

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра систем управления

А. Я. Родин

***УПРАВЛЯЕМЫЕ СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ***

Методическое пособие
для студентов специальности 1-53 01 07
«Информационные технологии и управление в технических системах»
заочной формы обучения

Минск БГУИР 2011

УДК [621.314.2 +621.313.13]:681.51(076)
ББК 31.264.5я73+31.261.2я73+32.965я73
Р60

Рецензент:
профессор кафедры радиотехнических устройств
учреждения образования «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники», кандидат технических наук,
доцент А. М. Бригидин

Родин, А. Я.
Р60 Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для
питания электродвигателей в системах управления : методическое посо-
бие для студ. спец. 1-53 01 07 «Информационные технологии и управле-
ние в технических системах» заоч. формы обуч. / А. Я. Родин. – Минск :
БГУИР, 2011. – 28 с.

ISBN 978-985-488-767-8.

В пособии представлена рабочая программа, методические указания и кон-
трольные вопросы по темам дисциплины «Управляемые силовые преобразователи
электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления»,
список рекомендованной литературы, приведена таблица вариантов контрольной
работы с индивидуальными заданиями для каждого студента-заочника.

УДК [621.314.2 +621.313.13]:681.51(076)
ББК 31.264.5я73+31.261.2я73+32.965я73

ISBN 978-985-488-767-8

© Родин А. Я., 2011
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2011

СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа дисциплины «Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления».....	4
1.1. Цели и задачи дисциплины, её место в учебном процессе.....	4
1.2. Содержание дисциплины	5
2. Учебно-методическая литература	8
3. Методические указания.....	9
Тема 1. Режимы работы и способы управления исполнительными двигателями систем управления	9
Тема 2. Структурные схемы преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей.....	10
Тема 3. Современная элементная база управляемых ключевых силовых преобразователей электрической энергии.....	12
Тема 4. Типовые схемы ключевых преобразователей электрической энергии на транзисторах	13
Тема 5. Типовые схемы ключевых преобразователей электрической энергии на тиристорах.....	15
Тема 6. Формирователи управляющих импульсов в схемах управления преобразователями	17
Тема 7. Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания тяговых электродвигателей транспортных средств.....	19
Тема 8. Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей грузоподъемных кранов	21
Тема 9. Силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей бортовых систем управления летательных аппаратов ...	23
Тема 10. Основные виды перегрузок преобразователей электрической энергии в схемах управления электродвигателями.....	25
Тема 11. Защитные цепи силовых ключей в схемах преобразователей электрической энергии	26
4. Контрольная работа	27

1. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «УПРАВЛЯЕМЫЕ СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ»

1.1. Цели и задачи дисциплины, её место в учебном процессе

Цель изучения дисциплины

Дисциплина «Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления» – одна из необходимых инженерных дисциплин в системе подготовки инженеров по информационным технологиям и управлению. Целью изучения дисциплины является сообщение студентам знаний о структуре, схемотехнике, характеристиках и перспективах развития управляемых силовых преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления, а также развитие у студентов навыков схемотехнического синтеза сложных устройств систем управления.

Задачи изучения дисциплины

Задачи изучения дисциплины состоят в подготовке специалистов в области информационных технологий и управления, имеющих достаточный объём знаний в теории электропривода и схемотехнике силовых преобразователей электрической энергии.

В результате изучения дисциплины студент должен:

знать:

- назначение, типы и характеристики управляемых силовых преобразователей электрической энергии;
- структуру, принципы построения, способы регулирования параметров силовых преобразователей электрической энергии;

уметь:

- анализировать работу схем управляемых силовых преобразователей электрической энергии;
- рассчитывать функциональные узлы и элементы электрических принципиальных схем силовых преобразователей;
- оценивать эффективность применяемых способов регулирования параметров электродвигателей в системах управления.

Перечень дисциплин, на знаниях которых базируется изучение дисциплины «Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления», представлен в табл. 1.1.

1.2. Содержание дисциплины

Программой дисциплины «Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления» предусмотрено изучение материала по 11 темам, связанных с тремя дисциплинами, название которых приведено в табл. 1.1. Каждая тема содержит ссылки на рекомендуемые литературные источники. Общий список литературы приведен в разд. 2.

Таблица 1.1

Наименование дисциплины	Тема
1. Теория электрических цепей	Тема 1. Основные законы электрических цепей. Тема 2. Основные свойства и эквивалентные параметры электрических цепей. Тема 3. Элементы нелинейных электрических цепей, их характеристики и параметры. Тема 4. Методы расчета переходных процессов в электрических цепях
2. Элементы и устройства систем управления	Тема 1. Электропривод как исполнительное устройство систем управления. Динамика электроприводов. Режимы работы электродвигателей в электроприводах. Тема 2. Исполнительные двигатели постоянного тока. Якорное и полюсное управление. Характеристики асинхронного, синхронного и шагового электродвигателей
3. Схемотехника в системах управления	Тема 2. Преобразователи электрической энергии в источниках вторичного электропитания. Тема 3. Силовые биполярные транзисторы. Биполярные транзисторы с изолированным затвором. Полевые транзисторы. Мощные МДП-транзисторы. Тиристоры. Тема 4. Контактные, диодные транзисторные ключи. Ключевые схемы на транзисторах. Тема 5. Ключевые схемы на тиристорах. Тема 6. Формирователи управляющих импульсов в структуре импульсных систем управления. Основные схемы формирователей импульсов управления транзисторными, тиристорными ключами. Драйверы силовых транзисторов

ВВЕДЕНИЕ

Предмет, содержание, последовательность изложения тем дисциплины, её связь с другими дисциплинами.

Тема 1. Режимы работы и способы управления исполнительными двигателями систем управления

Электроприводы. Преимущества электроприводов. Элементы электроприводов. Типы электродвигателей, применяемых в системах управления, их характеристики, режимы работы. Способы управления электродвигателями постоянного тока (асинхронными, синхронными, шаговыми).

[2, с. 84 – 89, с. 177 – 180, с. 298 – 308]

Тема 2. Структурные схемы преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей

Разновидности структурных схем преобразователей электрической энергии. Структурные схемы ключевых преобразователей для питания мощных исполнительных двигателей постоянного тока (асинхронных, синхронных, шаговых).

[1, с. 158 – 174, с. 211 – 275, с. 296 – 318, с. 349 – 357, с. 370 – 378; 2, 153 – 154, с. 341 – 349; 3, с. 179 – 185]

Тема 3. Современная элементная база управляемых ключевых силовых преобразователей электрической энергии

Мощные биполярные транзисторы. Силовые МДП-транзисторы. Однооперационные тиристоры. Запираемые тиристоры. Биполярные транзисторы с изолированным затвором.

[1, с. 43 – 81; 3, с. 54 – 102]

Тема 4. Типовые схемы ключевых преобразователей электрической энергии на транзисторах

Схема ключевого преобразователя на биполярном транзисторе. Схема ключевого преобразователя на мощном МДП-транзисторе. Схема ключевого преобразователя на биполярном транзисторе с изолированным затвором. Особенности применения биполярного транзистора с изолированным затвором в схемах ключевых преобразователей с индуктивной нагрузкой.

[1, с. 82 – 92; 3, с. 259 – 316, с. 316 – 329]

Тема 5. Типовые схемы ключевых преобразователей электрической энергии на тиристорах

Схема ключевого преобразователя на тиристорах с электростатическим управлением. Схема ключевого преобразователя на тиристоре с регенеративным включением. Способы запираания тиристорных ключей.

[1, с. 509 – 601; 3, с. 83 – 102]

Тема 6. Формирователи управляющих импульсов в схемах управления преобразователями электрической энергии

Основные типы формирователей импульсов управления силовыми ключами. Формирователи импульсов управления с совмещённой передачей энергии и формы управления. Формирователи импульсов управления с отдельной передачей энергии и информационного сигнала. Гальваническая развязка каскадов формирователей управляющих импульсов. Усилители – формирователи импульсов управления силовыми транзисторами. Усилители – формирователи импульсов управления тиристорами.

[3, с. 179 – 188, с. 199 – 216]

Тема 7. Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания тяговых электродвигателей транспортных средств

Разновидности транспортных средств, использующих тяговый электропривод. Режимы работы исполнительных электродвигателей в электроприводах транспортных средств. Схемы силовых преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей транспортных средств. Проблема рекуперации энергии.

[1, с. 588 – 593; 2. с. 372 – 375, с. 397 – 399, с. 406 – 412, с. 416 – 423]

Тема 8. Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей грузоподъёмных кранов

Особенности электроприводов грузоподъёмных кранов, режимы работы электродвигателей. Требования к системам управления грузоподъёмных средств. Схемы силовых преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей грузоподъёмных кранов.

[6, с. 28 – 29, с. 35 – 40]

Тема 9. Силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей бортовых систем управления летательных аппаратов

Характеристики первичных источников электрической энергии летательных аппаратов. Особенности бортовой сети электропитания летательных аппаратов. Требования к источникам вторичного электропитания и силовым преобразователям электрической энергии для питания электродвигателей бортовых систем управления летательных аппаратов.

[1, с. 595 – 598]

Тема 10. Основные виды перегрузок преобразователей электрической энергии в системах управления электродвигателями

Перегрузки источников питания электрических двигателей в режимах пуска и торможения электропривода, при механических перегрузках и неисправностях механических передач, коротких замыканиях в обмотках двигателя.

[3, с. 224 – 227]

Тема 11. Защитные цепи силовых ключей в схемах преобразователей электрической энергии

Допустимые режимы работы ключевых элементов в схемах преобразователей электрической энергии. Защитные цепи транзисторных ключей. Защитные цепи транзисторных ключей. Защитные цепи тиристорных ключей. Защитные цепи силовых модулей. Силовые ключи с интегрированной системой защиты.

[З. с. 227 – 251]

2. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

ОСНОВНАЯ

1. Розанов, Ю. К. Силовая электроника : учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М. : Издательский дом МЭИ. – 2009.
2. Дюбей Гопал, К. Основные принципы устройства электроприводов / К. Дюбей Гопал; пер. с англ. – М. : Техносфера. – 2009.
3. Воронин, П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение / П. А. Воронин. – М. : МЭИ, 1997.
4. Современные решения в области промышленной и силовой электроники на основе электронных компонентов фирмы Infineon Technologies AG. Материалы семинара. – М. , 1985.
5. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: справочник / В. В. Бачурин [и др.]; под ред. В. П. Дьякова. – М. : Радио и связь, 1994.
6. Онищенко, Г. Б. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Б. Онищенко. – М. : Изд. центр «Академия», 2008.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ

1. Флоренцев, О. Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники / О. Н. Флоренцев // Применение силовой электроники в электротехнике: материалы докл. Междунар. науч.-техн. семинара. – М. : МНТОРЭС им. А.С. Попова, 2000.
2. Энергетическая электроника: справочное пособие : пер. с нем. / под ред. В. А. Лабунцова. – М. : Энергоатомиздат, 1987.
3. Уильямс, Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление: справочное пособие / Б. Уильямс ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1993.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Тема 1. Режимы работы и способы управления исполнительными двигателями систем управления

Управляемые силовые преобразователи электрической энергии являются существенным звеном любой системы управления, в которой используется электропривод.

Электропривод – главный потребитель электрической энергии. В развитых странах свыше 60 % производимой электроэнергии потребляется электрическими двигателями. Электроприводы различны по своим техническим характеристикам: мощности, угловой скорости, характеру нагрузки и т. д.

Электроприводы получают энергию, как правило, от промышленной электрической сети трёхфазного переменного тока частотой 50 Гц со стандартными значениями напряжения 220, 380, 660, 6000, 10 000 В.

Поскольку по своим электромеханическим свойствам электродвигатель при непосредственном включении в питающую сеть не может обеспечить регулирование переменных, характеризующих движение электропривода, необходимо преобразование и регулирование электрической энергии, подводимой к электродвигателю.

Силовые преобразователи электрической энергии предназначены для изменения одного или нескольких параметров электрической энергии посредством электронных силовых приборов без существенных потерь мощности.

При разработке управляемых силовых преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей необходимо учитывать, что любая электрическая машина как электромеханический преобразователь энергии может работать в двух режимах: в двигательном, когда подводимая электрическая энергия преобразуется в механическую, или тормозном (генераторном) режиме, когда кинетическая энергия, накопленная в элементах механической системы, в генераторном режиме двигателя преобразуется в электрическую энергию.

Учебной программой дисциплины «Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей в системах управления» предусмотрено изучение принципов построения силовых преобразователей электрической энергии для питания всего многообразия исполнительных электродвигателей. Это силовые преобразователи электрической энергии для питания двигателей постоянного тока с широтно-импульсным регулированием, преобразователи для частотно-регулируемого асинхронного электропривода.

Импульсная модуляция и цифровые средства управления позволяют перевести управление асинхронным двигателем на принципиально новый уровень, при котором возможно регулирование как скорости, так и момента, приближая его по свойствам управляемости к двигателю постоянного тока.

Разработаны мощные управляемые силовые преобразователи электрической энергии, позволяющие регулировать скорость синхронного электродвигателя за счёт изменения частоты питающего напряжения.

Контрольные вопросы

1. Кратко опишите электрические двигатели, используемые в электроприводах с регулируемой скоростью вращения.
2. Перечислите восемь стандартных классов режимов исполнительных двигателей. Дайте характеристику каждого режима.
3. Каково состояние электроприводов постоянного и переменного тока в настоящее время?
4. Приведите схему силового преобразователя электрической энергии, позволяющего реализовать режим рекуперативного торможения двигателя постоянного тока.
5. Как осуществляется динамическое торможение двигателя постоянного тока. Объясните схемные особенности силового преобразователя электрической энергии, позволяющего реализовать динамическое торможение.
6. Как осуществляется торможение асинхронного двигателя с рекуперацией электроэнергии в сеть?
7. Охарактеризуйте способы управления скоростью и моментом синхронных двигателей.
8. Поясните принцип управления шаговыми двигателями.
9. Объясните принцип торможения противовключением асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Опишите работу управляемого силового преобразователя электрической энергии в этом режиме.
10. Приведите схему управляемого силового преобразователя электрической энергии, позволяющего регулировать интенсивность торможения асинхронного двигателя при динамическом торможении.
11. Опишите способы регулирования скорости асинхронного двигателя путём изменения напряжения на статорных обмотках и частоты питающей сети. Дайте сравнительную оценку этих способов.

Тема 2. Структурные схемы преобразователей электрической энергии для питания электродвигателей

При изучении этой темы следует обратить внимание на факторы, определяющие выбор электропривода и режимов его работы, что в свою очередь позволит сформулировать требования к преобразователю электрической энергии и его параметрам.

Сложность структурной схемы силового преобразователя электрической энергии для питания электродвигателя определяется жесткостью требований к обеспечению параметров пуска, регулирования скорости, торможения.

Пуск, торможение, регулирование, изменение скорости и нагрузки – это работа двигателя в режиме переходных процессов, когда изменяется скорость, момент и, как следствие, потребляемая от преобразователя мощность.

Основные виды структурных схем преобразователей электрической энергии определяются их назначением и способом преобразования электрической энергии, а также характером процессов в приводе и методами управления.

В зависимости от параметров первичного источника энергии и характеристик электрического двигателя силовые преобразователи могут выполнять преобразование переменного тока в постоянный, постоянного – в переменный с необходимыми значениями тока, напряжения, частоты. Различают преобразователи с преобладанием свойств источника тока или с преобладанием свойств источника напряжения.

Нормативными документами определены термины прямой и непрямой преобразователи.

Прямой преобразователь осуществляет непосредственные (без промежуточных звеньев) преобразования электрической энергии внешнего источника в электроэнергию с параметрами, требуемыми для электропитания исполнительного элемента или прибора.

Непрямые преобразователи содержат промежуточные звенья. По принципу непрямого преобразования работают блоки питания различных электронных приборов и устройств, содержащие в своём составе выпрямители с бестрансформаторным входом, инвертор повышенной частоты с трансформаторным выходом и выходным выпрямителем, преобразующим напряжение повышенной частоты в напряжение постоянного тока.

Непрямые преобразователи характеризуются лучшими удельными массогабаритными показателями по сравнению с преобразователями, в которых используются низкочастотные силовые трансформаторы.

Структурные схемы силовых регуляторов напряжения и тока значительно сложнее схем прерывателей переменного и постоянного тока, осуществляющих включение и выключение электрической цепи.

Контрольные вопросы

1. Каковы различия схем преобразователей частоты с автономным инвертором тока и автономным инвертором напряжения?
2. На сколько двигателей можно подавать питание от одного преобразователя частоты типа инвертора тока?
3. Какие способы регулирования выходного напряжения используют в преобразователях частоты с промежуточной цепью постоянного тока и инвертором напряжения?
4. В чём основное отличие замкнутых систем регулирования от разомкнутых?
5. Назовите виды обратных связей, используемых в системах регулирования электроприводов.
6. Какие обратные связи применяют для формирования статических механических характеристик электропривода?

7. Какой из преобразователей, выполненных по схемам со свойствами источника тока или напряжения, является более инерционным?

8. Какое основное преимущество имеет схема непосредственного преобразователя частоты перед преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока?

9. Какие общие признаки объединяют силовые электронные преобразователи электроэнергии?

10. Приведите примеры структурных схем прямого и непрямого выпрямителей.

11. Перечислите основные электрические параметры следующих преобразователей электроэнергии: выпрямителя, преобразователя постоянного тока в постоянный, инвертора и преобразователя частоты. В каких режимах проявляется действие гибких обратных связей?

Тема 3. Современная элементная база управляемых ключевых силовых преобразователей электрической энергии

Благодаря достижениям микроэлектроники в настоящее время созданы полупроводниковые приборы большей мощности, работающие в ключевых режимах, обладающие высоким быстродействием при полной управляемости.

Основными параметрами, определяющими область применения электронного ключа, являются значения коммутируемой мощности и быстродействие.

Условно коммутируемую мощность можно разделить на три диапазона: низкую (до 100 кВт), среднюю (100 кВт – 10 МВт) и высокую (10 МВт и выше).

Быстродействие электронных ключей определяется их частотными свойствами.

Для маломощных ключевых преобразователей электрической энергии наиболее применимы МОП-транзисторы, обладающие хорошим быстродействием, но имеющие сравнительно низкое рабочее напряжение (40 – 75 В) и токи до 80 А.

Наиболее перспективными ключевыми элементами для мощных преобразователей электрической энергии являются биполярные транзисторы с изолированным затвором МОПБТ (IGBT), имеющие рабочее напряжение до 3,5 кВ при токе более 1000 А. Создание модулей высокого напряжения на основе этих приборов позволяет улучшить КПД мощных инверторов, улучшить их массогабаритные характеристики.

Последние достижения в области электронных технологий позволили значительно улучшить характеристики силовых электронных ключей. Разработаны МОП-транзисторы с очень низким сопротивлением в открытом состоянии, модификации ГТО-транзисторов с большим числом интегрированных сегментов, с шунтированием большого числа участков анода.

Перспективные технологии в области силовой электроники позволяют реализовать интегрированные силовые ключи, соединённые по типовым схемам.

Создание модулей значительно сокращает затраты на производство силовых преобразователей электрической энергии, позволяет существенно улучшить их массогабаритные показатели, минимизировать монтажные соединения.

Силовые интегральные схемы являются электронными модулями, объединяющими в одном кристалле при корпусе силовые электронные компоненты, схемы управления и защиты, интерфейсные схемы.

Контрольные вопросы

1. По каким признакам классифицируются электронные ключи?
2. Для чего используется модель идеального ключа?
3. Какими параметрами характеризуется идеальный ключ?
4. Чем отличается сопротивление диода постоянному току от динамического сопротивления?
5. Назовите преимущества и недостатки диодов Шоттки.
6. В каких случаях следует использовать быстросстанавливающиеся диоды?
7. Чем аналоговые ИМС отличаются от цифровых?
8. Почему операционные усилители наиболее распространены среди аналоговых ИМС?
9. Какие полупроводниковые структуры составляют основу монокристалльных интегральных схем?
10. Какие преимущества обеспечивает использование модулей при создании силовых электронных устройств по сравнению с традиционной технологией применения дискретных силовых электронных приборов?
11. Каким образом устраняется неравномерность в распределении токов и напряжений при параллельном и последовательном соединении диодов?

Тема 4. Типовые схемы ключевых преобразователей электрической энергии на транзисторах

В силовых электронных устройствах транзисторы используются в качестве полностью управляемых ключей. Основными показателями, определяющими область применения транзисторов, являются значение коммутируемой мощности и быстродействие. В ключевых схемах силовых преобразователей электрической энергии используются биполярные транзисторы и полевые, среди которых наиболее распространены МОП-транзисторы и транзисторы со статической индукцией (СИТ-транзисторы).

Наиболее перспективными для силовых ключей являются биполярные транзисторы с изолированным затвором (МОПБТ-транзисторы), объединяющие

в одном транзисторе положительные свойства биполярного и полевого транзисторов и выполненные в одном кристалле.

Этот транзистор имеет низкие потери мощности во включенном состоянии подобно биполярному и высокое входное сопротивление цепи управления, характерное для полевого транзистора. При отсутствии напряжения на затворе транзистор выключен.

Включение транзистора с каналом n -типа осуществляется подачей положительного напряжения на затвор относительно эмиттера. В настоящее время на базе одного кристалла созданы биполярные транзисторы с изолированным затвором, имеющие рабочий ток до 100 А при номинальном напряжении 3000 В. Параллельное включение кристаллов в одном корпусе позволяет создать модули с напряжением более 4,5 кВ и рабочим током до 1 кА.

Биполярные транзисторы, используемые в схемах силовых преобразователей электрической энергии, имеют рабочий ток, не превышающий 50 А при напряжении до 1000 В и частоту коммутации ключей до 10 кГц. С учётом того, что токи эмиттера и коллектора биполярного транзистора зависят от значения тока базы, ключевые схемы на биполярных транзисторах управляются током.

Ключи на современных биполярных транзисторах с эмиттерной коммутацией обладают широкой областью максимальных режимов и часто используются в ключевых схемах преобразователей электрической энергии. Обычные схемы коммутации обладают существенным недостатком – увеличенным фронтом спада силового тока, что вызывает значительные динамические потери. Одним из способов снижения мощности потерь является предварительный вывод силового транзистора из режима глубокого насыщения с последующим форсированным запирающим за счёт размыкания цепи эмиттера. Наиболее просто этот принцип управления реализуется с применением индуктивной коммутации эмиттера на основе импульсного трансформатора тока.

Принципиальным отличием МОП-транзисторов от биполярных является то, что они управляются полем (напряжением, подаваемым на затвор полевого транзистора).

МОП-транзисторы униполярные, так как процессы в них обусловлены одним типом носителей заряда. МОП-транзисторы применяются в силовых электронных ключах малой мощности, так как имеют рабочий ток до 50 А при напряжении, не превышающем 100 В. Разработаны многоячейковые структуры МОП-транзисторов, позволяющие на порядок увеличить их мощность. Существуют схемы силовых электронных ключей на полевых транзисторах с управляющим p - n -переходом.

Силовой ключ на СИТ-транзисторе не превышает 100 кГц при напряжениях коммутируемой цепи до 1200 В и коммутируемых токах, достигающих нескольких сотен ампер. При разработке силовых электронных ключей на транзисторах особое внимание уделяется динамическим режимам их работы.

При коммутации электрических цепей с повышенной частотой важно не только обеспечить область безопасной работы транзисторного ключа, но и

уменьшить мощность, выделяемую в транзисторе, на интервалах переключения, что позволит уменьшить динамические потери в транзисторе.

Важным фактором, определяющим перспективность ключевых преобразователей электрической энергии на транзисторах, является их способность управлять большими потоками энергии практически по любому закону при минимальных мощностях, затрачиваемых на управление.

Контрольные вопросы

1. Какие основные различия биполярных и полевых транзисторов следует учитывать при использовании их в качестве электронных ключей?

2. Какие преимущества биполярных и полевых транзисторов сочетает в себе биполярный транзистор с изолированным затвором?

3. Перечислите основные статические режимы работы транзисторов. В каких режимах следует использовать транзисторы в устройствах силовой электроники?

4. Чем обусловлена дополнительная задержка при включении биполярного транзистора с изолированным затвором?

5. Поясните основные способы ограничения перенапряжений на транзисторах при выключении активно-индуктивной нагрузки.

6. Поясните принцип действия силового транзисторного регулятора напряжения.

7. Что такое траектория переключения транзистора? Как реализуются цепи формирования траектория переключения?

8. Охарактеризуйте динамические потери в транзисторе. Назовите способы их уменьшения.

9. Чем объясняются недопустимые для транзистора перегрузки по току при его включении с ёмкостной нагрузкой?

10. Охарактеризуйте динамические режимы работы силовых транзисторов. Чем обусловлено более высокое быстродействие полевых транзисторов?

11. Опишите динамические процессы при переключении транзистора с изолированным затвором.

Тема 5. Типовые схемы ключевых преобразователей электрической энергии на тиристорах

Тиристор, разработанный в 1955 г., явился первым полупроводниковым прибором большой мощности, способный работать в ключевом режиме с управляемым моментом включения. Общим свойством всех типов тиристорov является регенеративный механизм отпирания, обусловленный внутренней положительной обратной связью.

Основным направлением совершенствования тиристорov является повышение их быстродействия. В схемах ключевых преобразователей электрической энергии используются все типы тиристорov, разработанные и усовершенствованные к настоящему времени.

Для фазового управления в преобразователях переменного тока находят применение симметричные тиристоры, представляющие собой интегральное соединение структуры двух встречноключённых тиристорov в одном приборе с общим электродом управления. В схемах силовых преобразователей электрической энергии с индуктивной нагрузкой используются тиристоры, выполненные в интегральном исполнении по схеме со встречноключённым диодом.

Наличие обратного диода улучшает условия выключения тиристора. В схемах с индуктивной нагрузкой после включения тиристора ток, обусловленный индуктивностью нагрузки, протекает в обратном направлении. Это позволяет осуществить рекуперацию энергии, накопленной в индуктивности нагрузки, в источник питания. В ключевых схемах, коммутирующих силовые электрические цепи, могут использоваться оптоуправляемые тиристоры (фототиристоры), световой сигнал управления на которые подаётся по оптоволоконному кабелю.

Основной схемой силового преобразователя электрической энергии на тиристорах является преобразователь переменного или постоянного тока, выполненный по трехфазной мостовой схеме. В мощных преобразователях используются многофазные схемы. Такие схемы позволяют не только выпрямлять переменный ток, но и инвертировать энергию источника постоянного тока в переменный.

С помощью ключевых преобразователей электрической энергии на тиристорах можно коммутировать электрические цепи напряжением до 9 кВ и токами – до 8 кА. Время выключения быстродействующих тиристорov достигает нескольких микросекунд.

В настоящее время созданы запираемые тиристоры с максимальным значением напряжения до 6 кВ и тока – до 6 кА; что значительно расширяет возможности применения тиристорov в ключевых схемах преобразователей электрической энергии.

Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию управляемых тиристорных выпрямителей в силовых преобразователях электрической энергии.
2. Поясните принцип действия управляемого тиристорного выпрямителя.
3. Какова особенность тиристорного преобразователя для реверсивного электропривода?
4. Что такое инверторный режим работы управляемого тиристорного выпрямителя, каковы условия реализации этого режима?
5. В чём преимущества и недостатки оптоуправляемых тиристорov?

6. Почему прямые преобразователи частоты с естественной коммутацией тиристорных не могут иметь частоту выходного напряжения выше частоты входного напряжения?

7. Какой вид коммутации используется в тиристорных управляемых силовых преобразователях?

8. Какими недостатками обладают пускорегулирующие устройства на встречно включенных тиристорах?

9. Какие факторы влияют на синусоидальность входного напряжения в прямом преобразователе частоты с естественной коммутацией?

10. В чём преимущества силового преобразователя электрической энергии на биполярных транзисторах с изолированным затвором по сравнению с тиристорным преобразователем?

11. Объясните принцип работы тиристора с помощью двухтранзисторной модели. Почему отсутствие тока управляющего электрода не приводит к выключению тиристора?

Тема 6. Формирователи управляющих импульсов в схемах управления преобразователями

Формирователь импульсов управления представляет собой усилитель-формирователь, предназначенный для усиления информационного сигнала управления и формирования сигнала с параметрами, необходимыми для каждого включения и выключения полупроводникового ключа. Схемотехника формирователя управляющих импульсов определяется типом управляемого ключа, его статическими и динамическими характеристиками.

Укрупнённая структурная схема управляемого силового преобразователя электрической энергии может быть представлена двумя взаимосвязанными устройствами. Основу составляет непосредственно силовой преобразователь, выполненный на управляемых ключах, и устройство, управляющее логикой переключения вентилей силовой части. Формирователь импульсов управления является промежуточным усилителем, обеспечивающим необходимые параметры импульсов, управляющих силовыми ключами.

Система управления силовыми преобразователями электрической энергии строится на основе импульсных методов регулирования напряжения и тока. Возможно применение широтно-импульсного метода регулирования, при котором изменяется длительность управляющих импульсов при неизменной частоте их следования, а также частотно-импульсного метода, основанного на изменении частоты следования импульсов при постоянной длительности. Наибольшее распространение получили системы с широтно-импульсным управлением, содержащие специальный широтно-импульсный модулятор, управляющий работой силового ключа.

Основным звеном в структуре управляющей части преобразователя является микроконтроллер, который, во-первых, управляет логикой переключения вентилях силовой части, получая сигналы обратных связей по токам и напряжениям, и, во-вторых, обеспечивает интерфейсные функции для связи с оператором и технологическими объектами. В состав микроконтроллеров, применяемых в системах управления электродвигателями, включается необходимое число программируемых ШИМ-генераторов, которые, получая от процессора информацию о требуемой частоте и скважности, самостоятельно осуществляют согласованное управление силовыми ключами инвертора.

Во всех мощных преобразователях осуществляется потенциальная развязка между силовой и управляющей частью.

Развязка в информационном канале осуществляется либо при помощи высокочастотного трансформатора, либо с использованием оптронов. При очень высоких рабочих напряжениях преобразователя вместо оптронов используют специальные оптоволоконные системы передачи сигналов. При большой длительности управляющих импульсов в трансформаторных схемах гальванической развязки пакеты управляющих импульсов, сформированные микроконтроллером, через эмиттерный повторитель и разделительный конденсатор поступают на первичную обмотку импульсного трансформатора. Данный пакет представляет собой результат логического перемножения сигнала несущей частоты 3 МГц и ШИМ-сигнала частотой $\sim 12 \dots 20$ кГц, генерируемых с помощью микроконтроллера, управляющего работой преобразователя. Далее управляющий пакет выпрямляется на вторичной стороне формирователя и используется для управления силовым ключом.

Высокая частота передаваемого пакета, а также низкая мощность, потребляемая во входной цепи ключей с изолированным затвором, позволяют использовать импульсный трансформатор очень малых размеров.

Для управления мощными полупроводниковыми ключами разрабатываются специальные интегральные схемы усилителей импульсов управления, которые формируют выходные сигналы заданной мощности и формы, они изготавливаются в виде отдельной интегральной схемы. Они являются законченными устройствами, готовыми к применению для конкретного типа транзисторов или тиристоров, и называются драйверами.

Контрольные вопросы

1. Какие основные задачи выполняет формирователь импульсов управления?
2. Какие параметры должен иметь импульс управления биполярным транзистором?
3. Какие параметры МОП-транзисторов влияют на процессы включения и выключения?
4. Перечислите способы обеспечения гальванической развязки между силовым ключом и формирователем управляющих импульсов.

5. Какие функции выполняет микроконтроллер в схеме формирователя импульсов управления силовым преобразователем?

6. Приведите принципиальные схемы и объясните принцип работ трансформаторных формирователей импульсов управления.

7. Приведите принципиальные схемы и объясните принцип работы трансформаторных формирователей импульсов управления для ключей на биполярных транзисторах с изолированным затвором.

8. Приведите принципиальные схемы и объясните принцип работы трансформаторных формирователей импульсов управления тиристорными ключами.

9. Формирователи импульсов управления с отдельной передачей энергии и информационного сигнала (схема, особенности работы).

10. Драйверы силовых транзисторов.

11. Приведите схему формирователя управляющих импульсов с широтно-импульсной модуляцией, опишите работу схемы.

Тема 7. Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания тяговых электродвигателей транспортных средств

В настоящее время тяговый электропривод находит широкое применение во всех видах электротехнических систем наземного электрического транспорта. Это железнодорожный транспорт, городской электрический транспорт, электромобили.

На железнодорожном транспорте используется электрическая энергия постоянного и переменного тока. В качестве источников электропитания тяговых двигателей используются дизель-электрические энергетические установки или государственные электрические сети, подающие электрическую энергию в железнодорожную контактную сеть через тяговые подстанции, содержащие выпрямительно-инверторные устройства. Напряжение контактной сети постоянного тока составляет 3 кВ.

При использовании электродвигателей и оборудования переменного тока напряжением 25 кВ в локомотиве применяются инверторные устройства, осуществляющие управляемое преобразование электрической энергии контактной сети.

При использовании в электроприводе локомотива тиристорных преобразователей переменного тока используется фазовое управление, при котором выходное напряжение определяется углом включения тиристоров. Такой способ управления снижает коэффициент мощности преобразователя и создает существенные искажения тока, потребляемого из сети. В таком электроприводе необходимо применение фильтров и компенсаторов реактивной мощности.

Гораздо перспективнее инверторы с широтно-импульсной модуляцией, обеспечивающие регулирование частоты и выходного напряжения.

В них могут использоваться ключевые схемы на запираемых тиристорах или биполярных транзисторах с изолированным затвором. Разработаны двухуровневые преобразователи с широтно-импульсной модуляцией на основе за-

пираемых тиристоров напряжением 4,5 кВ и током 2,5 кА. Использование в преобразователях модулей на биполярных транзисторах с изолированным затвором позволяет получить такие же параметры преобразователя, но значительно снизить потери на управление транзисторными ключами.

Наземный городской электрический транспорт представлен троллейбусом и трамваем.

Преобразователи электрической энергии для питания двигателей трамваев, троллейбусов и метро имеют практически одинаковые характеристики. Источниками электроснабжения трамвая, троллейбуса, метро являются подстанции постоянного тока.

Тяговые электродвигатели работают в циклических режимах, обеспечивающих плавное трогание транспортного средства, разгон и торможение.

В условиях движения городского пассажирского транспорта смена циклов происходит непрерывно. Это приводит к значительным потерям энергии, усложнению алгоритмов управления тяговым электроприводом, снижению ресурса оборудования. Ранее в тяговом электроприводе использовались только коллекторные электродвигатели постоянного тока с контакторно-резисторным управлением. В настоящее время в новых моделях троллейбусов и трамваев используются асинхронные двигатели переменного тока и управляемые силовые преобразователи на мощных биполярных транзисторах с изолированным затвором.

Управление режимами работы тяговых электродвигателей осуществляется контроллером.

Созданы универсальные промышленные силовые преобразователи электрической энергии, имеющие рабочий диапазон входных напряжений от 24 В до 900 В, максимальную мощность на входе преобразователя до 360 кВт, коэффициент гармоник по току не более 5 %.

В автомобилестроении ведётся поиск путей перехода от двигателей внутреннего сгорания на электрический привод.

На данном этапе уже эксплуатируются опытные образцы гибридного или комбинированного приводов автомобиля, сочетающие в себе классический привод с двигателем внутреннего сгорания и электропривод.

Контрольные вопросы

1. Какие виды преобразователей электроэнергии используются на железнодорожном транспорте?
2. Каковы перспективы использования гибридных или комбинированных источников энергии в транспортных средствах?
3. Как осуществляется электроснабжение тяговых электродвигателей локомотивов в автономном режиме?
4. Приведите структурную схему дизель-электрического тягового привода, опишите работу функциональных узлов привода.
5. Приведите схему дизель-электрического тягового привода с трёхфазным генератором переменного тока и тяговыми двигателями постоянного тока.

6. Приведите схему асинхронного электропривода с инвертором напряжения, управляемым широтно-импульсным модулятором.

7. Приведите схему тягового электропривода переменного тока с двигателями постоянного тока, управляемыми силовым преобразователем энергии на тиристорах.

8. Каким образом осуществляется электропитание современного трамвая, троллейбуса?

9. Приведите структурную схему перспективной системы электроснабжения автомобиля, опишите назначение функциональных звеньев системы.

10. Перечислите виды преобразователей электроэнергии и их функции в автомобиле.

11. Каковы преимущества тягового электропривода с тиристорным преобразователем в сравнении приводом, в котором используется трансформатор с переключателем ответвления.

Тема 8. Управляемые силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей грузоподъемных кранов

В грузоподъемных кранах, лебёдках чаще всего применяется асинхронный электропривод, использующий трёхфазные асинхронные двигатели. Кинематические схемы многих грузоподъемных механизмов подобны. Рабочий орган механизма связан с валом электродвигателя через систему передач, в состав которой в обязательном порядке входит редуктор и барабан для намотки троса.

При разработке схемы управляемого силового преобразователя электрической энергии для таких электроприводов необходимо учитывать, что электрическая машина как электромеханический преобразователь энергии может работать в двух режимах: в двигательном, преобразуя подводимую электрическую энергию в механическую, или тормозном (генераторном) режиме, преобразуя подводимую механическую энергию в электрическую. Механические характеристики, отражающие зависимость момента двигателя от его скорости, позволяют рассчитать энергетические характеристики преобразователя электрической энергии для питания выбранного двигателя во всех режимах его работы. Следует иметь в виду, что в грузоподъемных механизмах момент сопротивления движению создаётся главным образом силой тяжести груза и не зависит от скорости в пределах допустимых нагрузок. Механические потери в передачах приводят к тому, что момент при подъёме груза несколько превышает момент сопротивления при его пускании.

Управление движения электропривода подчиняется законам механики Ньютона.

Момент, характеризующий установившейся режим работы электропривода, называется статическим.

Как правило, электроприводы грузоподъемных кранов работают в повторно-кратковременном режиме, характеризующемся временным циклом работы с заданным моментом на валу и скоростью.

Для этих режимов выбираются асинхронные электродвигатели краново-металлургической серии, для управления которыми можно использовать комплектные частотно-регулируемые асинхронные приводы серии НГ-140.

Структурная схема преобразователя этой серии состоит из звена постоянного тока, содержащего неуправляемый выпрямитель с фильтром, мостового трёхфазного инвертора, выполненного на IGBT-транзисторах, и системы управления. Силовые транзисторные ключи управляются драйверами, обеспечивающими гальваническую развязку силовых электрических цепей и цепей управления.

Современные электроприводы грузоподъемных кранов используют блок микропроцессорного управления, в состав которого входят: программируемый контроллер, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи.

Силовые преобразователи электрической энергии, используемые для питания двигателей грузоподъемных кранов, содержат следующие виды защиты в случае:

- перенапряжения по питанию;
- короткого замыкания в нагрузке;
- замыкания фазы на землю;
- перегрева двигателя;
- перегрузки привода;
- ошибок управления.

Контрольные вопросы

1. Приведите структурную схему комплектного частотно-регулируемого асинхронного привода серии НГ-140. Опишите принцип работы.

2. Приведите кинематическую схему грузоподъемной лебёдки, постройте диаграмму изменения скорости и момента на валу электродвигателя во время подъёма груза.

3. Почему в электроприводах грузоподъемных механизмов предпочтение отдаётся асинхронному электродвигателю?

4. Как осуществляется торможение электропривода грузоподъемного механизма при опускании груза?

5. Перечислите причины возможных перегрузок электродвигателя грузоподъемного механизма и способы защиты от перегрузок.

6. Перечислите все виды защиты, применение которых обязательно для электроприводов грузоподъемных механизмов.

7. Приведите принципиальную электрическую схему мостового трёхфазного инвертора на тиристорах, объясните принцип его работы.

8. Приведите структурную схему электропривода механизма автокрана с дизель-генератором.

9. Как сказывается на энергетических характеристиках электропривода повторно-кратковременный режим работы исполнительного электродвигателя?

10. Чем отличаются асинхронные двигатели краново-металлургической серии от других электродвигателей, применяемых в электроприводах?

11. Обоснуйте возможные пути повышения коэффициента полезного действия электроприводов грузоподъемных механизмов.

Тема 9. Силовые преобразователи электрической энергии для питания электродвигателей бортовых систем управления летательных аппаратов

На летательных аппаратах применяются гибридные системы привода – электрический и гидравлический. Интеграция электрической и гидравлической систем привода позволяет использовать электрическую систему для управления всеми устройствами автоматики летательного аппарата, а гидравлическую – в качестве исполнительного органа тех устройств, где применение электромеханических узлов оказывается нецелесообразным или даже невозможным из-за неудовлетворительных массогабаритных параметров.

В зависимости от типа летательного аппарата и его назначения мощность бортового источника электрической энергии может составлять от единиц киловатт до нескольких мегаватт.

На заре развития авиационной техники использовалась бортовая электрическая сеть постоянного тока. Значительное увеличение энергопотребления современного летательного аппарата, расширение функций потребителей электроэнергии приводит к необходимости перевода системы электроснабжения самолёта на переменный ток.

Бортовая сеть переменного тока позволяет использовать мощные управляемые силовые преобразователи электрической энергии переменного тока в постоянный для электропитания потребителей постоянного тока.

Вместо коллекторных двигателей постоянного тока используются более надёжные бесколлекторные машины переменного тока.

Использование трансформаторов в системах переменного тока позволяет обеспечить необходимые значения напряжений потребителей, осуществить гальваническую развязку электрических цепей различных подсистем.

Важнейшим критерием эффективности системы электроснабжения любого летательного аппарата являются удельные характеристики её массы. Снижение массы электрического генератора, потребителей энергии и устройств её преобразования осуществляется за счёт повышения частоты и напряжения бортовой электрической сети и мультиплексирования каналов передачи электрических сигналов.

Использование высокоскоростного генератора переменного тока, устанавливаемого на валу турбины в качестве основного источника системы электроснабжения позволяет поддерживать напряжение бортовой сети на уровне 200–300 В.

Применение быстродействующих электронных силовых ключей в схемах бортовых преобразователей электрической энергии позволяет получить напряжение стабильной частоты 400 Гц при изменении скорости вращения турбины.

Для электропитания потребителей постоянного тока используются отдельные инверторы с выходным напряжением 270 и 28 В. Указанные напряжения могут поступать непосредственно потребителям или на различные преобразователи.

Для питания системы освещения летательного аппарата используются электронные балласты с преобразованием электрической энергии на повышенной частоте.

Контрольные вопросы

1. Какие серии электродвигателей постоянного тока используются в электроприводах летательных аппаратов?

2. Проведите сравнительный анализ энергетических характеристик импульсных и релейных приводов с двигателями постоянного тока.

3. Какие типы электрических двигателей переменного тока применяются в электроприводах летательных аппаратов.

4. Каким образом с помощью управляемого силового преобразователя, питающего асинхронный двухфазный двигатель переменного тока, можно осуществить его реверсирование?

5. Проанализируйте динамические возможности электроприводов постоянного тока, переменного тока и приводов с электромагнитными муфтами.

6. Чем обусловлен переход основных систем энергоснабжения летательных аппаратов на переменный ток?

7. Приведите обобщённую структурную схему системы электроснабжения самолёта, опишите взаимодействие отдельных узлов, входящих в состав системы.

8. Охарактеризуйте основные критерии эффективности системы электроснабжения летательного аппарата. Обоснуйте пути повышения эффективности.

9. Обоснуйте основные тенденции развития силовой и информационной электроники летательных аппаратов.

10. Как обеспечивается стабильность параметров системы электроснабжения самолёта при использовании высокоскоростного генератора постоянного или переменного тока, установленного на валу турбины?

11. Как осуществляется стабилизация частоты 400 Гц при изменении скорости вращения турбины?

Тема 10. Основные виды перегрузок преобразователей электрической энергии в схемах управления электродвигателями

В схемах силовых преобразователей электрической энергии наиболее чувствительными к перегрузкам по току и напряжению являются силовые ключевые элементы. Причинами перегрузок по напряжению могут быть:

- нестабильность питающей сети;
- коммутационные процессы в электрических цепях с индуктивностью;
- нестабильность параметров нагрузки.

Аварийные токовые перегрузки чаще всего возникают при коротких замыканиях в силовой схеме при выходе из строя ключевых элементов, коротких замыканиях на выходных шинах преобразователя. Токовые перегрузки силового преобразователя могут возникать и в эксплуатационных режимах работы электропривода, например, при длительном пусковом режиме электродвигателя, превышении допустимого момента нагрузки, повреждении элементов механической передачи.

При разработке управляемых силовых преобразователей электрической энергии необходимо учитывать, что силовые ключи являются наиболее дорогими компонентами схемы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды перегрузок силовых преобразователей по напряжению, обоснуйте причины их возникновения.

2. Перечислите основные виды аварийных токовых перегрузок силовых преобразователей, охарактеризуйте факторы их возникновения.

3. В каких случаях используются внешние защитные устройства? Приведите примеры подключения внешних защитных устройств к преобразователям электрической энергии.

4. Обоснуйте причины возникновения токовых перегрузок преобразователя электрической энергии в пусковых режимах работы двигателя постоянного тока.

5. Обоснуйте появление токовых перегрузок, связанных со сбоем в работе системы управления преобразователя электрической энергии.

6. Что отражают перегрузочные характеристики силового ключа?

7. В каких случаях отключение импульсов управления в режимах токовой перегрузки не обеспечивает восстановление запирающей способности ключа?

8. Как сказываются токовые перегрузки силовых цепей преобразователя на тепловых режимах оборудования?

9. Объясните причины возникновения токовых перегрузок преобразователя при длительных пусковых режимах электродвигателя.

10. Какие виды перегрузок возникают в ключевых схемах преобразователя при коммутации нагрузки, имеющей индуктивно-активный характер?

11. Какие виды перегрузок электропривода возникают при авариях и неисправностях механических передач?

Тема 11. Защитные цепи силовых ключей в схемах преобразователей электрической энергии

Силовые преобразователи электрической энергии, нагрузкой которых являются электрические двигатели, постоянно работают в жестких режимах в силу того, что электрический двигатель представляет собой сложную активно-индуктивную нагрузку, параметры которой в динамических режимах работы непостоянны.

Ключевые элементы преобразователя работают в импульсном режиме, осуществляя включение и выключение активно-индуктивной нагрузки. Выключение активно-индуктивной нагрузки вызывает перенапряжение на ключевом элементе, обусловленное ЭДС самоиндукции, возникающей в индуктивной составляющей нагрузки при уменьшении тока до нуля. Используются схемы защиты ключевых элементов на основе обратного диода либо стабилитрона или трансформатора, включенного первичной обмоткой в коммутируемую цепь нагрузки.

Ключевые элементы мостовых и полумостовых схем должны иметь защиту от сквозных токов и коротких замыканий.

Причиной выхода из строя полупроводниковых диодов, включенных в силовые цепи преобразователя, является высокая скорость нарастания прямого тока при их включении и напряжения при выключении.

Для ограничения скорости нарастания тока последовательно с диодом включается линейный реактор. Для ограничения уровня перенапряжения диод шунтируется RC -цепочкой. Конденсатор C поглощает энергию, накопленную в индуктивности реактора.

При разработке схем силовых преобразователей электрической энергии должны быть учтены предельно допустимые отклонения выходных параметров от номинальных значений во всех режимах работы, включая аварийные. Это необходимо для выбора способа и системы защиты преобразователя.

Система защиты должна иметь внешние устройства, ограничивающие проявления нестабильности питающей электрической сети и аварийные состояния нагрузки преобразователя. Внешние устройства должны обладать высоким быстродействием, позволяющим обесточить силовые цепи до выхода из строя ключевых элементов преобразователя.

Контрольные вопросы

1. Способы защиты электрических двигателей, применяемых в электроприводе.
2. С какой целью и какими средствами осуществляется минимально-токовая защита в электроприводах постоянного тока?
3. Назовите способы реализации температурной защиты электрических двигателей и силовых преобразователей электрической энергии.
4. Каким образом осуществляется автоматическое переключение ступней роторного сопротивления при пуске асинхронного двигателя с фазным ротором?
5. Чем характеризуется область безопасных режимов электронных ключей в силовых преобразователях электрической энергии?
6. Какими параметрами характеризуются предельные возможности силовых ключей в силовых преобразователях электрической энергии?
7. Чем определяется суммарная электрическая мощность или энергия потерь в электронном ключе?
8. Методы защиты силовых преобразователей от помех.
9. Приведите осциллограммы режимов короткого замыкания в цепях биполярного транзистора с изолированным затвором при включении на короткозамкнутую цепь и коротком замыкании в нагрузке при включённом состоянии транзистора.
10. Для чего используются тепловые выключатели в схемах силовых преобразователей электрической энергии? Приведите схемы включения тепловых выключателей.
11. Как осуществляется защита ключевых элементов силового преобразователя электрической энергии от длительного пускового режима коллекторного двигателя постоянного тока?

4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

В соответствии с номером варианта, установленного для студента преподавателем, по табл. 4.1 определяется номер темы, обозначенный в разд. 3, и номер контрольного вопроса темы, на который необходимо дать развернутый ответ в ходе выполнения контрольной работы.

Таблица 4.1

Номер темы	Номер контрольного вопроса										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
4	34	35	36	37	38	39	40	1	2	3	4
5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
6	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
7	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
8	38	39	40	1	2	3	4	5	6	7	8
9	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
10	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
11	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	

Пример:

Для студента Иванова М. И. определён вариант №1. В соответствии с таблицей студенту устанавливается следующее задание:

1. Контрольный вопрос №1 темы 1.
2. Контрольный вопрос №8 темы 4.
3. Контрольный вопрос №4 темы 8.

Учебное издание

Родин Анатолий Яковлевич

**УПРАВЛЯЕМЫЕ СИЛОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПИТАНИЯ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ**

Методическое пособие
для студентов специальности 1-53 01 07
«Информационные технологии и управление в технических системах»
заочной формы обучения

Редактор Т. П. Андрейченко
Корректор Е. Н. Батурчик
Компьютерная верстка Ю. Ч. Ключкевич

Подписано в печать 14.11.2011.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,86.
Уч.-изд. л. 1,8.	Тираж 100 экз.	Заказ 358.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6