



СОДЕРЖАНИЕ

Список основных обозначений.....	13
Предисловие.....	14
Введение.....	17
В.1. Современное состояние и перспективы развития силовой электроники.....	17
В.2. Системы управления.....	22

ЧАСТЬ I. НЕКОТОРЫЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

ГЛАВА 1. ОДНОФАЗНЫЙ КОРРЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ (ККМ).....	26
1.1. Взаимодействие силового ключа и диода, быстродействие диода и его влияние на основные показатели устройства.....	27
1.1.1. Потери мощности в открытом ключе.....	28
1.1.2. Потери мощности в открытом диоде.....	29
1.1.3. Потери мощности при включении ключа.....	29
1.1.4. Потери мощности при выключении диода.....	30
1.2. Основы расчета дросселя ККМ.....	33
1.3. Особенности работы ККМ в широком диапазоне напряжения сети.....	38
ГЛАВА 2. ТРЕХФАЗНЫЕ КОРРЕКТОРЫ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ.....	41
2.1. Выпрямитель на основе трехфазного инвертора.....	42
2.2. Выпрямитель Виенна.....	43
ГЛАВА 3. МОСТОВЫЕ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ.....	47
3.1. Мостовой преобразователь с LC-фильтром.....	47
3.2. Мостовой преобразователь с удвоителем тока, несимметричный режим работы трансформатора.....	48
3.3. Двухтрансформаторный мостовой преобразователь.....	57
ГЛАВА 4. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ПОЛУМОСТОВЫЕ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....	64
4.1. Свойства несимметричных полумостовых преобразователей.....	64
4.2. Сравнение несимметричного полумостового преобразователя с другими схемотехническими решениями.....	68
4.3. Решения, улучшающие работу несимметричного полумостового преобразователя.....	71
4.4. Экспериментальные результаты.....	75





6 *Содержание*

ГЛАВА 5. DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ДРОССЕЛЕМ НА ВХОДЕ.....	77
5.1. Работа преобразователей без учета индуктивности рассеяния трансформатора.....	78
5.2. Работа преобразователей с дросселем на входе при учете индуктивности рассеяния трансформатора	80
5.3. Цепь клампа как средство обеспечения надежной работы преобразователя	81
5.4. Анализ работы преобразователя с цепью клампа.....	82
5.5. Пусковой режим	85
5.6. Преимущества DC-DC преобразователя с дросселем на входе по сравнению с другими решениями	88
5.7. Экспериментальные результаты	94
ГЛАВА 6. РЕЗОНАНСНЫЕ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ПОДКЛЮЧЕНИЕМ НАГРУЗКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО К РЕЗОНАНСНОМУ КОНТУРУ	98
6.1. Работа при низкой частоте переключения ($f_0 > f$)	98
6.2. Многорезонансный преобразователь	103
6.2.1. Работа при высокой частоте коммутации ($f_0 \leq f$)	104
6.2.2. LLC-преобразователь.....	107

ЧАСТЬ II. ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

ГЛАВА 7. НЕПРЕРЫВНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	113
7.1. Реакция динамической системы на входное воздействие	113
7.1.1. Импульсная функция, ее свойства	114
7.1.2. Связь непрерывного сигнала с δ -функцией.....	115
7.2. Преобразование Лапласа.....	116
7.2.1. Свойства преобразования Лапласа.....	118
7.2.2. Обратное преобразование Лапласа.....	121
7.2.3. Передаточная функция и частотная характеристика.....	125
7.3. Структурные схемы САУ	129
7.4. Временные параметры переходного процесса	134
7.5. Частотные методы оценки свойств звеньев и систем	141
7.5.1. Амплитудно-фазовые частотные характеристики	141
7.5.2. Графическое изображение амплитудно-фазовых частотных характеристик	143
7.5.3. Частотные критерии устойчивости	146
7.6. Устройства коррекции	156
7.6.1. Оценка переходного процесса по виду ЛАХ замкнутой системы.....	156
7.6.2. Инерционное пропорционально-дифференцирующее звено	158
7.6.3. Корректирующее звено с отставанием по фазе	161
7.6.4. Пропорционально-интегрирующее звено	163





7.7. Метод корневого годографа	164
7.7.1. Свойства корневого годографа	166
7.7.2. Влияние цепей коррекции на корневой годограф системы	169
7.8. Метод пространства состояний.....	171
7.8.1. Запись уравнений по методу пространства состояний.....	172
7.8.2. Уравнения состояния в стандартной форме.....	175
7.8.3. Уравнения состояния в управляющей канонической форме (control canonical form).....	179
7.8.4. Уравнения состояния в модальной форме	180
7.8.5. Управление на основе обратных связей от переменных состояния	187
ГЛАВА 8. ДИСКРЕТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	190
8.1. Блок-схемы непрерывной и дискретной систем управления	191
8.2. Разностные уравнения – основа описания дискретных систем.....	191
8.3. Дискретная свертка.....	194
8.4. Z-преобразование и обратное Z-преобразование	195
8.4.1. Свойства Z-преобразования	198
8.4.2. Обратное Z-преобразование	201
8.5. Передаточная функция дискретной системы и ее частотная характеристика	204
8.5.1. Частотная характеристика дискретной системы	206
8.6. Передаточная функция дискретной системы: аппроксимация в s-области	208
8.6.1. Аппроксимация на основе численного интегрирования методом трапеций	208
8.6.2. Аппроксимация методом подбора нулей и полюсов (matched pole-zero method).....	211
8.7. Анализ дискретной системы	212
8.7.1. Метод дискретных эквивалентов.....	213
8.7.2. Метод прямого (непосредственного) проектирования дискретной системы	216
8.8. Метод пространства состояний для дискретных систем.....	224
8.8.1. Определение переходной матрицы состояния.....	224
8.8.2. Управляемость дискретной системы	228
8.8.3. Задание полюсов в замкнутой дискретной системе.....	230
ГЛАВА 9. СИЛОВАЯ ЧАСТЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КАК ЗВЕНО СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	233
9.1. Непрерывные модели силовой части преобразователей	234
9.1.1. Линеаризация непрерывной модели силовой части преобразователя.....	235
9.2. Непрерывная линейная модель импульсного понижающего преобразователя напряжения	237
9.3. Непрерывная линейная модель повышающего импульсного регулятора напряжения	240





8 Содержание

9.4. Непрерывная линейная модель несимметричного полумостового преобразователя	242
9.5. Непрерывная линейная модель понижающего импульсного регулятора напряжения в режиме прерывистого тока дросселя.....	247
9.5.1. Получение непрерывной нелинейной модели.....	247
9.5.2. Линейная модель.....	251

ГЛАВА 10. НЕКОТОРЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСА МАТЛАВ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ.....

10.1. Пакет для проектирования систем управления (Control System Toolbox)	255
10.2. Пакет для обработки сигналов (Signal Processing Toolbox).....	256
10.3. Набор блоков и функций SymPowerSystems	257
10.4. Годограф Найквиста, логарифмические частотные и временные характеристики (непрерывные системы)	258
10.4.1. Построение годографа Найквиста.....	258
10.4.2. Логарифмические частотные характеристики.....	260
10.4.3. Временные характеристики	261
10.5. Метод корневого годографа (Root Locus), непрерывные системы.....	263
10.6. Представление моделей по методу пространства состояний.....	265
10.6.1. Преобразование из передаточной функции в модель пространства состояний и обратно	265
10.6.2. Получение матриц уравнений состояния в модальной форме.....	268
10.6.3. Применение формулы Акерманна	272
10.7. Дискретные системы	274
10.7.1. Преобразования непрерывной системы в дискретную и обратно	274
10.7.2. Частотные характеристики дискретных систем.....	278
10.7.3. Метод корневого годографа для дискретных систем.....	279
10.8. Замкнутый обратной связью преобразователь	282
10.8.1. Моделирование ИРН-1 на основе передаточной функции	282
10.8.2. Модель ИРН-1 на основе электрической схемы	283
10.8.3. Разомкнутая система управления	284
10.9. Моделирование ИРН-1 в режиме прерывистого тока	290

ЧАСТЬ III. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

ГЛАВА 11. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ	295
11.1. Аналоговое управление	298
11.2. Смешанная система управления.....	301
11.3. Полностью цифровая система управления	302
11.4. Дополнительные возможности систем управления преобразователями при использовании микроконтроллеров	304





ГЛАВА 12. МИКРОПРОЦЕССОРЫ И ПРОГРАММИРУЕМАЯ ЛОГИКА	305
12.1. Общие сведения о микропроцессорах и микроконтроллерах	305
12.2. Внутренняя структура построения микропроцессоров и микроконтроллеров	308
12.3. Аналого-цифровой преобразователь	311
12.3.1. Обзор основных типов	311
12.3.2. Параметры АЦП	315
12.4. Широтно-импульсный модулятор	319
12.5. Цифро-аналоговый преобразователь	319
12.5.1. Типы ЦАП	320
12.5.2. Характеристики ЦАП	320
12.5.3. Примеры применения ЦАП	321
12.6. Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС)	324
ГЛАВА 13. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРАХ TEXAS INSTRUMENTS TMS320F280x	328
13.1. Общая структура сигнальных процессоров TMS320F280x	328
13.2. Среда разработки программного обеспечения Code Composer Studio	330
13.3. Структура программного обеспечения при проектировании системы управления	338
13.4. Организация единичного прерывания, принцип единичного прерывания при построении цифровой системы управления	342
13.5. Аналого-цифровой преобразователь ЦСП серии TMS320F280x	346
13.6. ШИМ-контроллер ЦСП серии TMS320F280x	349
ГЛАВА 14. ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРОВ И ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ ЦИФРОВОМ УПРАВЛЕНИИ	362
14.1. Две разновидности цифровых фильтров	363
14.2. Расчет коэффициентов цифровых фильтров	364
14.3. Существенные особенности управления преобразователями при использовании цифровых фильтров	368
14.4. Квантование измеряемых сигналов на входах контроллера (шум АЦП)	369
14.4.1. Снижение шума выборкой с запасом по частоте	370
14.5. Квантование сигналов на выходе цифровой системы управления импульсным преобразователем (шум ШИМ)	371
14.6. Арифметика при обработке сигналов, квантование коэффициентов цифровых фильтров, ошибки квантования при использовании арифметики с фиксированной запятой	373
14.6.1. Арифметика при цифровой обработке сигналов	374
14.6.2. Квантование коэффициентов цифровых фильтров	378
14.6.3. Анализ точности в MATLAB с помощью блоков для моделирования систем ЦОС	382
14.7. Ошибки цифровых фильтров, вызванные округлением и переполнением	385



14.8. ПИД-регуляторы в системах управления преобразователями	386
14.8.1. Работа ПИД-регулятора с учетом насыщения	391

ЧАСТЬ IV. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛОГОВЫХ И СМЕШАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ГЛАВА 15. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СТАНДАРТНОГО КОНТРОЛЛЕРА	394
15.1. Исходные данные для проектирования	394
15.2. Параметры элементов силовой части	394
15.3. Подключение контроллера	395
15.4. Исходные данные для создания модели в MATLAB	397
15.5. Модель корректора коэффициента мощности в MATLAB.....	397
15.6. Корректирующие звенья по напряжению и току	400
15.7. Сравнение с экспериментальными результатами	402
ГЛАВА 16. УПРАВЛЕНИЕ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ.....	404
16.1. Принцип управления по максимальному току	404
16.2. Особенности управления по максимальному току несимметричного полумостового преобразователя	406
16.3. Основные требования, предъявляемые к преобразователю, результаты расчета и выбора компонентов.....	410
16.4. Модель несимметричного полумостового преобразователя и расчет цепей коррекции	411
16.5. Результаты моделирования преобразователя и эксперимента	418
ГЛАВА 17. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ТРАНЗИСТОРНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ С КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПРИ СМЕШАННОМ УПРАВЛЕНИИ.....	420
17.1. Защитные и сервисные функции выпрямителя	420
17.2. Слежение за сетью и управление максимальной мощностью	422
ГЛАВА 18. ЭЛЕКТРОННАЯ НЕРАСSEИВАЮЩАЯ НАГРУЗКА	
18.1. Структурные схемы построения ЭНН на основе статических преобразователей	423
18.2. Построение силовой части ЭНН	423
18.3. Управление нагрузкой	427
18.3.1. Режим запуска.....	429
18.3.2. Нормальный режим.....	430
18.4. Практическое выполнение ЭНН	431
ГЛАВА 19. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ ПОВЫШАЮЩЕМ МОСТОВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ – ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ЭЛЕКТРОННОЙ НЕРАСSEИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ	433



19.1. Исходные данные для проектирования, структура и параметры силовой части	433
19.2. Непрерывная линейная модель трансформаторного повышающего преобразователя	435
19.3. Разомкнутая модель управления	435
19.4. Замкнутая модель управления	442

ЧАСТЬ V. ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

ГЛАВА 20. ТРЕХФАЗНЫЙ ИНВЕРТОР	444
20.1. Формирование квазисинусоидального трехфазного напряжения (векторная широтно-импульсная модуляция)	444
20.2. Построение защиты по току на основе ПИД-регулятора	450
20.2.1. Модель трехфазного инвертора	452
20.2.2. ПИД-регулятор в системе управления	454
20.2.3. Замкнутая система управления ограничением тока инвертора	455
20.3. Управление трехфазным инвертором с использованием ЦСП	456
20.3.1. Программная реализация управления	456
20.3.2. Работа ШИМ, АЦП, прерывания	458
20.3.3. Описание макросов	467
20.4. Результаты испытаний инвертора	470
ГЛАВА 21. УПРАВЛЕНИЕ ОДНОФАЗНЫМ ИНВЕРТОРОМ	472
21.1. Построение силовой части и принципы управления ключами	472
21.2. Функции, выполняемые системой управления	473
21.3. Система управления однофазным инвертором на основе цифрового сигнального процессора	474
21.4. Параллельная работа инверторов	477
21.4.1. Использование связи по цепям управления	477
21.4.2. Независимое управление каждым инвертором	478
21.5. Моделирование – этап проектирования системы управления	481
21.6. Практическое выполнение инвертора	485
ГЛАВА 22. ПОВЫШАЮЩИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С РЕЗОНАНСНЫМ DC-DC КОНВЕРТОРОМ И ЗАРЯДНЫМ УСТРОЙСТВОМ	486
22.1. Построение отдельных узлов силовой части преобразователя	487
22.2. Управление зарядным устройством	489
22.3. Модель системы управления ЗУ в MATLAB	490
22.3.1. Модель системы управления ЗУ по напряжению	490
22.3.2. Модель системы управления ЗУ по току защиты	494
22.3.3. Дискретная модель системы управления ЗУ	495
22.4. Модель системы управления выходом 1	498
22.4.1. Модель системы стабилизации напряжения выхода 1	498
22.4.2. Модель системы ограничения тока выхода 1	503
22.4.3. Общая модель системы управления выходом 1	505
22.5. Экспериментальные результаты	507



ГЛАВА 23. ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ.....	509
23.1. Выбор структуры управления.....	510
23.2. Проектирование контуров цифрового управления ККМ с использованием MATLAB Simulink	513
23.2.1. Исходная модель силовой части ККМ.....	513
23.2.2. Дискретная линейная модель ККМ	515
23.2.3. Дискретная нелинейная модель ККМ	518
23.2.4. Синтез цифровой коррекции контура по выходному напряжению	523
23.2.5. Синтез цифровой коррекции контура по току дросселя	526
23.2.6. Окончательная модель ККМ и результаты моделирования	527
23.3. Вопросы применения ЦСП.....	530
23.4. Экспериментальные результаты разработки ККМ с цифровым сигнальным процессором.....	534
ГЛАВА 24. ЦИФРОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ DC-DC ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ	536
24.1. Силовая часть преобразователя	536
24.2. Особенности выбора общей структуры управления	539
24.3. Особенности широтно-импульсной модуляции при выбранном алгоритме цифрового управления	541
24.3.1. Непрерывная нелинейная модель НПП в MATLAB Simulink	542
24.3.2. Корректирующее звено в канале регулирования и стабилизации выходного напряжения	546
24.3.3. Коррекция в канале регулирования выходного тока.....	553
24.4. Программная реализация	555
24.5. Экспериментальные результаты	560
ГЛАВА 25. СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ЦИФРОВЫМ КОНТРОЛЛЕРОМ.....	567
ЛИТЕРАТУРА	570