

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

8 Дәріс

Тақырыбы: Импульстік қорек көздері. Импульстік қорек көздерінің құрылымы, артықшылықтары.

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Импульстік қорек көздерінің жұмыс істеу принциптерін, құрылымдық ерекшеліктерін, артықшылықтарын және қолданылу салаларын теориялық және практикалық тұрғыдан түсіну. Сонымен қатар, олардың дәстүрлі қорек көздерінен айырмашылықтарын көрсету арқылы импульстік түрлендіру технологияларының заманауи электроникадағы маңыздылығын ұғыну.

Міндеттері:

1. Импульстік қорек көздерінің (ИКҚ) жұмыс принципін және негізгі құрылымдық элементтерін түсіндіру.
2. Айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіру кезеңдерін (түзеткіш, фильтр, импульстік түрлендіргіш) талдау.
3. Импульстік қорек көздерінің артықшылықтарын сызықтық қорек көздерімен салыстырып көрсету.
4. Кері байланыс пен қорғаныс жүйелерінің рөлін және олардың жұмыс істеу принциптерін түсіндіру.
5. Импульстік қорек көздерінің әртүрлі қолдану салаларын (тұрмыстық техника, авиация, медицина, өнеркәсіп, телекоммуникация) талдау.
6. ИКҚ тиімділігін, тұрақтылығын және экологиялық артықшылықтарын бағалау.

Түйінді ұғымдар мен терминдер

- Импульстік қорек көзі (ИКҚ, Switching Power Supply) — электр энергиясын жоғары жиіліктегі импульстік әдіспен түрлендіретін қорек көзі.
- Түзеткіш (Rectifier) — айнымалы токты тұрақты токқа айналдыратын элемент.
- Фильтр (Filter) — пульсацияны азайтып, тұрақты кернеу алу үшін қолданылатын тізбек.
- Импульстік түрлендіргіш (Switching Regulator) — кернеуді көтеру (Boost), төмендету (Buck) немесе тұрақтандыру (Buck-Boost) үшін қолданылатын негізгі түрлендіргіш бөлік.
- Кері байланыс жүйесі (Feedback Loop) — шығыс кернеуін тұрақтандыру және дәл реттеу үшін қолданылатын бақылау механизмі.
- Қысқа тұйықталудан қорғау (Short-circuit protection) — құрылғыны зақымданудан қорғау жүйесі.
- Артық кернеуден/токтан қорғау (Overvoltage/Overcurrent Protection) — шектен асқан жағдайда автоматты реттеу немесе сөндіру жүйесі.

- Тиімділік (Efficiency) — кіріс қуатының қанша бөлігі пайдалы жұмысқа жұмсалатынын сипаттайтын көрсеткіш ($\eta = P_{\text{шығ}}/P_{\text{кіріс}} \times 100\%$).
- PWM (Pulse Width Modulation) — шығыс кернеуін басқару үшін импульстің енімен модуляциялау әдісі.
- Buck түрлендіргіші — кернеуді төмендететін DC–DC түрлендіргіш.
- Boost түрлендіргіші — кернеуді жоғарылататын DC–DC түрлендіргіш.
- Buck-Boost түрлендіргіші — кіріс кернеуіне байланысты шығыс кернеуін тұрақтандыратын әмбебап түрлендіргіш.
- Электромагниттік кедергі (EMI) — импульстік схемалардың жоғары жиілікті кедергілері.

Дәріс жоспары

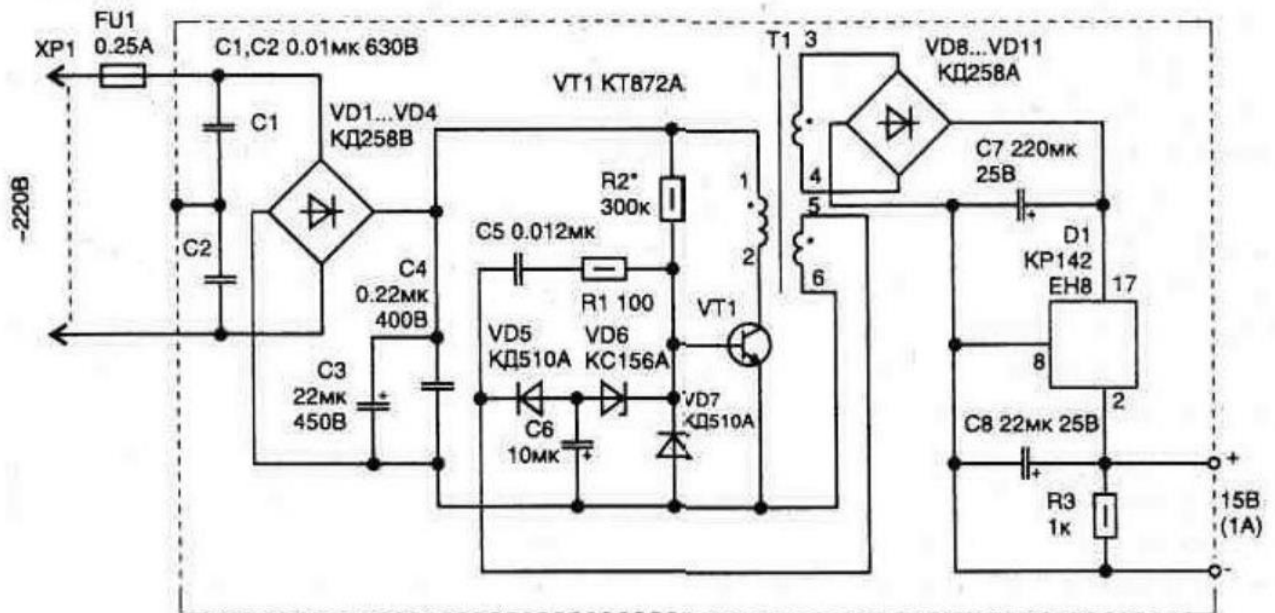
1. Импульстік қорек көздері: жалпы түсінік
 2. Импульстік қорек көздерінің құрылымы
 3. Импульстік қорек көздерінің артықшылықтары
 4. Импульстік қорек көздерінің қолданылу салалары
- Білімді бекітуге арналған сұрақтар
- Қорытынды
- Әдебиеттер тізімі

1. Импульстік қорек көздері: жалпы түсінік

Импульстік қорек көздері (ИКК) — бұл электр энергиясын бірдей немесе тұрақты кернеу немесе токқа түрлендіру мақсатында жұмыс істейтін құрылғылар. Олар электр желісінен алынатын айнымалы токты (AC) тұрақты токқа (DC) түрлендіріп, әртүрлі электронды құрылғыларды қоректендіруге қолданылады. ИКК жұмыс істеу принципі бойынша, айнымалы токты белгілі бір жиілікпен импульстік түрде түрлендіріп, сол арқылы қажетті тұрақты кернеуді береді.

2. Импульстік қорек көздерінің құрылымы

Импульстік қорек көздері (ИКК) қазіргі заманғы электроникада кеңінен қолданылатын энергия түрлендіру құрылғылары болып табылады. Олардың негізгі міндеті — айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіріп, қажетті кернеу мен токты қамтамасыз ету. Бұл құрылғылар бірнеше негізгі компоненттерден тұрады, олардың әрқайсысының өз рөлі мен жұмыс принциптері бар.



2.1 Тұрақты токқа түрлендіргіш (Rectifier)

Тұрақты токқа түрлендіргіш — импульстік қорек көзінің алғашқы бөлігі болып табылады, ол айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіреді. Бұл процесс үшін диодтар мен басқа түрлендіргіш элементтер пайдаланылады.

❖ *Қызметі:* Айнымалы ток (AC) шығысын бір жақты (тұрақты) токқа айналдыру. Әдетте, айнымалы токтың екі жарты циклін пайдаланатын толық-толық түрлендіргіш қолданылады.

❖ *Түрлері:*

- *Біржақты диодты түрлендіргіш:* Ол тек бір жарты циклді қолданады және толқынның екінші жартысынан кері жүретін токты жояды.

- *Толық-толық түрлендіргіш:* Мұнда екі диод параллель қосылып, әр жарты циклда жұмыс істейді, осылайша әрқайсысы әртүрлі уақыт аралығында айнымалы токты тұрақты токқа түрлендіреді.

❖ *Принципі:* Айнымалы токтың синусоидалды пішінін диодтар арқылы өткізу арқылы біржақты ток аламыз. Сонымен қатар, кернеу мен токтың

амплитудасы толқынды болады, яғни тұрақты емес. Сондықтан тұрақты токқа түрлендіру үшін фильтрлер қажет.

2.2 *Фильтр (Filter)*

Фильтр — айнымалы токтан тұрақты токты алу үшін маңызды компонент. Ол тұрақты токта пайда болатын пульсацияларды (жылдам ауытқуларды) жою арқылы, оны тегістейді.

❖ *Қызметі:* Тұрақты токтың шығысында ақаулы толқындарды (пульсацияларды) азайту және тұрақты кернеуді алу.

❖ *Принципі:* Фильтрлер электр тізбегіндегі жоғары жиілікті сигналдарды (пульсацияларды) немесе шу көздерін сөндіреді. Әдетте, бұл компонент конденсаторлар мен индуктивті элементтерден тұрады.

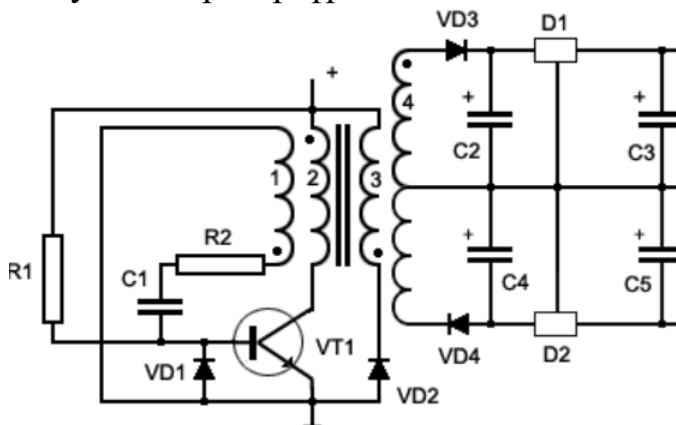
- Конденсаторлар жоғары жиілікті толқындарды сіңіріп, оларды жерге жібереді.

- Индуктивті элементтер (индукторлар) жоғары жиіліктегі компоненттерді ұстап, жүйеге тек төмен жиілікті токты жіберуге мүмкіндік береді.

Тұрақты токты алу үшін фильтрдің параметрлері кернеудің пульсациясын төмендету үшін дұрыс таңдалуы тиіс. Пульсацияның деңгейі төмен болған сайын, шығыс токтың тұрақтылығы артады.

2.3 *Импульстік түрлендіргіш (Switching Regulator)*

Импульстік түрлендіргіш — қорек көзінің негізгі түрлендіру функциясын орындайтын компонент болып табылады. Ол тұрақты токты қажетті деңгейге көтеру немесе төмендету үшін пайдаланылады. Импульстік түрлендіргіштер көптеген типтерге бөлінеді, олардың әрқайсысының жұмыс принциптері мен қолдану салалары әртүрлі.



❖ *Қызметі:* Кернеуді көтеру немесе төмендету арқылы тұрақты кернеуді қамтамасыз ету.

❖ *Принципі:* Импульстік түрлендіргіштер импульс генерациясын пайдаланады. Бұл түрлендіргіште транзисторлар мен диодтар арқылы шығысқа берілетін токтың ұзақтығы мен қуаты басқарылады. Бұл әдіс энергияны тиімді түрлендіруге мүмкіндік береді.

- Бүск түрлендіргіші: Бұл түрлендіргіш кернеуді төмендетуге арналған. Ол кіріс кернеуін біршама төмен, бірақ тұрақты шығыс кернеуіне түрлендіреді.

- Boost түрлендіргіші: Керісінше, бұл түрлендіргіш кернеуді көтереді. Ол төменгі кіріс кернеуін жоғары тұрақты шығыс кернеуіне түрлендіреді.

- Buck-Boost түрлендіргіші: Бұл түрлендіргіш кіріс кернеуінің төмен немесе жоғары болуына байланысты шығыс кернеуін тұрақтандыруға мүмкіндік береді.

Импульстік түрлендіргіштер жоғары тиімділікпен жұмыс істейді, өйткені олар энергияны жоғалтпай, тоқты басқару арқылы қажетті кернеуді шығарады.

2.4 Жаңарту (Feedback) және бақылау жүйесі

Жаңарту немесе кері байланыс жүйесі — импульстік қорек көзінің маңызды бөлігі, ол шығыс кернеуі мен токтың тұрақтылығын бақылауға арналған.

- ❖ *Қызметі:* Шығыс кернеуін немесе токты бақылап, қажетті тұрақты мәнді ұстап тұру.

- ❖ *Принципі:* Бұл жүйе қорек көзінің жұмысына үнемі мониторинг жүргізіп, кернеу немесе ток шектеулерінен асып кетпеуін қамтамасыз етеді. Егер жүйеде қандай да бір ақау немесе өзгеріс болса, бақылау жүйесі оны түзету үшін сигнал жібереді.

- ❖ *Технология:* Әдетте, бұл үшін жоғары дәлдікті схемалар қолданылады, мысалы, интегралды схемалар мен цифрлық сигналдарды өңдеу элементтері. Олар жүйенің параметрлерін үнемі салыстырып, қорек көзінің тұрақты жұмысын қамтамасыз етеді.

2.5 Қорғаныс схемалары

Импульстік қорек көздерінде түрлі қорғаныс схемалары болуы мүмкін, бұл олардың жұмысын қауіпсіз етеді және құрылғыларды зақымданудан сақтайды.

- ❖ *Қысқа тұйықталудан қорғау (Short-Circuit Protection):* Қорек көзі қысқа тұйықталу жағдайында автоматты түрде тоқтап қалады, бұл оның ішкі компоненттерінің зақымдануын болдырмайды.

- ❖ *Артық кернеуден қорғау (Over-Voltage Protection):* Егер шығыс кернеуі белгіленген шектеуден асып кетсе, қорек көзі автоматты түрде кернеуді төмендетуге немесе тоқтатуға әрекет етеді.

- ❖ *Артық токтан қорғау (Over-Current Protection):* Қорек көзі артық ток ағыны болған жағдайда токты шектеу арқылы қорғанысты қамтамасыз етеді.

- ❖ *Температурадан қорғау (Over-Temperature Protection):* Қорек көзінің температурасы белгіленген мәннен асып кеткенде, жүйе автоматты түрде жұмысын тоқтатады немесе салқындату режиміне көшеді.

Бұл қорғаныс схемалары құрылғының қауіпсіз жұмысын қамтамасыз етіп, ұзақ қызмет ету мерзімін арттырады.

3. Импульстік қорек көздерінің артықшылықтары

Импульстік қорек көздері (ИКК) дәстүрлі сызықтық қорек көздерімен салыстырғанда көптеген техникалық және эксплуатациялық артықшылықтарға ие. Бұл артықшылықтар оларды заманауи электроникада, өнеркәсіпте және телекоммуникацияда кеңінен қолдануға мүмкіндік береді.

Төменде импульстік қорек көздерінің негізгі артықшылықтары техникалық тұрғыдан егжей-тегжейлі қарастырылады.

3.1 Жоғары тиімділік (Efficiency)

Импульстік қорек көздерінің басты артықшылықтарының бірі — жоғары энергия тиімділігі.

❖ Тиімділік деңгейі: ИКҚ тиімділігі әдетте 80-95% аралығында болады. Бұл дегеніміз, кіріс қуатының 80-95%-ы пайдалы жұмысқа жұмсалады, тек 5-20% жылуға айналады.

❖ Себебі: Импульстік құрылғыларда қуат транзисторлары "қосулы" немесе "сөнулі" режимде жұмыс істейді, яғни оларда қуат жоғалту аз болады. Классикалық сызықтық қорек көздері керісінше, артық қуатты жылу түрінде ысырап етеді.

❖ Нәтиже: Бұл электр қуаты аз жұмсалатын, аз жылу шығаратын және аз салқындатуды қажет ететін жүйелер жасауға мүмкіндік береді.

3.2 Жеңіл және ықшам құрылым (Size and Weight)

Импульстік қорек көздері физикалық тұрғыдан жеңіл және ықшам болып келеді.

❖ Себебі: Жоғары жиілікте жұмыс істейтіндіктен, трансформаторлар мен индуктивті элементтер аз көлемде жасалуы мүмкін. Жоғары жиілікті токтар үшін қажетті магниттік материалдар мен конденсаторлар да шағын болады.

❖ Нәтиже: Бұл қасиет оларды портативті құрылғыларда, ұялы телефондарда, ноутбуктерде және медициналық жабдықтарда пайдалануға өте тиімді етеді.

3.3 Жоғары жиілікте жұмыс істеу мүмкіндігі

Импульстік қорек көздері 10 кГц-тен 1 МГц және одан да жоғары жиіліктерде жұмыс істей алады.

❖ Пайдасы: Жоғары жиілік қуатты түрлендіру құрылғыларының реакциясын тездетеді, шығыс параметрлерін дәл бақылауға мүмкіндік береді.

❖ Артықшылықтары:

- Трансформаторлар мен дроссельдердің өлшемі азаяды.
- Қуат тығыздығы жоғарылайды.
- Қорек көзі жылдам реакция береді, бұл кернеудің ауытқуына төзімділікті арттырады.

3.4 Шығыс кернеу мен токтың тұрақтылығы (Voltage/Current Regulation)

ИКҚ кері байланыс жүйелерінің көмегімен шығыс кернеуін және токты нақты тұрақты деңгейде ұстап тұруға қабілетті.

❖ Қызметі: Жүйе шығыс кернеуінің немесе токтың нақты мәнін бақылап, өзгерістерге жылдам әрекет етеді.

❖ Қолдану: Бұл қасиет аса маңызды:

- микропроцессорлық құрылғыларда;
- сезімтал датчиктерде;
- телекоммуникация және медициналық құрылғыларда.

3.5 Қоршаған ортаға әсерінің төмендігі

Импульстік қорек көздері экологиялық қауіпсіз болып саналады.

❖ Себептері:

- Классикалық трансформаторлы құрылғыларда жиі қолданылатын майлы оқшаулағыштар мен салқындатқыштар қажет емес.
- Импульстік қорек көздері энергияны үнемді қолданатындықтан, олар жылу аз бөледі, демек, ауаның жылулық ластануын төмендетеді.
- Құрылғыларда зиянды химиялық заттар аз немесе мүлде жоқ.

3.6 Ұзақ қызмет ету мерзімі (Long Service Life)

Импульстік қорек көздері құрамындағы электрондық компоненттердің арқасында жоғары сенімділікке және ұзақ өмір сүру мерзіміне ие.

❖ Себептері:

- Компоненттердегі жылу аз болғандықтан, олардың тозуы баяу жүреді.
- Жұмыс режимдері оңтайландырылған және күшейткіш элементтер жоғары сапалы материалдардан жасалған.
- Жүйе өзін-өзі диагностикалау және автоматты қорғау функцияларымен жабдықталуы мүмкін.

3.7 Құрылғыны қорғау мүмкіндіктері (Built-in Protection Features)

Көптеген заманауи ИКҚ интегралды қорғаныс схемаларымен жабдықталады, бұл құрылғының сенімділігі мен қауіпсіздігін арттырады.

❖ Қорғаныс түрлері:

- Қысқа тұйықталудан қорғау (Short-circuit protection)
- Артық кернеуден қорғау (Overvoltage protection)
- Артық токтан қорғау (Overcurrent protection)
- Температурадан қорғау (Thermal protection)

❖ Механизм: Қауіпті жағдай анықталған кезде, ИКҚ автоматты түрде тоқтап, ішкі компоненттерді және жүктеме құрылғыны зақымданудан қорғайды.

4. Импульстік қорек көздерінің қолданылу салалары

Импульстік қорек көздері (ИКҚ) өзінің жоғары тиімділігі, шағын өлшемі, тұрақты шығыс параметрлері мен сенімділігі арқасында қазіргі заманғы көптеген салаларда кеңінен қолданылады. Олар энергияны тұрақты, дәл және қауіпсіз түрде жеткізу қажет барлық жерлерде таптырмас шешім болып табылады. Төменде әртүрлі қолдану салаларына нақты сипаттама берілген.

4.1 Электронды құрылғылар мен тұрмыстық техника

Бүгінгі күннің барлық дерлік электронды құрылғылары импульстік қорек көздеріне негізделген.

❖ Компьютерлер мен ноутбуктер:

- Аналық плата, процессор, қатты диск, графикалық карта сияқты компоненттер әртүрлі кернеу деңгейінде жұмыс істейді.

- Жоғары қуатты импульстік қорек көздері бірнеше шығыс арналарын (мысалы, +3.3V, +5V, +12V) қамтамасыз етіп, әрбір құрылғыны өз кернеуімен қоректендіреді.

- АТХ форматы негізіндегі импульстік блоктар ең кең таралған.

- ❖ Ұялы телефондар мен планшеттер:

- Миниатюралық импульстік стабилизаторлар литий-ионды аккумулятордан келетін айнымалы кернеуді тұрақты 3.3V немесе 5V-қа дейін реттейді.

- Зарядтағыш құрылғылар да импульстік принциппен жұмыс істейді.

- ❖ Теледидарлар, аудиожүйелер, ойын құрылғылары:

- Бұл құрылғылардың ішкі схемалары әртүрлі кернеу мен тоқты қажет етеді, сондықтан оларға импульстік қорек көздері орнатылады.

- Мысалы, LED теледидарлар жарықтандыру жүйесіне жоғары тоқты тұрақты түрде жеткізу үшін импульстік драйверлерді пайдаланады.

- ❖ Тұрмыстық техника:

- Микротолқынды пештер, кір жуғыш машиналар, тоңазытқыштар және кондиционерлердегі электрондық басқару блоктары дәл кернеуді талап етеді.

- Импульстік қорек көздері электр желісіндегі ауытқулардан қорғай отырып, тұрақты жұмыс режимін қамтамасыз етеді.

4.2 Авионика және ғарыш саласы

Авионикада (ұшақ электроникасы) және ғарыштық техникада сенімділік пен тиімділік аса маңызды. Импульстік қорек көздері бұл талаптарға толықтай сай келеді.

- ❖ Ұшақтар:

- Ұшақ ішіндегі байланыс, навигация, индикация және бақылау жүйелері әртүрлі кернеуде жұмыс істейді.

- Импульстік қорек көздері жүктемелер мен температураға тұрақты жұмыс істеуімен ерекшеленеді.

- Олардың жеңілдігі ұшақтың жалпы салмағын азайтып, отын тиімділігін арттырады.

- ❖ Ғарыш аппараттары:

- Спутниктер, зондтар мен ғарыш станцияларында импульстік қорек көздері күн батареяларынан алынған энергияны тиімді түрлендіреді.

- Радиожүйелер мен ғылыми құралдардың жұмысын қамтамасыз етеді.

- Космостағы радиацияға төзімді арнайы компоненттер қолданылады.

4.3 Медициналық жабдықтар

Медициналық техника жоғары дәлдік пен сенімділікті талап етеді, себебі пациенттің қауіпсіздігіне тікелей әсер етеді.

- ❖ Қан айналымын бақылау құрылғылары, дефибрилляторлар, томографтар, рентген жабдықтары:

- Бұл құрылғыларда электр энергиясының үзіліссіз және тұрақты берілуі өте маңызды.

- Импульстік қорек көздері шығыс кернеуінің дәлдігін және төмен пульсация деңгейін қамтамасыз етеді.

- ❖ Тасымалданатын медициналық құрылғылар:

- Мысалы, электрокардиографтар, ультрадыбыстық сканерлер және пациентті бақылау құрылғылары шағын, жеңіл, батареядан қоректенетін ИКҚ қолданады.

- Мұндай құрылғылар ауруханадан тыс жағдайларда қолдануға ыңғайлы.

4.4 Өнеркәсіп және автоматтандыру

Өнеркәсіптік ортада импульстік қорек көздері әртүрлі өндірістік процестерді автоматтандыруда маңызды рөл атқарады.

- ❖ PLC контроллерлері, датчиктер және жетектер:

- Бұл құрылғылар тұрақты токпен қоректенеді, сондықтан орталық басқару шкафтарында импульстік қорек көздері орнатылады.

- ❖ Жабдықтар мен станоктар:

- Заманауи ЧПУ-станоктар, лазерлік құрылғылар, 3D-принтерлер және өндірістік роботтарда дәл қорек көзі қажет.

- ❖ Қауіпсіздік және сенімділік:

- Артық кернеу мен токқа қарсы қорғаныс жүйелері өндірістік процестің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

- Кейбір ИКҚ DIN-рейкаға орнатылады және кең температура диапазонында жұмыс істеуге бейімделген.

4.5 Байланыс және телекоммуникация саласы

Байланыс желілері мен серверлік жабдықтарда ИКҚ ұзақ уақыт үздіксіз жұмыс істей алуы қажет.

- ❖ Мәліметтер серверлері, маршрутизаторлар, базалық станциялар:

- Бұл құрылғылардың қуат тұтынуы жоғары болғандықтан, оларда көп арналы, қуатты импульстік қорек көздері пайдаланылады.

- ❖ UPS (үздіксіз қорек көзі) жүйелері:

- Электр желісінің үзілуіне қарсы қорғаныс ретінде ИКҚ-мен жабдықталған резервтік жүйелер кең қолданылады.

- Шығыс кернеуінің синусоидалық немесе түзетілген формасы мен батареяны тиімді зарядтау мүмкіндігі қамтамасыз етіледі.

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

1. Импульстік қорек көзі дегеніміз не және оның негізгі мақсаты қандай?
2. Импульстік және сызықтық қорек көздерінің айырмашылықтарын атаңыз.
3. ИКҚ-ның негізгі құрылымдық бөліктері қандай және олардың әрқайсысы қандай қызмет атқарады?
4. Түзеткіш пен фильтрдің жұмыс принципін сипаттаңыз.
5. Buck, Boost және Buck-Boost түрлендіргіштері арасындағы айырмашылық неде?
6. Кері байланыс жүйесі не үшін қажет және оның рөлі қандай?

7. Импульстік қорек көздерінің тиімділігі неге жоғары?
8. ИКҚ-да қандай қорғаныс түрлері қолданылады және олардың маңызы неде?
9. Импульстік қорек көздерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстырыңыз.
10. Импульстік қорек көздері қай салаларда қолданылады және неге олар сол салалар үшін тиімді шешім болып табылады?

Қорытынды:

Импульстік қорек көздері — қазіргі заманғы электроника мен энергетика саласының маңызды құрамдас бөлігі. Олардың жоғары тиімділігі, ықшамдылығы, сенімділігі және икемділігі бұл құрылғыларды түрлі салаларда кеңінен қолдануға мүмкіндік береді — тұрмыстық техникадан бастап, авиация мен ғарыштық жүйелерге дейін. Импульстік технологияның көмегімен энергия үнемделіп қана қоймай, құрылғылардың жұмысы анағұрлым тұрақты әрі қауіпсіз болады.

Әдебиеттер тізімі:

1. Кратов А. А. Импульсные источники питания: Теория, схемотехника, проектирование. — М.: ДМК Пресс, 2016.
2. Ермаков С. С., Михайлов Г. И. Импульсные стабилизаторы напряжения и тока. — М.: Энергоатомиздат, 2010.
3. Rashid M. H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. — Pearson, 2017.
4. Pressman A., Billings K., Morey T. Switching Power Supply Design. — McGraw-Hill Education, 2009.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 2018.
6. Недосекин А. О. Электропитание радиоэлектронной аппаратуры. — М.: Радио и связь, 2002.
7. Kazimierczuk M. K. Pulse-Width Modulated DC–DC Power Converters. — Wiley, 2015.
8. Huijsing J. H. Operational Amplifiers: Theory and Design. — Springer, 2011.
9. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. — Wiley, 2003.