигналы келгеннен кейін Drain-Source тоқтың пайда болуына дейінгі уақыт;

❖ T_{off} – Gate сигналы кеткеннен кейін тоқтың толық тоқтау уақыты;

❖ Әдетте наносекундтармен (ns) өлшенеді.

5) $V_{DS(max)}$ – Drain-Source арасындағы шекті кернеу

❖ MOSFET-тің жабық күйінде төтеп бере алатын максималды кернеу;

❖ Жоғары кернеулі схемаларда бұл параметр 300 В – 1000 В және одан да көп болуы мүмкін.

MOSFET транзисторлары қуатты электроникада, цифрлық құрылғыларда, түрлендіргіштерде және басқару жүйелерінде кеңінен қолданылады.

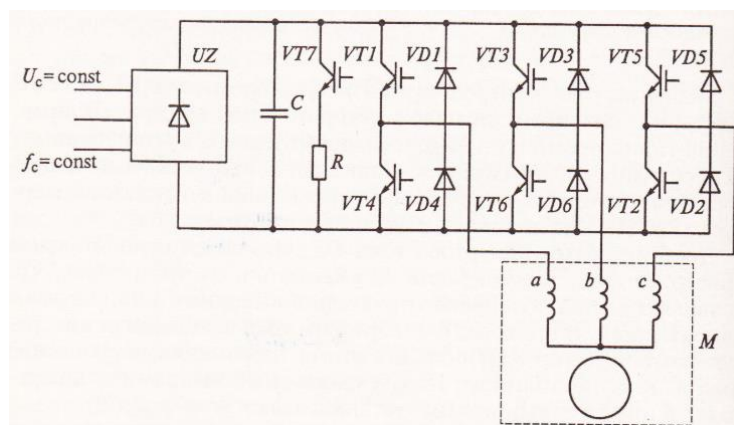
Негізгі қолдану салалары:

1) Жоғары жиілікті түрлендіргіштерде

❖ Инверторларда, импульстік қуат көздерінде;

❖ Жиілік түрлендіргіштерінде;

❖ Артықшылығы – тез әрекет ету уақыты және жоғары тиімділік.



2) DC-DC конвертерлерде

- ❖ Buck, Boost, Buck-Boost сияқты түрлендіргіш топологияларында;
- ❖ MOSFET – негізгі коммутатор ретінде қолданылады;
- ❖ Шағын өлшемді, тиімділігі жоғары қуат көзі құрылғылары.

3) Электронды жүктемелер мен қуатты басқару жүйелерінде

- ❖ Электр қозғалтқыштарды басқару (BLDC, PMSM);
- ❖ Қуатты жарықтандыру (LED-драйверлер);
- ❖ Автомобиль электроникасы (электрондық релелер, батареяны басқару).

4) Тізбекті ажырату және қорғау схемаларында

- ❖ Қосқыш немесе тізбекті басқарушы элемент ретінде;
- ❖ Артық токтан және кернеуден қорғау.

4. IGBT транзисторы (Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBT (оқшауланған қақпа бар биполярлы транзистор) — бұл MOSFET пен биполярлы транзистордың артықшылықтарын біріктіретін құрылғы. Ол MOSFET сияқты жоғары кіріс кедергісімен (Gate арқылы басқару) және биполярлы транзистор сияқты жоғары ток өткізгіштік қабілетімен ерекшеленеді.

IGBT құрылымында Gate, Collector және Emitter үш негізгі электрод бар. Басқарушы сигнал Gate пен Emitter арасында беріледі. Gate-ке оң кернеу берілгенде, құрылғы ашылады және Collector-ден Emitter-ге дейінгі ток ағуына мүмкіндік береді. Басқару кернеуі тоқтаса да, құрылғы біраз уақыт ашық қалып, жүктемеге қуат жеткізе береді — бұл оның ерекшелігі.

Жұмыс принципі мынадай:

- ❖ Қақпа (Gate) – өте аз ток тұтынатын басқару тізбегі;
- ❖ Эмиттер (Emitter) – токтың шығу нүктесі;
- ❖ Коллектор (Collector) – токтың кіру нүктесі;

IGBT токты ашу үшін MOSFET-ке тән өріспен басқару механизмін қолданады, ал жоғары токты өткізу үшін биполярлы транзистордың артықшылықтарын пайдаланады.

❖ V_{CEmax}) – Коллектор-эмиттер арасындағы максималды рұқсат етілген кернеу. Бұл параметр құрылғының қаншалықты жоғары кернеуде жұмыс істей алатынын көрсетеді (мысалы, 600 В, 1200 В, 1700 В және одан жоғары болуы мүмкін).

❖ I_C – Коллектор арқылы өтетін рұқсат етілген максималды ток. Бұл параметр құрылғының жүктемеге қаншалықты ток бере алатынын анықтайды (кейбір IGBT модульдері жүздеген амперге дейін шыдай алады).

❖ $V_{GE(th)}$ – Қақпаның ашылу табалдырығы. Құрылғы осы мәннен жоғары кернеу берілгенде ғана ашылады.

❖ $R_{CE(on)}$ – Қосылған кездегі коллектор-эмиттер арасындағы кедергі. Бұл параметр құрылғының өткізгіш күйдегі шығындарын көрсетеді.

❖ T_{on} , T_{off} – Қосылу және ажыратылу уақыты. IGBT-нің жылдамдығы мен жиілікте жұмыс істеу мүмкіндігін көрсетеді. Жоғары қуатты жүйелер үшін бұл параметр өте маңызды, себебі әр қосылып-өшкен сайын қуат жоғалуы болады.

IGBT транзисторлары көбінесе жоғары қуатты және жоғары кернеулі жүйелерде қолданылады. Олардың артықшылықтары — үлкен ток және кернеу өткізе алуы, салыстырмалы түрде қарапайым басқару жүйесі, аз кіріс қуатының қажеттілігі және жоғары тиімділік.

Негізгі қолдану салалары:

❖ Жел генераторлары мен фотовольтаикалық инверторларда (PV inverters):

IGBT қуатты тұрақтандыру және айнымалы токқа түрлендіру процестерінде қолданылады. Бұл құрылғылар үлкен кернеулер мен токтармен жұмыс істейтіндіктен, IGBT-лердің жоғары өнімділігі мен сенімділігі қажет.

❖ Теміржол көліктері (электр пойыздары, метро):
Электр моторларын басқару жүйелерінде, әсіресе тұрақты және айнымалы тоқты басқаруда, IGBT негізгі рөл атқарады. Жоғары ток пен жиі коммутация қажет болғандықтан, бұл салада IGBT-нің тиімділігі мен сенімділігі маңызды.

❖ Энергиямен жабдықтау жүйелері:
UPS, жоғары кернеулі инверторлар, жиілік түрлендіргіштер секілді құрылғыларда IGBT қолданылады.

❖ Қыздыру және дәнекерлеу құрылғылары:
Жоғары жиілікті индукциялық қыздыру және плазмалық кесу жабдықтарында қуатты ток көзін басқару үшін IGBT қолданылады.

❖ Лифт жүйелері мен өнеркәсіптік моторларды басқару:
Жүктеменің өзгермелі сипаты жағдайында жылдам және сенімді коммутацияны қамтамасыз етеді.

Білімді бекіту сұрақтары

1. Диодтың жұмыс принципі мен P-N өткелінің қасиеттерін түсіндіріңіз.
2. Диодтардың негізгі параметрлерін атаңыз және әрқайсысының маңызын түсіндіріңіз.
3. Тиристордың ерекшелігі неде және оны қалай басқаруға болады?
4. MOSFET транзисторының артықшылықтары мен қолдану салаларын атаңыз.
5. IGBT транзисторы MOSFET пен биполярлы транзистордан қандай артықшылық алады?
6. Қуат элементтерінің T_{on} және T_{off} параметрлері не үшін маңызды?

7. Диодтар мен тиристорлардың айырмашылығы неде?
8. MOSFET пен IGBT транзисторларының қолдану салаларын салыстырыңыз.
9. Күштік жартылай өткізгіш элементтердің энергия түрлендіргіштердегі рөлін сипаттаңыз.
10. Қандай элементті қандай жағдайда қолданған дұрыс (мысалы, жоғары жиілік, жоғары ток, қорғаныс)?

Қорытынды:

Күштік жартылай өткізгіш элементтер – қазіргі заманғы электрондық және электрэнергетикалық жүйелердің негізін құрайтын маңызды компоненттер. Оларға диодтар, тиристорлар, MOSFET және IGBT транзисторлары жатады. Әр элементтің өзіндік құрылымдық ерекшеліктері, жұмыс принциптері мен қолдану аймақтары бар.

Бұл элементтерсіз қазіргі заманғы түрлендіргіштер, инверторлар, электр жетектер, қуат көздері және көптеген басқа құрылғылардың жұмысын елестету мүмкін емес. Электроника мен электр энергетикасы салаларында жұмыс істейтін мамандар үшін олардың жұмыс принциптерін, параметрлерін және қолдану ерекшеліктерін терең түсіну – кәсіби құзыреттіліктің маңызды бөлігі.

Әдебиеттер тізімі:

1. Косачевский И.В., Гусев В.Е. Силовая электроника: Учебник. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.
2. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices and Applications. – 4th ed., Pearson Education, 2014.
3. Боровков А.И. Полупроводниковые приборы и их применение. – СПб.: Лань, 2020.
4. Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. – Wiley, 2003.
5. Сидоров В.П., Белоусов А.И. Элементы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 2019.
6. Baliga B.J. Fundamentals of Power Semiconductor Devices. – Springer, 2010.
7. Мельников А.В. Силовая электроника: Учебное пособие для вузов. – М.: Форум, 2018.