

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

12 Дәріс

Тақырыбы: Түрлендіргіштерді модельдеу. MATLAB және PSpice бағдарламаларын пайдалану

Дәрістің мақсаты мен міндеттері:

Дәрістің мақсаты: Түрлендіргіштерді модельдеудің негіздерін, MATLAB/Simulink және PSpice бағдарламаларын пайдалану арқылы олардың жұмысын зерттеу және тиімді жобалау дағдыларын қалыптастыру.

Міндеттері:

1. Электрлік және электрондық түрлендіргіштердің негізгі ұғымдарын түсіндіру;
2. Түрлендіргіштерді модельдеудің маңыздылығын және мақсаттарын ашып көрсету;
3. MATLAB/Simulink және PSpice бағдарламаларының ерекшеліктерін, қолдану салаларын түсіндіру;
4. Түрлендіргіштерді модельдеу кезінде орындалатын негізгі қадамдарды көрсету;
5. Түрлендіргіштердің жұмыс режимдерін талдау және басқару алгоритмдерін зерттеу әдістерін үйрету;
6. Модельдеу нәтижелері бойынша түрлендіргіштердің тиімділігі мен тұрақтылығын бағалауды үйрету.

Түйінді ұғымдар мен терминдер

- Электрлік түрлендіргіш (converter) — электр энергиясын бір параметрден (кернеу, ток, жиілік) екіншісіне түрлендіретін құрылғы.
- Модельдеу (simulation) — жүйенің мінез-құлқын математикалық немесе бағдарламалық модель арқылы зерттеу процесі.
- MATLAB/Simulink — математикалық есептеулер мен визуалды модельдеуге арналған интеграцияланған бағдарлама.
- Simscape Electrical — электрлік және қуаттық жүйелерді модельдеуге арналған Simulink кітапханасы.
- PSpice — аналогтық және цифрлық электрондық схемаларды модельдеуге арналған кәсіби бағдарлама.
- PWM (Pulse Width Modulation) — импульстің енімен басқару әдісі, түрлендіргіштерде жиі қолданылады.
- КПД (пайдалы әсер коэффициенті) — құрылғының энергия тиімділігін сипаттайтын шамамен көрсеткіш.
- Өтпелі процесс (transient process) — жүйенің тұрақты күйге өтпелі уақытындағы динамикалық өзгерістер.
- Монте-Карло талдауы — элемент параметрлерінің шашырауы кезінде жүйенің сенімділігін бағалау әдісі.

Дәріс жоспары

Кіріспе

1. Түрлендіргіштерді модельдеу қажеттілігі
2. MATLAB/Simulink бағдарламасын пайдалану
3. PSpice бағдарламасын пайдалану

Білімді бекітуге арналған сұрақтар

Қорытынды

Әдебиеттер тізімі

Кіріспе

Электрлік және электрондық түрлендіргіштер – энергияны бір түрден екінші түрге өзгертетін құрылғылар (мысалы, кернеуді немесе тоқты өзгертетін, тұрақты тоқты айнымалы токқа түрлендіретін құрылғылар). Түрлендіргіштерді жобалау және зерттеу кезінде олардың жұмысын алдын ала модельдеу өте маңызды, өйткені бұл қателіктерді ертерек анықтап, өнімнің сенімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Модельдеу үшін жиі қолданылатын екі танымал бағдарламалық құрал бар:

- ❖ MATLAB/Simulink – математикалық модельдер құру, блок-схемалар арқылы күрделі жүйелерді модельдеу үшін қолданылады.

- ❖ PSpice – аналогтық және цифрлық электрондық схемаларды дәлдікпен модельдеу үшін арналған.

1. Түрлендіргіштерді модельдеу қажеттілігі

Түрлендіргіштер – әртүрлі электрлік энергия түрлерін түрлендіретін құрылғылар, сондықтан олардың дұрыс жұмыс істеуі жүйенің жалпы сенімділігіне, қауіпсіздігіне және тиімділігіне тікелей әсер етеді. Сондықтан жобалау және зерттеу кезеңінде түрлендіргіштерді модельдеу міндетті процесс болып табылады. Модельдеу келесі маңызды мақсаттарға қол жеткізуге мүмкіндік береді:

2.1 Электрлік сипаттамаларды зерттеу

Түрлендіргіштің жұмыс істеуі кезінде оның негізгі электрлік сипаттамаларының қалай өзгеретінін алдын ала білу өте маңызды:

- ❖ Кернеу деңгейлері — кіріс және шығыс кернеулердің уақыт бойынша өзгеруі, ауытқуы, риппл деңгейлері зерттеледі.

- ❖ Ток сипаттамалары — түрлендіргіштен өтетін токтың мәндері, пульсациясы, шектік ток мәндері бағаланады.

- ❖ Қуат ағымдары — түрлендіргіш арқылы өтетін қуат, пайдалы қуат пен шығын қуаттың арақатынасы анықталады.

Мұндай зерттеулер түрлендіргіштің дұрыс таңдалғанын немесе оның параметрлерін оңтайландыру қажеттілігін көрсетеді.

2.2 Жұмыс режимдерін талдау

Түрлендіргіштер әртүрлі жұмыс жағдайларында түрліше әрекет етеді. Сондықтан модельдеу келесі режимдерді зерттеуге мүмкіндік береді:

- ❖ Қалыпты жұмыс режимі — түрлендіргіштің стандартты жағдайларда (номиналды кернеу, ток, температура) қалай жұмыс істейтінін тексеру.

- ❖ Ауырлатылған жұмыс режимдері — жүктеменің кенет өзгеруі, кіріс кернеудің ауытқуы, температураның көтерілуі сияқты жағдайларда жүйенің тұрақтылығын бағалау.

- ❖ Авариялық режимдер — қысқа тұйықталу, шамадан тыс жүктеме, элементтердің істен шығуы сияқты төтенше жағдайларда түрлендіргіштің өзін қалай ұстайтынын зерттеу.

Бұл талдаулар арқылы алдын ала қорғау механизмдерін енгізу (мысалы, ток шектеу, қызып кетуден қорғау) мүмкін болады.

2.3 Жобаланған схеманың тиімділігін, шығындарын және тұрақтылығын бағалау

Модельдеу нәтижесінде түрлендіргіш схемасының қаншалықты тиімді екенін сандық тұрғыда бағалауға болады:

- ❖ Пайдалы әсер коэффициенті (КПД) — кіріс қуат пен шығыс қуат арасындағы айырмашылық анықталады.
- ❖ Энергетикалық шығындар — элементтердегі (мысалы, MOSFET, диод) қуат шығындары талданады.
- ❖ Жылулық әсерлер — элементтердің қызуы, салқындату қажеттілігі есептеледі.
- ❖ Тұрақтылық — әртүрлі сыртқы әсерлерге (кернеу тербелісі, жүктеме өзгерісі) жүйенің тұрақты түрде жауап беру қабілеті зерттеледі.

Мұндай бағалау жобалау барысында түрлендіргіштің құрылымын жақсартуға және өндіріс шығындарын азайтуға көмектеседі.

2.4 Әртүрлі басқару алгоритмдерінің әсерін тексеру

Басқару алгоритмдері (мысалы, PWM модуляциясы, ток немесе кернеу бойынша бақылау, адаптивті басқару әдістері) түрлендіргіштің жұмысында үлкен рөл атқарады. Модельдеу арқылы:

- ❖ Басқару сигналдарының түрлендіргіш динамикасына әсері талданады.
- ❖ Жүйенің жауап беру уақыты, тұрақтану уақыты, артық өтулер деңгейі өлшенеді.
- ❖ Әртүрлі алгоритмдердің салыстырмалы тиімділігі (мысалы, тұрақты PWM vs. адаптивті PWM) бағаланады.
- ❖ Ауытқулар мен шуыларға тұрақтылық тексеріледі.

Бұл бақылаулар басқару жүйесін дұрыс таңдауға немесе жетілдіруге мүмкіндік береді, осылайша бүкіл түрлендіргіштің жұмыс сенімділігін арттырады

2. MATLAB/Simulink бағдарламасын пайдалану

3.1 MATLAB/Simulink туралы қысқаша

MATLAB (Matrix Laboratory) — бұл математикаға негізделген, ғылыми есептеулер, деректерді талдау, визуализация және инженерлік модельдеу үшін қолданылатын жоғары деңгейлі бағдарламалау тілі және интерактивті платформа. MATLAB әсіресе:

- ❖ Сандық есептеулерді орындау,
- ❖ Алгоритмдерді әзірлеу,
- ❖ Модельдеу және симуляция жасау,
- ❖ Басқару жүйелерін талдау және оңтайландыру сияқты міндеттер үшін кеңінен қолданылады.

Simulink — бұл MATLAB-тың құрамдас бөлігі болып табылатын визуалды модельдеу және симуляция ортасы. Simulink қолданушылары:

- ❖ Блок-схема негізінде жүйелерді жобалай алады,
- ❖ Механикалық, электрлік, гидравликалық, жылу және басқа да жүйелердің динамикасын модельдей алады,

❖ Нақты уақыттағы жүйелерді құруға және оларды басқару жүйелерімен біріктіруге мүмкіндік алады.

Simulink ортасы арқылы түрлендіргіштерді модельдеу процесі өте табиғи әрі бейнелі түрде жүзеге асады. Мұнда әрбір физикалық элемент немесе басқару алгоритмі арнайы дайындалған блок түрінде ұсынылады.

Электрлік түрлендіргіштерді модельдеу үшін Simulink-та мынадай мүмкіндіктер қарастырылған:

❖ Элементтерді блоктар арқылы қосу: индуктивтік, конденсаторлар, диодтар, MOSFET, IGBT және басқа да электронды компоненттер "Simscape Electrical" немесе "Specialized Power Systems" кітапханасынан алынады.

❖ Басқару жүйелерін модельдеу: PWM (широтно-импульсті модуляция), кері байланыс жүйелері, PID-бақылау және басқа да күрделі басқару алгоритмдері оңай жүзеге асырылады.

❖ Интерактивті бақылау: кернеу, ток, қуат сияқты сигналдарды нақты уақыт режимінде "Scope", "Display" немесе "Data Logging" құралдары арқылы қадағалауға болады.

3.2 Түрлендіргіштерді модельдеу мысалдары

Мысал: Buck түрлендіргішінің модельін құру

Buck түрлендіргіші (төмендеткіш түрлендіргіш) — тұрақты ток көзінің кернеуін қажетті деңгейге дейін төмендетуге арналған қарапайым және жиі қолданылатын түрлендіргіштердің бірі.

Модельді құру қадамдары:

1) Кіріс көзі:

❖ "Simscape > Electrical > Specialized Power Systems > Sources" кітапханасынан "DC Voltage Source" блогын таңдаймыз.

❖ Бұл блог арқылы тұрақты кіріс кернеуін береміз (мысалы, 24V).

2) Коммутациялық элемент (MOSFET транзисторы):

❖ "Power Electronics" кітапханасынан "MOSFET" блогын аламыз.

❖ Бұл элемент арқылы кернеуді коммутируеміз.

3) LC-фильтр (индуктивтік және конденсатор):

❖ "Simscape > Electrical > Elements" кітапханасынан "Inductor" және "Capacitor" блоктарын таңдап қосамыз.

❖ LC-фильтр шығыс кернеудегі пульсацияларды азайту үшін қолданылады.

4) Жүктеме (тұрақты резистор):

❖ "Resistor" блогын қосамыз.

❖ Жүктемені нақты көрсету үшін мысалы, 10 Ом резистор қолдануға болады.

5) Басқару сигналы (PWM сигналын генерациялау):

❖ "Simulink > Sources" ішінен "Pulse Generator" блогын пайдаланамыз.

❖ Бұл генератор арқылы MOSFET-ке PWM басқару сигналы беріледі.

6) Бақылау және талдау:

❖ "Simulink > Sinks" ішінен "Scope" блогын қосамыз.

❖ Scope арқылы кіріс және шығыс кернеулерді, токтарды уақыт бойынша қадағалай аламыз.

7) Simulink-та элементтерді біріктіру:

- ❖ Барлық блоктарды қосып, байланыс сызықтарымен біріктіреміз.
- ❖ Симуляция параметрлерін (уақыт қадамы, жалпы симуляция уақыты) орнатып, модельді іске қосамыз.

3.3 MATLAB/Simulink артықшылықтары

MATLAB/Simulink бағдарламаларын қолданудың негізгі артықшылықтары:

- ❖ Интуитивті графикалық орта:
 - Пайдаланушы блоктарды графикалық түрде таңдап, оларды сызықтармен байланыстырып, күрделі схемаларды оңай құра алады.
 - Күрделі математикалық теңдеулерді жазбай-ақ жүйені визуалды түрде жинау мүмкіндігі бар.
- ❖ Кең кітапхана:
 - Simscape Electrical — нақты физикалық жүйелерге жақын компоненттер жинағы.
 - Specialized Power Systems — қуатты энергетикалық жүйелер мен түрлендіргіштер үшін арнайы дайындалған модельдер мен блоктар.
 - Сонымен қатар, жылу, механикалық, гидравликалық жүйелерді қоса отырып мультифизикалық модельдеу мүмкіндігі бар.
- ❖ Басқару жүйелерімен толық интеграция:
 - Түрлендіргіштерді басқару үшін PID-регуляторлар, бұлтартпас басқару (Feedforward), Фазалық Құрылғылар (PLL), Фазалық Модуляция сияқты күрделі басқару алгоритмдерін енгізу және тексеру өте жеңіл.
 - Жасанды интеллект элементтерін (нейрондық желілер, фази-логика) басқару жүйелеріне қосуға болады.
- ❖ Модельдерді жылдам түрлендіру және код генерациялау:
 - Simulink-та жасалған модельден тікелей C кодын, HDL кодын (FPGA үшін) немесе тіпті нақты уақыттағы кодтарды автоматты түрде генерациялауға болады.
 - Бұл прототип жасау уақытын айтарлықтай қысқартады және өндірістік жобаларда қолданылады.
- ❖ Параметрлік талдау және автоматты оңтайландыру:
 - MATLAB скрипттері арқылы модель параметрлерін өзгертіп, бірнеше сценарийлерді автоматты түрде тексеруге болады.
 - Бұл тәсіл жүйенің ең тиімді жұмыс режимдерін табуға көмектеседі.

3. PSpice бағдарламасын пайдалану

4.1 PSpice туралы қысқаша

PSpice — бұл (Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) электрондық схемаларды уақыттық (transient) және тұрақты күйдегі (steady-state) режимдерде модельдеуге арналған кәсіби бағдарламалық құрал. Ол ең алғаш 1980 жылдары дамытылып, қазіргі таңда Cadence Design Systems компаниясының құрамында жетілдірілуде.

PSpice негізінен:

- ❖ Аналогтық схемаларды,
- ❖ Цифрлық логикалық схемаларды,
- ❖ Немесе олардың аралас комбинациясын модельдеу үшін қолданылады.

PSpice-та жұмыс істеу ерекшеліктері:

❖ Схеманы нақты электрондық компоненттерден құрастыруға болады (транзисторлар, диодтар, резисторлар, индуктивтіктер, конденсаторлар және тағы басқалар).

❖ Әртүрлі өндірушілердің (TI, Infineon, Vishay, OnSemi және т.б.) нақты сипаттамалары бар компонент модельдері пайдаланылады.

❖ Модельдеу нәтижесінде токтар, кернеулер, қуат шығындары, температуралар және басқа да сипаттамалар графиктер немесе толқын формалары ретінде беріледі.

PSpice мүмкіндіктері:

- ❖ Тұрақты ток (DC) талдауы,
- ❖ Уақыттық (transient) талдау,
- ❖ Жиіліктік (AC sweep) талдау,
- ❖ Параметрлік сканерлеу,
- ❖ Монте-Карло симуляциясы,
- ❖ Өтпелі және квазистатикалық процестерді дәл талдау.

Бұл құрал түрлендіргіштерді зерттеу кезінде олардың динамикалық мінез-құлқын, коммутациялық процестерді және энергия шығынын өте дәл көрсетуге мүмкіндік береді.

4.2 Түрлендіргіштерді модельдеу мысалдары

Мысал: Buck түрлендіргішінің модельдеу қадамдары

Buck түрлендіргішін PSpice-та модельдеу кезеңдері төмендегідей жүзеге асырылады:

1) DC кернеу көзін орнату:

- ❖ Кіріс көзін "VDC" элементі арқылы орнатамыз.
- ❖ Мысалы, 24V тұрақты кернеу беріледі.

2) MOSFET моделін қосу:

❖ Нақты MOSFET моделін өндірушілердің кітапханасынан тандаймыз (мысалы, IFR540N немесе CSD18502Q5B).

❖ MOSFET моделі оның нақты сипаттамаларына сәйкес болады: қақпа-сорғы (gate-drain) зарядтары, қақпа-сорғы уақыттық кешігулері, өткізгіштік кедергілері және т.б.

3) Индуктивтілік пен конденсаторды қосу:

❖ Индуктивтікті (L элементі) және конденсаторды (C элементі) схемаға орнатып, олардың нақты мәндерін береміз.

❖ Мысалы, $L = 100 \mu\text{H}$, $C = 470 \mu\text{F}$.

4) PWM сигналын сыртқы басқарушы көз арқылы беру:

❖ PWM сигналын "VPULSE" көзімен немесе арнайы генератор блогымен береміз.

❖ PWM сигнал параметрлері: жиілігі (мысалы, 50 кГц), импульс ені (duty cycle) және өшу/жану уақыттары көрсетіледі.

5) Өлшеу үшін ток және кернеу зондтарын орналастыру:
❖ "Current Probe" арқылы MOSFET немесе жүктеме токтарын өлшейміз.
❖ "Voltage Probe" көмегімен кіріс және шығыс кернеулерді бақылаймыз.
❖ Барлық өлшенген сигналдар симуляция нәтижесінде график түрінде көрсетіледі.

6) Симуляция параметрлерін орнату:
❖ "Transient Analysis" түрін тандап, симуляция уақытын орнатамыз (мысалы, 5 мс уақыт аралығы).

7) Нәтижені талдау:
❖ Алынған графиктер арқылы Buck түрлендіргішінің шығыс кернеуінің тұрақты күйге өту уақытын, токтағы өтпелі процестерді, коммутациялық шығындарды бағалаймыз.

4.3 PSpice артықшылықтары

PSpice бағдарламасын қолданудың негізгі артықшылықтары:

❖ Нақты компонент модельдері:
• Коммерциялық өндірушілердің (TI, STMicroelectronics, Vishay, ON Semiconductor, Infineon) кітапханаларынан алынған дәл компонент модельдерін пайдалана отырып, өте шынайы нәтижелер алуға болады.

• Әрбір компоненттің өткізгіштік қасиеттері, динамикалық кешігулері, қуат шығындары ескерілген.

❖ Аналогтық және цифрлық жүйелердің толық моделін жасау мүмкіндігі:

• PSpice-та тек таза аналогтық түрлендіргіштерді ғана емес, цифрлық басқару блоктарын (логикалық элементтер, триггерлер, санағыштар) да қосып, күрделі гибридік жүйелерді модельдеуге болады.

❖ Өтпелі процестер мен уақыттық кешігулерді дәл көрсету:

• Коммутациялық процестердің нақты уақыттық мінез-құлқын (MOSFET-тің қосылу және ажыратылу динамикасы, диодтың қалпына келу уақыты) зерттеуге мүмкіндік береді.

• Бұл түрлендіргіштердің энергия тиімділігін және ЭМС (электромагниттік сәйкестік) талаптарына сәйкестігін талдау үшін өте маңызды.

❖ Толық схемалық симуляция (жоғары дәлдікпен):

• Схеманың әрбір элементі ток, кернеу, қуат тұрғысынан толық зерттеледі.

• Шығыс кернеудегі рипплдарды (пульсацияларды), токтың өтпелі процестерін, қызып кету әсерлерін модельдеу мүмкіндігі бар.

❖ Қосымша мүмкіндіктер:

• Параметрлік sweep (белгілі бір элементтің мәнін өзгерте отырып көп сценарийлі симуляция),

• Монте-Карло талдау (элементтердің шашырауы есебімен сенімділік тексеру),

• Температуралық модельдеу (компоненттердің температура өзгерген кездегі мінез-құлқын бағалау).

Білімді бекіту сұрақтары

1. Электрлік және электрондық түрлендіргіштердің негізгі міндеті қандай?
2. Түрлендіргіштерді модельдеу не үшін қажет?
3. MATLAB/Simulink пен PSpice бағдарламаларының негізгі айырмашылықтары қандай?
4. Buck түрлендіргіші дегеніміз не және оның жұмыс принципі қандай?
5. Түрлендіргішті MATLAB/Simulink-та модельдеу үшін қандай негізгі блоктар пайдаланылады?
6. PSpice-та түрлендіргішті модельдеу кезеңдері қалай жүзеге асырылады?
7. Түрлендіргіштің тиімділігін модельдеу нәтижесінде қалай бағалауға болады?
8. PWM сигналын модельдеудің маңызы неде?
9. Модельдеу арқылы авариялық және ауырлатылған жұмыс режимдерін қалай талдауға болады?
10. Түрлендіргіштерді жобалау процесінде модельдеу неге инженер үшін маңызды құрал болып саналады?

Қорытынды:

Түрлендіргіштерді модельдеу — олардың жұмысын терең түсініп, тиімді әрі сенімді схемаларды жобалау үшін қажетті қадам.

MATLAB/Simulink пен PSpice сияқты құралдар түрлендіргіштердің электрлік сипаттамаларын, өтпелі процестерін және басқару жүйелерінің жұмысын зерттеуге мүмкіндік береді.

Модельдеу жобалау сапасын арттырып, қателерді ерте анықтауға және құрылғыларды оңтайландыруға жол ашады.

Болашақта жаңа түрлендіргіштерді әзірлеуде модельдеу дағдылары инженердің негізгі кәсіби құралдарының бірі болмақ.

Әдебиеттер тізімі:

1. Ogata, K. Modern Control Engineering. — Prentice Hall, 2010.
2. Erickson, R. W., Maksimovic, D. Fundamentals of Power Electronics. — Springer, 2001.
3. Rashid, M. H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. — Pearson, 2013.
4. Kraus, J. D., Carver, K. R. Electromagnetics with Applications. — McGraw-Hill, 1999.
5. MATLAB Documentation: Simulink and Simscape Electrical User's Guide. — MathWorks, 2024.
6. PSpice User Guide. — Cadence Design Systems, 2023.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 2003.
8. Ключев В. В. Электронные преобразователи энергии: Учебник для вузов. — М.: Энергоатомиздат, 2002.
9. Болдовский В. Д., Степанов А. А. Основы моделирования силовых преобразователей. — М.: Солон-Пресс, 2008.