

УЧЕБНИКИ НГТУ

Г.С. ЗИНОВЬЕВ

ОСНОВЫ
СИЛОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

НОВОСИБИРСК

Г. С. ЗИНОВЬЕВ

ОСНОВЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Издание 4-е, исправленное и дополненное

Рекомендовано Научно-методическим советом
Министерства образования РФ
по промышленной электронике
в качестве учебного пособия для студентов
специальности «Промышленная электроника»

НОВОСИБИРСК
2009

УДК 621.314.2(075.8)
3 635

Федеральная программа книгоиздания России

Рецензенты

В. З. Манусов, д-р техн. наук, проф.
Е. А. Подъяков, канд. техн. наук, проф.

Работа выполнена на кафедре промэлектроники

Зиновьев Г. С.

3 635 Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Изд. 4-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 672 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).

ISBN 5-7782-0464-7

Излагаются принципы преобразования электрической энергии в базовых схемах выпрямления, инвертирования, преобразования частоты и напряжения. Даны основы прямых методов анализа энергетических процессов в схемах. Приведены основные характеристики всех базовых схем преобразователей. Рассмотрены способы управления вентильными преобразователями.

Материал учебника структурирован по трем уровням глубины изложения материала («три в одном»). Два верхних уровня предназначены для профессиональной магистерской и инженерной ветвей обучения студентов специальности «Силовая электроника» и «Промышленная электроника». Нижний уровень изложения предназначен для общетехнической подготовки по силовой электронике студентов электротехнических, электроэнергетических, радиотехнических специальностей. Все главы учебника снабжены контрольными вопросами (тестами в электронном варианте учебника) и упражнениями.

Учебник может быть использован также специалистами с различным уровнем подготовки в области силовой электроники для повышения квалификации.

Zinoviev G.S.

Fundamentals of power electronics: textbook. – Novosibirsk: NSTU, 2009.

The present textbook pursuant to a principle «three in one» is structured on three levels of depth and accessibility of presentation of a material. Two uppermost levels are intended for «experts» in a power electronics engineering (magistrate and engineering branch of training). The lower level is intended for «nonexperts» on a power electronics engineering, for whom this course is common technical course (students of electro technical engineering, electro power engineering, radio engineering specialities). A dominating method of the analysis of a power electronics converters in the textbook is by an authoring direct computational method of power processes. This method does not require the solution of differential equations.

All chapters of the textbook are supplied with the review questions (tests in electronic version of the textbook) and problems.

УДК 621.314.2(075.8)

ISBN 5-7782-0464-7

© Зиновьев Г. С., 2000

© Зиновьев Г. С., 2002, 2004, 2009 с

изменениями

© Новосибирский государственный
технический университет, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Здравствуй, племя
младое, незнакомое

А. С. Пушкин

В электроэнергетике существуют источники постоянного и переменного тока. Абсолютно подавляющая часть электрической энергии для сетей общего пользования вырабатывается трехфазными синхронными генераторами со стандартным уровнем напряжения (неодинаковым в разных странах) и частоты (50 Гц – в России и странах Западной Европы, 60 Гц – в США, Канаде, половине стран Центральной и Южной Америки и др.). В автономных системах электроснабжения для производства электрической энергии используют асинхронные генераторы, а в отдельных случаях – специальные электрические машины, как правило, с повышенной частотой (400, 800, 1200 Гц и выше).

К первичным источникам электроэнергии постоянного тока относятся генераторы, аккумуляторы, солнечные и тепловые элементы, МГД-генераторы.

В соответствии с двумя видами источников существуют и два вида потребителей переменного тока (одно- и многофазные) и потребители постоянного или пульсирующего однонаправленного тока.

Для наиболее эффективного использования электрической энергии, генерируемой с постоянными параметрами, различные потребители требуют использования электрической энергии с нестандартными параметрами: частотой, регулируемым напряжением, другим числом фаз, нежели в источнике энергии. Поэтому необходимы преобразователи электроэнергии между источником и потребителем. В развитых странах сегодня примерно 40 % вырабатываемой электроэнергии перед использованием подвергаются преобразованию. Как, например, в хлебопечении, где

из двух зерновых культур – пшеницы и ржи – выпекают много различных видов хлебобулочных изделий, из которых пользователь выбирает нужный ему.

Силовая электроника является сегодня электротехнической отраслью, продукция которой жизненно необходима всем другим электротехническим и электроэнергетическим отраслям промышленности. В подтверждение этого ниже приводятся следующие данные [1–34]:

1. Объем годового потребления в мире равен $(8...12) \cdot 10^{12}$ кВт·ч. Ежегодные затраты на производство электроэнергии составляют 400...500 млрд долл., причем из них 72...78 млрд долл. приходится на прямые потери генерирующих, передающих и потребляющих объектов.

2. Основными потребителями электроэнергии сегодня являются электроприводы различного назначения (51 %), освещение (19 %), нагрев/охлаждение (16 %), телекоммуникации (14 %).

3. В настоящее время в мире менее 25 % энергии используются оптимально для совершения требуемой работы (в смысле минимизации потерь). Это достигается применением высокоэффективных методов управляемого преобразования электроэнергии сети в энергию управления объектом. В основе большинства таких методов лежит использование высокоэффективных преобразователей электрической энергии (устройств силовой электроники).

Ниже перечислены области применения устройств силовой электроники и приведены оценки экономического эффекта от их применения [34]:

1) средства регулирования производительности технологических цепей ТЭС и ГЭС (сокращение на 30...40 % энергопотребления предприятий для собственных нужд, снижение себестоимости 1 кВт·ч на 7...10 %);

2) регулируемые электроприводы общепромышленного назначения (60...70 млрд долл.);

3) коммунальное хозяйство, уличное освещение натриевыми лампами высокого давления, освещение общественных помещений компактными люминесцентными лампами с электронной регулируемой аппаратурой (90 ... 120 млрд долл.);

4) бытовая электроника: пылесосы, холодильники, светильники, стиральные машины, индукционные плиты (только для 10 % холодильников за три года – 1 млрд долл.);

5) автомобильная электроника (29 млрд долл. при экономии топлива 10 %);

6) повышение эффективности источников электропитания (2...3 млрд долл.).

Промышленный электропривод, управляемый с помощью полупроводникового преобразователя электрической энергии, экономит до 40 % электроэнергии по сравнению с нерегулируемым электроприводом. В настоящее время доля регулируемых электроприводов в мировых технологиях не превышает 40 %. Использование управляемого электропривода в тех областях, где это возможно, должно приводить к ежегодной экономии в 72 млрд долл.

Каждый год для целей освещения продаются около 10 млрд ламп накаливания и 500 млн люминесцентных ламп. Люминесцентная лампа с электронным балластом в пять раз эффективнее лампы накаливания, она служит в десять раз дольше, экономит до 30 долл. за время службы. Потенциал экономии – 119 млрд долл. Натриевая лампа высокого давления с электронной пускорегулирующей аппаратурой эффективнее ртутно-дроссельных ламп, применяемых для уличного освещения, в 2,5 раза. Использование натриевых ламп с этой целью позволит сэкономить 200 млрд долл.

Повышение эффективности источников вторичного электропитания за счет использования импульсных способов преобразования электрической электроэнергии имеет потенциал экономии 2,5 млрд долл.

Применение устройств силовой электроники в автомобилестроении (например, в системах торможения, управления двигателем, системе стартер – генератор) уже при 10%-ной экономии топлива может сэкономить 29 млрд долл. на парке 500 млн автомобилей.

Применение полупроводниковых преобразователей электрической энергии для регулирования производительности технологических цепей ТЭС уменьшает на 30 ...40 % энергопотребление на собственные нужды, что приводит к снижению себестоимости 1 кВт·ч на 7...10 %.

Массовым потребителем устройств силовой электроники является бытовая техника. Большой объем выпуска бытовых приборов определяет большой резерв энергосбережения, несмотря на малый уровень потребления мощности отдельным прибором.

Наиболее энергоемкими потребителями в быту являются кондиционеры, индукционные плиты, стиральные машины, холодильники, светильники. Использование в холодильниках регулируемого компрессора позволит в среднем экономить 40 % электроэнергии, а также приведет к снижению общей цены

холодильника (экономия для 200-литровых холодильников составит 70 долл. в год). К 2003 году при переводе 10 % холодильников на регулируемый компрессор ежегодная экономия может составить 1 млрд долл.

Стиральная машина с интеллектуальным силовым регулятором режимов работы экономит 60 % воды. Индукционная плита имеет КПД выше 90 % вместо 50 % у электроплит. Светильник бытового освещения с люминесцентной лампой 20 Вт заменяет лампу накаливания 100 Вт.

Значения удельной стоимости устройств силовой электроники лежат в диапазоне 0,08...2 долл./Вт. Эта величина примерно обратно пропорциональна мощности устройства. Потенциальный объем российского рынка для систем силовой электроники на ближайшее десятилетие может быть оценен величиной от 4 до 6 млрд долл. в год в зависимости от сценария развития российской энергетики. В мировой практике стоимость полупроводниковых силовых приборов составляет одну треть от стоимости систем силовой электроники.

По свидетельству IEEE PELS (Международного общества по силовой электронике), на Западе наступил «ренессанс» в области силовой электроники и в ближайшие годы потребуются порядка 100 тысяч новых специалистов в этой области. В последнее время наблюдается «оживление» промышленности в России. Таким образом, очевидно наличие актуальной проблемы обеспечения учебного процесса современной учебной литературой по силовой электронике.

Повсеместное распространение различного электрооборудования и электромеханизмов, оснащенных разнообразными устройствами силовой электроники, порождает две проблемы для учебного процесса по указанной дисциплине. Во-первых, необходимы учебные пособия по основам силовой электроники, предназначенные для инженерно-технических работников электроэнергетических и электротехнических специальностей, для кого эта дисциплина является только общетехнической. Эти специалисты должны быть знакомы с устройствами силовой электроники, входящими в эксплуатируемые ими устройства, или связаны с проектированием электрооборудования, в состав которого входят готовые промышленные устройства силовой электроники. Во-вторых, требуются учебные пособия по основам силовой электроники, ориентированные на подготовку специалистов именно по разработке и исследованию самих устройств силовой электроники.

Здесь просматриваются задачи разработки (инженерного плана) и задачи исследования новых режимов и устройств (научного, «магистерского» плана). Это еще раз доказывает необходимость дифференцированного (трехуровневого) структурирования материала по учебной дисциплине «Силовая электроника» в рамках одного учебного пособия.

Сегодня учебной литературы для «неспециалистов» немного и большая ее часть написана десять лет назад [1 – 6], кроме последнего «отраслевого» учебника для вузов железнодорожного транспорта [7]. Для такой интенсивно развивающейся отрасли, как силовая электроника, этого явно недостаточно. Высокоэффективные новые полупроводниковые приборы (GTO-тиристоры, IGBT-транзисторы, «интеллектуальные модули») привели к появлению новых технических решений устройств силовой электроники. Новые алгоритмы управления этими устройствами в учебной литературе еще не освещены.

В настоящее время учебной литературы для «специалистов» по силовой электронике, отвечающей современным требованиям, в России практически нет, так как изданные в СССР учебники и учебные пособия [8 – 11] и справочники [12 – 14] отстают от сегодняшних проблем силовой электроники еще далее, чем книги для «неспециалистов» от их проблем.

В НГТУ издавалась учебная [15 – 20] и научная [21] литература, поддержанная компьютерными курсами лабораторных работ [22 – 25]. Ряд учебных пособий и методических руководств по практическим и лабораторным работам был написан на кафедре промышленной электроники [26 – 33]. Сегодня этих изданий также недостаточно.

Основой единого подхода к изложению учебного материала в настоящем пособии является то положение, что его глубина определяется принятой степенью точности математической модели изучаемой системы. Начав изложение с идеализированных моделей, легко получить простые аналитические соотношения для базовых систем, знание которых необходимо и для неспециалистов и для специалистов. Затем последовательно по мере усложнения математической модели излагаются более углубленные теории изучаемой системы. На этом пути восхождения от общего простого к специальному сложному каждый обучающийся достигнет своей вершины.

Использованный в данном издании подход к изложению материала рассчитан на три уровня подготовки («три в одном»). Материал, отмеченный вертикальной полосой на полях и

звездочками в названии раздела, не предназначен для «неспециалистов», из приведенных аналитических соотношений им необходимо знать только те, номера которых набраны жирным шрифтом. «Специалистам» второго уровня подготовки отнесены дополнительно разделы с названиями, имеющими одну звездочку, а специалистам третьего уровня – разделы с двумя звездочками.

Отбор материала для пособия и его изложение выполнены на основе государственных образовательных стандартов соответствующих специальностей. Если ранжировать предмет по единой шкале, то на первом уровне изучения требуется «знать», на втором – «уметь», на третьем – «владеть материалом».

Структура данного издания такова. В первой главе дана концепция анализа устройств силовой электроники, кратко изложена методология, описан опыт ее применения к вентильным преобразователям, приведены основные критерии качества электромагнитных процессов и устройств. Дан набор элементов базовых ячеек, и приведены схемы базовых ячеек вентильных преобразователей. Рассмотрены методы расчета показателей качества с подробным описанием прямого метода. Приведен краткий обзор доступных программных комплексов моделирования устройств силовой электроники, дано достаточно подробное описание программы ParGraph-Parus, разработанной на кафедре промышленной электроники НГТУ, которая является основой для лабораторных работ по курсу «Основы силовой электроники», выполняемых на компьютере.

В гл. 2 и 3 сделан системный анализ выпрямителя и зависимого инвертора, т.е. системы для преобразования переменного тока в постоянный и наоборот, постоянного тока в переменный. В разд. 2.1 процедура анализа конкретизирована для выпрямителя, а вся вторая глава посвящена анализу базовых схем выпрямителей, выполненных на идеальных элементах. Третья глава посвящена анализу процессов в обобщенном вентильном преобразователе с естественной коммутацией (выпрямителе и зависимом инверторе) с учетом реальных параметров схемы, т.е. глава нацелена на получение общих закономерностей управляемого выпрямления и обратного ему процесса – зависимого инвертирования. Всестороннее изучение работы этого старейшего класса вентильных преобразователей является как бы прообразом системного анализа и других классов вентильных преобразователей, которые в книге рассмотрены менее детально.

В гл. 4 приведен модельный пример для курсового проектирования выпрямителя. Подобным способом должны проектироваться в курсовых работах и другие типы

преобразователей на основе изучаемых далее их базовых схем. Новым при курсовом проектировании является то, что результаты расчета по проекту можно проверить математическим моделированием спроектированного преобразователя с помощью программы ParGraph–Parus.

В гл. 5 приведены результаты развития аналитических прямых (без решения дифференциальных уравнений) методов расчета устройств силовой электроники, эквивалентируемых математическими моделями любого порядка. Предварительного знакомства с этими моделями в разд. 1.5 было достаточно для понимания материала второй, третьей и четвертой глав, но недостаточно для изложения последующего материала.

Шестая глава, новая для учебной литературы по силовой электронике, посвящена проблеме электромагнитной совместимости вентильных преобразователей с сетью и окружающей средой.

В гл. 7 (уже в одном месте, а не в двух главах – второй и третьей, как это первоначально было сделано для выпрямителей) также на двух уровнях точности математической модели рассмотрены преобразователи постоянно-постоянного напряжения. Этот класс преобразователей, как и преобразователи предыдущего класса с выходом на постоянном токе, является основой для построения преобразователей с выходом на переменном токе при рассмотрении (в конструктивном методическом приеме) переменного тока как периодически реверсируемого (переключаемого по направлению) постоянного тока. В гл. 8 рассматриваются преобразователи постоянного тока в переменный (автономные инверторы), в гл. 9 – преобразователи переменного тока в переменный без изменения частоты тока на выходе (регуляторы переменного напряжения), в гл. 10 – преобразователи переменного тока в переменный с изменением выходной частоты (преобразователи частоты).

В гл. 11 приведен достаточно новый для учебной литературы по силовой электронике материал по специфическим типам преобразователей – компенсаторам неактивных составляющих полной мощности, призванным улучшать электромагнитную совместимость с питающей сетью любых нелинейных потребителей электрической энергии.

Общие классические принципы управления вентилями устройств силовой электроники всех типов, а также новые тенденции в управлении (обобщенный вектор, интеллектуальное управление) рассмотрены в гл. 12.

В гл. 13 собраны основные модификации базовых схем преобразователей различных классов.

В списке литературы приведены использованные и рекомендуемые для дальнейшего изучения книги и статьи.

Учебное пособие снабжено предметным указателем по техническим терминам силовой электроники (выделены в тексте курсивом) и кратким англо-русским словарем, дополняющим ранее изданный Обществом силовой электроники английский словарь терминов.

В целом материал учебного пособия отражает опыт 30-летнего преподавания автором курса силовой электроники в Новосибирском государственном техническом университете.

Автор, являющийся поклонником А.С. Пушкина, в год 200-летнего юбилея со дня рождения поэта, когда был задуман учебник и издана его первая часть, не мог по-своему не откликнуться на это событие. Помня слова Н.В. Гоголя: «...Пушкин есть явление чрезвычайное и, может быть, единственное явление русского духа: это русский человек в его развитии, в каком он, может быть, явится через двести лет», – автор взял строки поэта в качестве эпиграфов к главам пособия.

Учитывая первый опыт подобного построения учебного издания («три в одном»), автор с благодарностью рассмотрит все замечания и предложения и наиболее конструктивные из них учтет в последующих изданиях. Автор выражает благодарность аспирантам М. Ганину, Е. Левину, А. Обухову, студентам А. Зимину, И. Проскурину за помощь в расчетах и оформлении рисунков, особую признательность – М. Гнатенко за помощь в моделировании и непрерывное совершенствование программы ParGraph и Л.А. Ларичевой за печать рукописи.

В третьем издании книги исправлены замеченные опечатки, в разд. 13.7 добавлен материал по двуступенчатым непосредственным преобразователям частоты.

В список литературы внесены монография Т.А. Глазенко (к гл. 7) и две книги С.Г. Германа-Галкина по моделированию в MatLab 6.0 вентильных преобразователей. Появились четыре приложения: Приложение 1 и Приложение 2 – Интегральные драйверы, Приложение 3 – Интеллектуальный силовой модуль, Приложение 4 – Готовый силовой преобразователь.

В четвертом издании книги исправлены замеченные опечатки. В список литературы внесен доклад по матричным преобразователям [202], три новых монографии по преобразовательной технике [213–215], выпущенные в 2004–2005 гг., и новый учебник по силовой электронике [216].



Глава 1

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Цели нет передо мною
Сердце пусто, празден ум...

О, сколько нам открытий чудных
Готовит просвещенья дух...

А. С. Пушкин

Глава посвящена изучению общих вопросов анализа всех устройств силовой электроники. Методологической основой анализа является системный подход (разд. 1.1). Энергетические показатели качества преобразования электрической энергии вентильными преобразователями, свойства элементов, из которых строятся вентильные преобразователи, приведены в разд. 1.2 и 1.3, а виды преобразователей электрической энергии описаны в разд. 1.4. В разд. 1.5 и 1.6 рассматриваются возможности математических методов анализа устройств силовой электроники аналитическими методами и методами компьютерного моделирования.

1.1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Изучение основ силовой электроники прежде всего опирается на анализ базовых типов устройств, т. е. на установление свойств устройств в функции их параметров. Классическая методология обучения носит индуктивный характер, предполагая движение от частного к общему, от простого к сложному. Но по мере усложнения изучаемых устройств появляется необходимость проводить однотипное по подходу и эффективное по результату исследование любых сложных устройств заданного назначения. Такой подход к исследованию, интенсивно развиваемый в предшествующие несколько десятилетий, получил название *системного подхода*, который предполагает:

- 1) установление границ исследуемой системы заданного назначения как целого, т. е. выделение из окружающей ее среды;
- 2) определение целей системы, критериев качества ее функционирования и методов их расчета;
- 3) декомпозиция системы на составные части или подсистемы, которые на более низком уровне иерархии рассматриваются как подсистемы, точно так же, как сама исследуемая система является частью надсистемы;
- 4) изучение системы во всех требуемых целевым назначением аспектах с учетом всех значимых связей как между частями системы одного уровня, так и между различными уровнями.

Классический подход к исследованию основывается на том, что свойства целого (системы) определяются главным образом свойствами составляющих его элементов (подсистем). Системный же подход основывается на другой парадигме: система не детерминируется однозначно совокупностью элементов и не сводится к ним, а, наоборот, элементы детерминируются целым, в рамках которого они и получают свое функциональное назначение; при этом у системы в целом появляются новые свойства, отсутствующие у ее элементов.

Применительно к изучаемым в курсе устройствам силовой электроники указанные четыре принципа системного подхода заключаются в следующем.

Во-первых, устройство преобразования электрической энергии из одного вида в другой рассматривается не само по себе, а в совокупности с источником питания на входе и нагрузкой (потребителем) на выходе. Эта триада и составляет предмет исследования. Кроме того, выявляются все виды

полупроводниковых устройств преобразования электрической энергии в соответствии с их назначением.

Во-вторых, определяется необходимый набор энергетических критериев качества создания и функционирования устройств силовой электроники и рассматриваются существующие методы их расчета.

В-третьих, производится декомпозиция устройств силовой электроники для упрощения анализа на функциональном и структурном уровнях.

В общем случае любое преобразовательное устройство должно реализовать совокупность следующих функциональных операций:

- собственно преобразования рода тока;
- регулирования параметров преобразованной энергии (постоянной составляющей в цепях постоянного тока, первой гармоники или действующего значения в цепях переменного тока);
- согласования уровней напряжения источника питания и нагрузки преобразователя;
- потенциальной изоляции (при необходимости) источника питания и нагрузки;
- электромагнитной совместимости преобразователя с источником питания и нагрузкой.

Первые две операции в устройствах силовой электроники реализуются посредством полупроводниковых управляемых вентилях, следующие две – с помощью трансформатора на входе, внутри или на выходе устройства, а последняя операция – с помощью пассивных (LC) или активных (управляемая генерация напряжения или тока требуемой формы) фильтров.

Структурная декомпозиция устройств силовой электроники в книге выполняется на двух уровнях. На верхнем уровне сложная преобразовательная система разделяется на элементарные базовые ячейки, характеризующиеся однократностью преобразования вида электрической энергии (например, переменный ток – постоянный ток). На нижнем уровне элементарные базовые преобразователи рассматриваются как совокупность трансформатора, вентиляжного комплекта, фильтров, системы управления.

В-четвертых, системный подход к исследованию устройств силовой электроники в соответствии с целевым назначением курса реализуется здесь главным образом в энергетическом аспекте. При анализе электромагнитных процессов в исследуемых устройствах приняты следующие классы допущений.

1. Все элементы преобразователя – идеальные (без потерь), питающая сеть – источник бесконечной мощности (тоже без

потерь внутри источника), нагрузка также идеализирована. Процедура исследования элементарна.

2. Учитываются реальные параметры элементов преобразовательного устройства и питающей сети, нагрузка преобразователя остается идеализированной. Процедура исследования остается простой и аналитической.

3. При третьем уровне анализа все элементы триады (питающая сеть – преобразователь – нагрузка) замещаются моделями с реальными параметрами элементов. Процедура анализа заметно усложняется, и не всегда возможно обойтись без средств вычислительной техники.

Такой подход позволяет наращивать мощность анализа по мере изложения материала и углубления исследования, обеспечивая в то же время вложенность результатов низких уровней анализа как частных случаев в результаты более высоких уровней. Это, в свою очередь, позволяет проследить влияние учета реальных параметров отдельных элементов системы на характеристики системы.

1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ВЕНТИЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Преобразование электрической энергии в устройствах силовой электроники характеризуется энергетическими показателями электромагнитных элементов и устройства в целом, определение которых и составляет цель этого раздела.

1.2.1. Энергетические показатели качества электромагнитных процессов

Важнейшими из этих показателей являются следующие.

1. Коэффициенты преобразования по напряжению и току

$$K_{н.п} = \frac{U_{\text{ВЫХ.П}}}{U_{\text{ВХ.П}}}, \quad K_{т.п} = \frac{I_{\text{ВЫХ.П}}}{I_{\text{ВХ.П}}}, \quad (1.2.1)$$

которые определяются в режимах, соответствующих максимально возможному напряжению на выходе преобразователя, т. е. при отсутствии его регулирования, для полезных составляющих напряжения и тока. В цепях переменного тока полезными составляющими, переносящими активную мощность, являются, как правило, первые гармоники напряжения и тока, а в цепях постоянного тока – средние значения величин в них.

2. Коэффициенты искажения тока и напряжения

$$\nu_I = \frac{I_{(1)}}{I}, \quad (1.2.2)$$

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. Научно-технические и методологические основы исследования устройств силовой электроники	13
1.1. Системный подход к анализу устройств силовой электроники	13
1.2. Энергетические показатели качества преобразования энергии в вентильных преобразователях.....	16
1.2.1. Энергетические показатели качества электромагнитных процессов	16
1.2.2. Энергетические показатели качества использования преобразовательного устройства и его элементов	19
1.3. Элементная база вентильных преобразователей	22
1.3.1. Силовые полупроводниковые приборы	22
1.3.2. Трансформаторы и реакторы	32
1.3.3. Конденсаторы.....	33
1.4. Виды вентильных преобразователей электрической энергии.....	35
1.5. Методы расчета энергетических показателей преобразователей.....	39
1.5.1. Математические модели вентильных преобразователей.....	39
1.5.2. Методы расчета энергетических показателей преобразователей.....	40
1.6. Компьютерные программы математического моделирования и анализа устройств силовой электроники	56
1.6.1. Обзор существующих программных продуктов	56
1.6.2. Описание программы ParGraph	59
Контрольные вопросы	68
Упражнения	69
Глава 2. Теория преобразования переменного тока в постоянный при идеальных параметрах преобразователя	70
2.1. Выпрямитель как система. Основные определения и обозначения ..	70
2.2. Механизм преобразования переменного тока в выпрямленный в базовой ячейке ДТ/ОТ	75
2.3. Двухфазный выпрямитель однофазного тока ($m_1 = 1, m_2 = 2, q = 1$) .	80
2.4. Выпрямитель однофазного тока по мостовой схеме ($m_1 = m_2 = 1, q = 2$)	88
2.5. Выпрямитель трехфазного тока со схемой соединения обмоток трансформатора треугольник–звезда с нулевым выводом ($m_1 = m_2 = 3, q = 1$)	90
2.6. Выпрямитель трехфазного тока со схемой соединения обмоток трансформатора звезда – зигзаг с нулем ($m_1 = m_2 = 3, q = 1$)	97

2.7. Шестифазный выпрямитель трехфазного тока с соединением вторичных обмоток трансформатора звезда – обратная звезда с уравнительным реактором ($m_1 = 3, m_2 = 2 \times 3, q = 1$)	102
2.8. Выпрямитель трехфазного тока по мостовой схеме ($m_1 = m_2 = 3, q = 2$).....	109
2.9. Управляемые выпрямители. Регулировочная характеристика	114
Контрольные вопросы	117
Упражнения	118
Глава 3. Теория преобразования переменного тока в постоянный с учетом реальных параметров элементов преобразователя..	119
3.1. Процесс коммутации в управляемом выпрямителе с реальным трансформатором. Внешняя характеристика	120
3.2. Работа выпрямителя на противоЭДС при конечном значении сглаживающей индуктивности	127
3.2.1. Режим прерывистого тока ($\lambda < 2\pi/qm_2$)	128
3.2.2. Режим предельно-непрерывного тока ($\lambda = 2\pi/qm_2$)	131
3.2.3. Режим непрерывного тока ($\lambda > 2\pi/qm_2$)	131
3.3. Работа выпрямителя с конденсаторным сглаживающим фильтром .	134
3.4. Обращение потока активной мощности в преобразователе. Режим зависимого инвертирования	136
3.4.1. Зависимый инвертор однофазного тока ($m_1 = 1, m_2 = 2, q = 1$)	137
3.4.2. Зависимый инвертор трехфазного тока ($m_1 = 3, m_2 = 3, q = 1$)	143
3.5.* Общая зависимость первичного тока выпрямителя от анодного и выпрямленного токов (закон Чернышева)	145
3.6. Спектры первичных токов трансформаторов выпрямителей и зависимых инверторов	149
3.7. Спектры выпрямленного и инвертируемого напряжений вентильного преобразователя	153
3.8. Оптимизация числа вторичных фаз трансформатора выпрямителя. Эквивалентные многофазные схемы выпрямления	155
3.9.* Влияние коммутации на действующие значения токов трансформатора и его типовую мощность	160
3.10. КПД и коэффициент мощности вентильного преобразователя в режиме выпрямления и зависимого инвертирования	162
3.10.1. Коэффициент полезного действия	162
3.10.2. Коэффициент мощности	164
3.11. Выпрямители на полностью управляемых вентилях	166
3.11.1.* Выпрямитель с опережающим фазовым регулированием	166
3.11.2.* Выпрямитель с широтно-импульсным регулированием выпрямленного напряжения	168
3.11.3. Выпрямитель с принудительным формированием кривой тока, потребляемого из питающей сети	170
3.12. Реверсивный вентильный преобразователь (реверсивный выпрямитель)	175

3.13. Обратное влияние вентильного преобразователя на питающую сеть.....	178
Контрольные вопросы	182
Упражнения	183
Глава 4.* Модельный пример проектирования выпрямителя	185
4.1. Выбор схемы выпрямителя (этап структурного синтеза)	186
4.2. Расчет параметров элементов схемы управляемого выпрямителя (этап параметрического синтеза)	189
4.2.1. Оценка элементов идеального выпрямителя.....	190
4.2.2. Расчет выпрямителя с учетом реальных параметров элементов схемы	193
4.3 Проверка результатов расчета математическим моделированием в среде Paras-ParGraph.....	196
Глава 5.* Развитие теоретических методов анализа устройств силовой электроники.....	200
5.1.** Обобщение прямых методов расчета для моделей вентильных преобразователей типа вход – выход.....	200
5.1.1. Общие основы метода алгебраизации дифференциальных уравнений (АДУ1).....	201
5.1.2. Вторая версия метода алгебраизации дифференциальных уравнений (АДУ2).....	208
5.1.3. Вывод общих выражений для модуля комплексного сопротивления	211
5.1.4. Методы получения интегральных коэффициентов гармоник	214
5.2. Развитие прямых методов расчета вентильных преобразователей в пространстве состояний по первой гармонике.....	219
5.2.1. Постоянные коэффициенты системной матрицы A	221
5.2.2.* Переменные коэффициенты системной матрицы A	224
5.3.* Развитие прямых методов расчета энергетических показателей вентильных преобразователей в пространстве состояний	228
5.4. Прямые методы расчета энергетических показателей в трехфазных цепях с вентильными преобразователями	234
5.5.** Точные решения для норм прямыми методами.....	239
5.5.1. Параллельная <i>RL (RC)</i> -цепь	239
5.5.2. Последовательная <i>RL (RC)</i> -цепь	241
5.5.3. Параллельная <i>RLC</i> -цепь	243
5.5.4. Последовательная <i>RLC</i> -цепь	244
5.5.5. Цепи <i>N</i> -го порядка	247
5.6. Дискретные модели вентильных преобразователей.....	248
5.6.1. Составление разностных уравнений и их решение для выпрямителя.....	248
5.6.2.** Модель широтно-импульсного преобразователя постоянного тока как импульсной системы	255
Контрольные вопросы.....	264
Упражнения	265

Глава 6. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники	266
6.1. Содержание проблемы электромагнитной совместимости	266
6.2. Качество электрической энергии в сетях общего пользования.....	271
6.2.1. Система показателей качества электрической энергии и их нормы	271
6.2.2. Общая оценка кондуктивного обратного влияния вентиляционных преобразователей на питающую сеть	280
6.2.3. Определение вкладов нелинейных потребителей в искажение напряжения питающей сети в точке общего присоединения.....	285
6.3. Помехоустойчивость электротехнических и электронных технических систем с устройствами силовой электроники.....	290
6.4.* Помехоэмиссия устройств силовой электроники.....	295
6.5.* Особенности стандартов на качество электрической энергии в автономных системах электроснабжения	304
6.6.* Проблемы теории мощности при несинусоидальных напряжениях и токах	309
6.6.1. Подход к определению реактивных мощностей	309
6.6.2. Подходы к определению полной мощности и ее составляющих	314
6.6.3. Способы разложения мгновенной мощности электрической цепи	320
Контрольные вопросы	329
Упражнения	330
Глава 7. Преобразователи постоянного напряжения в постоянное ...	331
7.1. Широтно-импульсные преобразователи постоянного напряжения ..	332
7.1.1. Схемы широтно-импульсных преобразователей	332
7.1.2. Характеристики ШИП при реальных параметрах элементов	339
7.1.3. Достоинства и недостатки широтно-импульсных преобразователей.....	343
7.2. Преобразователи с управляемым обменом энергии между реактивными элементами схемы	343
7.2.1. Повышающий преобразователь	343
7.2.2. Повышающе-понижающие преобразователи	348
7.2.3. Преобразователи с трансформаторной развязкой входа и выхода	355
7.3.* Преобразователи с использованием резонансных явлений LC-контуров	357
7.3.1. Квазирезонансный понижающий преобразователь с переключением при нулевом токе (КРП-ПНТ)	359
7.3.2. Квазирезонансный понижающий преобразователь с переключением при нулевом напряжении (КРП-ПНН)	362
7.4.* Преобразователи с дозированной передачей энергии в нагрузку ...	364
7.5.* Метод осреднения переменных состояний	368
Контрольные вопросы	375
Упражнения	376

Глава 8. Преобразователи постоянного напряжения в переменное – автономные инверторы	377
8.1. Инверторы тока	378
8.1.1. Параллельный инвертор тока	379
8.1.2. Развитие схемотехники инверторов тока	384
8.2. Резонансные инверторы	394
8.2.1. Параллельный и последовательно-параллельный резонансные инверторы с закрытым входом	394
8.2.2. Резонансные инверторы с открытым входом	396
8.2.3.* Резонансные инверторы с умножением частоты	406
8.3. Инверторы напряжения	412
8.3.1. Однофазные инверторы напряжения	412
8.3.2. Базовые схемы трехфазных инверторов напряжения	419
8.3.3. Трехуровневый трехфазный инвертор	437
8.3.4. Пятиуровневые и <i>m</i> -уровневые инверторы напряжения	439
Контрольные вопросы	442
Упражнения	443
Глава 9. Регуляторы переменного напряжения	444
9.1. Классификация регуляторов переменного напряжения.....	444
9.2. Регуляторы с фазовым способом регулирования	445
9.2.1. Базовые схемы регуляторов	445
9.2.2. Основные характеристики регуляторов	448
9.3. Регуляторы с вольтодобавкой	451
9.4. Регуляторы с широтно-импульсным способом регулирования	453
9.4.1. Базовые схемы и способы регулирования	453
9.4.2. Основные характеристики регуляторов	456
9.5.* Повышающе-понижающие регуляторы (регуляторы с коэффициентом преобразования по напряжению больше единицы)	459
9.5.1. Схемы регуляторов	459
9.5.2. Основные характеристики регуляторов	463
Контрольные вопросы	468
Упражнения	468
Глава 10. Преобразователи переменного тока в переменный – преобразователи частоты	469
10.1. Непосредственные преобразователи частоты на вентилях с неполным управлением	471
10.1.1. Принцип действия преобразователя	471
10.1.2. Основные характеристики преобразователя	477
10.2. Непосредственные преобразователи частоты на вентилях с полным управлением и циклическим методом формирования кривой выходного напряжения	480
10.2.1. Принцип действия преобразователя	480
10.2.2. Основные характеристики преобразователя	484
10.3.* Непосредственные преобразователи частоты с коэффициентом преобразования по напряжению больше единицы (повышающие циклоконвертеры)	487

Контрольные вопросы	490
Упражнения	491
Г л а в а 11. Вентильные компенсаторы неактивных составляющих полной мощности	492
11.1. Компенсаторы реактивной мощности	493
11.1.1. Конденсаторы, коммутируемые тиристорами (ККТ)	493
11.1.2. Реакторы, управляемые тиристорами (ПУТ)	494
11.1.3. Конденсаторно-реакторные компенсаторы реактивной мощности	496
11.1.4.* Компенсаторы с вентильным источником реактивного на- пряжения	497
11.2. Компенсаторы мощности искажений – активные фильтры	499
Контрольные вопросы	502
Упражнения	503
Г л а в а 12. Методы и системы управления вентильными преобразо- вателями	504
12.1. Требования к системам управления	504
12.2. Многоканальная синхронная разомкнутая система управления «вертикального» типа.....	508
12.2.1. Структура системы	508
12.2.2. Передаточные характеристики системы	509
12.3. Одноканальная синхронная система управления вертикального типа	513
12.4. Одноканальная асинхронная система управления непрерывного слежения	514
12.5. Особенность управления «узким» импульсом трехфазной мосто- вой схемой вентильного преобразователя	519
12.6. Особенности управления преобразователями с широтно- импульсным регулированием	520
12.6.1. Системы с вертикальным способом управления.....	520
12.6.2. Системы со следящим способом управления	523
12.7.* Особенности управления преобразователями на вентильях с пол- ным управлением при синусоидальной широтно-импульсной моду- ляции.....	526
12.7.1. Системы вертикального управления с формированием фаз- ных напряжений трехфазного инвертора	527
12.7.2. Системы управления с регулированием компонентов обобщенного вектора напряжения (тока).....	535
12.7.3. Системы управления инверторами со слежением за токами	539
12.8.* Системы управления с элементами искусственного интеллекта ...	541
12.8.1. Понятие о нечетких множествах	541
12.8.2. Структура системы нечеткого управления ДТ-ОТ преобра- зователем в системе электропривода постоянного тока	543
12.8.3. Системы управления с использованием нейронных сетей...	549
Контрольные вопросы	555
Упражнения	557

Глава 13. Семейства модифицированных базовых схем устройств силовой электроники	558
13.1. Выпрямители с улучшенным коэффициентом мощности за счет изменения силовой схемы.....	559
13.1.1. Схема с нулевым вентилем	559
13.1.2. Полууправляемые мостовые схемы	565
13.1.3. Выпрямители со встречно-параллельным включением вентилей в первичной обмотке трансформатора.....	569
13.1.4. Выпрямители со ступенчатым регулированием вторичного напряжения	571
13.1.5. Выпрямители с улучшенным коэффициентом мощности за счет изменения алгоритма управления	573
13.2. Выпрямители-умножители и выпрямители-делители напряжения	577
13.2.1. Выпрямители-умножители однофазного напряжения	577
13.2.2. Выпрямители-умножители трехфазного напряжения	579
13.2.3.* Выпрямители-делители напряжения	580
13.3. Составные выпрямители с промежуточным звеном высокой частоты	582
13.3.1*. Подход к формализации поиска структур составных выпрямителей	582
13.3.2. Выпрямители с высокочастотными инверторами	588
13.3.3.* Выпрямители с высокочастотными регуляторами переменного напряжения	591
13.3.4. Выпрямители с преобразователями постоянного напряжения с управляемым обменом энергией между реактивными элементами схемы	593
13.4. Выпрямители с коррекцией входного коэффициента мощности.....	594
13.4.1. Выпрямители однофазного тока	595
13.4.2. Выпрямители трехфазного тока	598
13.4.3. Улучшение электромагнитной совместимости с сетью классических схем выпрямителей за счет активных фильтров тока	607
13.5.* Разновидности преобразователей постоянного напряжения в постоянное	609
13.6. Развитие схемных решений автономных инверторов	614
13.6.1. Трехфазные инверторы с дополнительным плечом.....	614
13.6.2. Составные многоуровневые инверторы.....	616
13.6.3. Инверторы напряжения с однополярным выходным током	620
13.7.* Разновидности преобразователей частоты с непосредственной связью (матричных преобразователей).....	623
Контрольные вопросы	629
Упражнения	630
Литература	632
Приложения	643
Предметный указатель.....	649
Англо-русский словарь по силовой электронике	655
Содержание на английском языке	668