

КОМПОНЕНТЫ И ТЕХНОЛОГИИ
СЕРИЯ



Б. Ю. Семенов

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Профессиональные решения

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА



Калейдоскоп преобразовательной техники
Самое главное об элементной базе
Секреты конструирования
Нетрадиционные решения

ISBN 5-91359-097-8



9 785913 590978

УДК 621.38
ББК 32.85
С30

Семенов Б. Ю.

С30 Силовая электроника: профессиональные решения. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2011. — 416 с.: ил. (Серия «Компоненты и технологии»)

ISBN 978-5-91359-097-8 (СОЛОН-ПРЕСС)

ISBN 978-5-94074-711-6 (ДМК Пресс)

Силовая электроника — специфическая область инженерного знания, где многое определяется не столько сугубо теоретическими знаниями, сколько опытом, эрудицией, живым поиском путей проектирования надежной электронной техники. Пути решения той или иной технической проблемы силовой электроники могут быть весьма нетрадиционными, хотя существует ряд правил, без соблюдения которых точно ничего работоспособного разработать невозможно. Данная книга призвана помочь включиться в процесс разработки, конструирования и эксплуатации статических преобразователей электроэнергии на основе современных полупроводниковых силовых элементов. Книга адресована инженерно-техническим специалистам, занятым в процессе разработки, модернизации и ремонта изделий силовой электроники, студентам высших и средних учебных заведений, а также всем, кто интересуется проблемами преобразовательной техники.

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-ПРЕСС» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из трех способов:

1. Послать письмо с пустым конвертом по адресу: 123001, Москва, а/я 82.
2. Оформить заказ можно на сайте www.solon-press.ru в разделе «Книга — почтой».
3. Заказать по тел. (495) 254-44-10, (499) 252-36-96 или по e-mail: kniga@coba.ru.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте. Для этого присылайте конверт с маркой по адресу, указанному в п. 1.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет Вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-ПРЕСС», считав его с адреса www.solon-press.ru/kat.doc.

Интернет-магазин размещен на сайте www.solon-press.ru.

По вопросам приобретения обращаться:

Тел: (495) 254-44-104, (499) 795-73-26

Сайт издательства СОЛОН-ПРЕСС: www.solon-press.ru

E-mail: kniga@coba.ru

ISBN 978-5-91359-097-8 (СОЛОН-ПРЕСС)
ISBN 978-5-94074-711-6 (ДМК Пресс)

© Семенов Б. Ю., 2011
© СОЛОН-ПРЕСС, 2011
© ДМК Пресс, 2011

Глава 1

СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

1.1. Преобразовательная техника в современном мире

Попробуйте, уважаемые читатели, представить современный мир без электроэнергетики, и вам, вне всякого сомнения, станет грустно. Ибо на ум приходит картина из позапрошлого века: паровые машины, керосиновые лампы, гужевые повозки, конки. В этом мире, лишенном устройств получения и преобразования электроэнергии, мы не увидим на улицах ни автомобилей, ни трамваев, ни троллейбусов, ни «электричек», ни электрических фонарей. Мы не обнаружим в нем ни компьютеров, ни телефонов, ни радиоприемников с телевизорами. Огромное количество важных и полезных вещей станут ненужными только лишь потому, что их нечем будет питать. Отсюда мы без труда сможем заключить, что наличие электрической энергии — это необходимое условие для решения подавляющего большинства современных задач, которые ставит перед нами жизнь в нашем времени.

Практика XX в. показала, что электричество является наиболее удобным и универсальным видом энергии, который имеет смысл вырабатывать, передавать на большие расстояния и преобразовывать в другие виды энергии (механическую, тепловую и т. д.). Именно поэтому электроэнергетика заняла в нашей современной жизни столь прочное место. Но процесс выработки электроэнергии является достаточно сложным в техническом отношении, так что просчеты в этой области часто приводят к катастрофическим последствиям. Например, в результате техногенной катастрофы, случившейся в Москве весной 2005 г., когда произошло отключение электроэнергии в части районов города, только в одних лифтах было заблокировано 1500 человек, не говоря уже о прекращении подачи электроэнергии в системы обеспечения больниц, на дорожные светофоры, насосные станции подачи воды, холодильники. В декабре 2008 года в Каракасе, столице Венесуэлы, в результате короткого замыкания был полностью обесточен город, из-за чего жизнь в нем полностью парализовало. Властям пришлось вызволять людей из застрявших лифтов, закрывать метро и эвакуировать пассажиров. К счастью, нефтеперегонные заводы в пригородах Каракаса были оснащены собственными генераторами, так

что техногенных катастроф не произошло. По подсчетам специалистов, энергетическая катастрофа, случившаяся в 2003 г. в Нью-Йорке и продолжавшаяся 29 часов, обошлась США в 1 млрд долларов.

Один из существенных просчетов сегодняшнего времени, не приводящий к техногенным катастрофам, но, тем не менее, заставляющий задуматься специалистов — это невнимательное отношение к расходованию энергетических ресурсов. С детства нам знаком призыв «выходя — гасите свет». И эти слова нельзя назвать пустыми. Понятно, что любой производитель товара вынужден закладывать цену затраченных энергетических ресурсов (в том числе израсходованных «вхолостую», для работы малоэффективного оборудования) в стоимость своей продукции, а значит, растет ее цена и снижается конкурентоспособность на рынке аналогичных товаров. Именно поэтому во всем мире все больше и больше внимания уделяется проблемам энергосбережения, то есть повышения эффективности использования вырабатываемой энергии. Если до настоящего времени вопросы, связанные с расширением производства, решались простым увеличением потребления энергии, строительством новых электростанций, то сейчас перспективные фирмы стремятся использовать новое энергосберегающее оборудование, направляя на его приобретение значительную долю капиталовложений. Экономические расчеты показывают, что новые энергосберегающие технологии очень быстро окупаются по затратам, а рентабельность производства столь же стремительно растет.

Данные современных статистических исследований показывают, что около 65 % электрической энергии в мире потребляется электродвигателями различного назначения, например, насосами, вентиляторами, тягловыми электродвигателями электротранспорта. Классические нерегулируемые приводные электродвигатели на сегодняшний момент практически исчерпали свои возможности по повышению коэффициента полезного действия (КПД). Мощной альтернативой нерегулируемому электроприводу является использование так называемого **энергосберегающего регулируемого электропривода**. При использовании этой технологии электродвигатель подключается не непосредственно к сети переменного тока, а к специальному устройству с названием «статический преобразователь электроэнергии». Статический преобразователь — это электронное силовое устройство, которое позволяет задать частоту вращения электродвигателя, причем не только вручную, но и автоматизированным способом, получая управляющий сигнал от компьютера, оснащенного специализированной программой.

По оценкам исследователей рынка преобразовательной техники, на сегодняшний момент в индустриально-развитых странах достигнуто соотношение между нерегулируемым и регулируемым электроприводом порядка 1 : 1, и вскоре регулируемый (частотный) электропривод будет превалировать над нерегулируемым. Интересно отметить, что по

данным Института электроэнергетики США, в период с 1985 по 1995 г. была проведена реконструкция 60-ти энергоблоков теплоэлектростанций, где было установлено около 300 частотно-регулируемых устройств электропривода в диапазоне мощностей от 630 до 4500 кВт. Годовой экономический эффект от внедрения новых технологий выразился в экономии 1 млрд кВт · ч электрической энергии. Те же данные в отношении России, к сожалению, гораздо менее скромны: регулируемый привод составляет не более 5 % от общих объемов приводной техники. Это означает, что промышленное производство в нашей стране до сих пор живет «по старинке», особо не заботясь о повышении эффективности использования энергии, или только мечтая об этом в условиях отсутствия свободных средств на модернизацию. Тем не менее, и у нас наметились положительные сдвиги. Например, в период с 1995 по 2005 г. специалисты ОАО «ВНИИЭ» внедрили на ряде теплоэлектростанций 28 частотно-регулируемых преобразователя в диапазоне мощностей от 500 до 4000 кВт, что экономит до 100 млн кВт · ч в год [3].

Аналогичная ситуация складывается в области электротранспорта. Кроме проблем энергосбережения, здесь существенным является надежная работа тягового электродвигателя, поскольку, если ориентироваться на статистические данные, 50 % неисправностей электровагонов, троллейбусов, вагонов метро и трамваев связаны именно с неисправностью электродвигателя. Традиционно в этой области техники используются коллекторные двигатели постоянного тока, частоту вращения которых невозможно регулировать простыми и надежными методами. Применение асинхронных двигателей переменного тока (АТЭД) с частотным регулированием позволяет не только коренным образом пересмотреть идеологию конструирования электротранспорта, но существенно сократить процент отказов, связанных с выходом из строя электродвигателей, расширить диагностические возможности, предупредить развитие отказов на ранней стадии. Более того, асинхронные электродвигатели при той же мощности, что и синхронные постоянного тока, имеют в 1,5 (в среднем) раза сниженные габариты.

Еще одна область применения частотно-регулируемого электропривода — это лифтовое хозяйство и подъемное оборудование (телеферы, лебедки, краны). Ежегодное потребление энергии в данной отрасли у нас в стране составляет 1 млрд кВт · ч. Поэтому становится понятным, насколько она энергоемка и какой экономический эффект можно достигнуть от применения преобразовательной техники, если учесть, что, применив частотные преобразователи, можно снизить энергопотребление электрооборудования лифтов на 40...60 %. Кроме того, использование «частотников» повышает комфортность движения кабин, обеспечивает бесшумность движения и высокую точность позиционирования при остановке [4].

А теперь давайте оценим перспективы использования регулируемого электропривода в лифтовом хозяйстве с точки зрения емкости рынка потребления этой технологии. По оценкам, приведенным на сайте компании «Лифт-Комплект» [5], в одной только Москве в настоящее время находится в эксплуатации около 120 тысяч пассажирских и грузовых лифтов, «львиная доля» которых уже выработала 25-летний ресурс, и число таких устаревших лифтов растет с каждым годом. Нужно ли говорить, что такие лифты не только подлежат ремонту по правилам технической эксплуатации как выработавшие заложенный ресурс, но даже — исходя из простого здравого смысла — становятся потенциально-опасными для жизни и здоровья людей. Здравый смысл также подсказывает, что полная замена оборудования окажется намного более затратной задачей, чем разумная модернизация, особенно в условиях экономического кризиса.

Применение регулируемого электропривода в лифтовом хозяйстве позволяет снизить эксплуатационные расходы и повысить межремонтный период. Так, классический электродвигателями необходимо заменять (или, по крайней мере, проводить его капитальный ремонт) раз в 5—10 лет, а двигатель, управляемый преобразователем, прослужит без замены весь 25-летний ресурс. К тому же, отпадает необходимость использования двухскоростного двигателя, вместо которого применяется односкоростной электродвигатель, обладающий меньшими габаритами и стоимостью.

Статические преобразователи для реализации регулируемого электропривода могут работать как с электродвигателями с ротором короткозамкнутого типа, так и сопрягаться с высокоскоростными синхронными электродвигателями. Пуск электродвигателей в любом случае осуществляется плавно, с исключением электродинамических нагрузок в его обмотках и ударных нагрузок в механизмах привода, в результате чего увеличивается срок службы как электродвигателя, так и сопрягаемого с ним оборудования. Появляется возможность отказаться от технически сложных механических редукторов и вариаторов, обеспечить работу на пониженных частотах вращения с уменьшением циклических динамических и вибрационных нагрузок на подшипники, элементы крепления, фундаменты электродвигателей. Остановка электроприводного агрегата за счет рекуперативного электрического торможения обеспечивает возврат электроэнергии в питающую сеть. Коэффициент полезного действия устройств частотно-регулируемого электропривода может достигать 98 %. По оценкам специалистов, применение частотно-регулируемого электропривода может обеспечить экономию электроэнергии порядка 50 % по сравнению с нерегулируемым вариантом.

Большие неприятности потребителю электроэнергии может доставить нестабильность ее электрических параметров. В этом случае го-

ворят о «качестве» электроэнергии, стремясь с помощью соответствующих технических средств обеспечить стабильность по величине напряжения, частоты, синусоидальности и т. д. Большое количество потребителей, включенных в сеть переменного тока, оказывает существенное влияние на параметры электрического напряжения и тока. Один из характерных бытовых примеров — включение мощной нагрузки и связанные с ним «просадки» напряжения, выражающиеся в мигании осветительных ламп. Другая весьма неприятная ситуация связана с атмосферными явлениями, и, в частности, с грозовыми разрядами, попадающими в промышленные сети. Очень часто грозовой разряд выводит из строя персональные компьютеры, не имеющие автономных источников питания. Причем выход из строя «персоналок» может быть как невосстанавливаемым, так и временным, требующим простой перезагрузки, но, тем не менее, связанным с частичной или полной потерей данных («зависания» или сбои). По статистике, средние потери рабочего времени в США по причине выхода из строя «персоналок» из-за фактора «качества» электроэнергии составляют около 9 %. Чтобы защититься от подобных факторов нестабильности питающих напряжений и свести до минимума безвозвратные потери электронной техники, широко используются статические преобразователи электроэнергии, называемые «источниками бесперебойного питания» (ИБП). Источники бесперебойного питания, или, как их называют, «бесперебойники», в своем составе имеют электронную схему, формирующую выходное напряжение с заданными параметрами стабильности и частоты, не зависящими от параметров входного напряжения. Кроме этого, в составе ИБП всегда имеется аккумулятор, который питает ИБП (а, соответственно, и нагрузку) в моменты пропадающего сетевого напряжения. На основе ИБП разрабатываются так называемые «системы гарантированного электропитания» (СГЭ), которые обеспечивают качественной электроэнергией многокомнатные офисные помещения и даже целые предприятия. Структура систем гарантированного электропитания может быть самой разнообразной, но их ядром всегда выступают статические преобразователи. Проектирование систем СГЭ сегодня становится все более и более актуальной задачей, поскольку растет число производств, в которых используется непрерывный цикл работы. Таким образом, СГЭ может обеспечить как поддержание параметров питания в период между отказом основного питания и переходом на резервные источники, так и предоставление времени на завершение процесса при отсутствии резерва.

Огромный класс задач обеспечения электропитанием связан с преобразованием напряжения трехфазной сети 380 В или однофазной сети 220 В частотой 50 Гц в напряжения переменного тока повышенной частоты или напряжения постоянного тока. Традиционно эти задачи решались с помощью электромашинных преобразователей вращающе-

гося типа (ЭМП). Специалистам хорошо известны вращающиеся преобразователи серий АТТ, АТО, АТП, ЭМУ, которые поставлялись десятилетиями и до сих пор продолжают эксплуатироваться на различных промышленных объектах и объектах специального назначения. Существенными недостатками вращающихся преобразователей, кроме низкого КПД (не более 60 %) и коэффициента мощности (0,6...0,7), следует назвать высокий уровень излучаемого шума, значительное время, затрачиваемое на ремонт и обслуживание. Кроме того, опыт последнего десятилетия показал, что отсутствие потребности в электромашинных преобразователях, связанное с сокращением строительства новых объектов, привело к утрате производственных технологий и полному сворачиванию их производства у нас в стране. Именно поэтому, когда потребность в связи с ростом производства в преобразователях возросла, на первый план вынужденно (что оказалось весьма кстати) вышли статические преобразователи.

Каковы преимущества статических преобразователей электроэнергии по сравнению с электромашинными? Во-первых, повышенный КПД, составляющий в среднем 85...95 %. Во-вторых, значительно сниженные габариты, сокращение которых является следствием повышения КПД: так как рассеиваемые тепловые потери меньше, нет необходимости в наращивании размеров радиаторов силовых элементов и тепловыделяющих элементов. В-третьих, поскольку статические преобразователи разрабатываются на основе электронной элементной базы, в их составе можно применять программируемые элементы (специализированные микроконтроллеры), что позволяет разрабатывать совершенную систему управления и диагностики. В-четвертых, статические преобразователи легко могут быть построены на основе блочно-модульного принципа с быстрой заменой отказавших узлов. Преимущества такого построения очевидны: при отказе одного из блоков не потребуются монтаж прибора целиком, необходимо лишь заменить отказавший блок на исправный за несколько минут и ввести преобразователь в строй. Более того, можно наращивать суммарную мощность преобразователей, обеспечив их синхронную параллельную работу. В-пятых, статические преобразователи не нуждаются в сложной пускорегулирующей аппаратуре, которая традиционно является спутником ЭМП, занимает много места и размещается внутри дополнительных громоздких электрощитов. По своей сути, статический преобразователь внешне представляет собой «черный ящик», который легко разместить в удобном месте, доступном для проведения регламентных работ.

Обратим внимание читателя еще на одно немаловажное обстоятельство: в условиях дефицита электроэнергетических ресурсов ведущие промышленные страны стремятся, наряду с традиционными, осваивать и неохваченные источники энергии. Так, например, в Европе с успехом научились использовать энергию ветра. Собственно, идея эта

не нова: для ее реализации на валу электрогенератора устанавливается лопастная вертушка, которую вращает поток набегающего воздуха, и генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Однако в прикладном смысле идея долгое время оставалась нереализованной, поскольку ее массовому использованию сопутствовали непреодолимые трудности в виде нестабильности электрических параметров вырабатываемой энергии, временной нестабильности воздушного потока. Только с появлением статических преобразователей ветроэнергетика стала серьезной отраслью электроэнергетики, и доказательством этому служит огромное количество «ветряков», покрывших территорию современной Европы. Образовался рынок ветроэнергетического оборудования, лидирующее положение на котором занимает Германия, по территории страны разбросано около 17 тысяч «ветряков», а 70 % производимого оборудования поставляется на экспорт — в США, Великобританию, Испанию, Китай. В общемировом масштабе количество ветроэлектростанций ежегодно увеличивается на 25 %, и если в 1991 г. только в одной Германии производилось около 100 МВт в год, то к 2007 г. эта цифра достигла 23 000 МВт, что в экономическом отношении выражается в экономии 1 млрд евро на традиционных источниках энергии и мерах по снижению выброса углекислого газа в атмосферу. Доля ветроэнергетики в экономике Германии пока невелика — всего 7...8 %, но мощные работы в этом направлении позволяют довести через 10 лет эту цифру до 20 % [6].

Основной принцип работы современного «ветряка» — это подключение электрогенератора к специальному стабилизирующему преобразователю, который формирует с высокой точностью выходные параметры напряжения и тока, а также запасает энергию в аккумуляторной батарее на случай отсутствия ветряного потока. Несколько ветряков, таким образом, могут объединяться в сеть для повышения выходной мощности, образуя ветроэлектростанцию. Мировой опыт эксплуатации ветроэлектростанций показал, что уже сегодня эти источники энергии могут надежно питать небольшие города без использования других источников энергии. Поэтому, в связи с бурным ростом рынка ветроэнергетического оборудования, в номенклатуре ведущих фирм-производителей силовой элементной базы появляются электронные компоненты и готовые статические преобразователи, ориентированные исключительно на применение в ветроэнергетических установках. К сожалению, наша страна и здесь значительно отстает от мирового опыта, в целом, однако, осознавая необходимость вести работы в этом направлении. Сегодня в Калининградской области уже работает экспериментальный «ветряк», на очереди — освоение просторов Ленинградской области. Не исключено, что отечественные разработчики преобразовательной техники вскоре приступят к реализацией этой задачи, используя передовой мировой опыт.

Мы кратко назвали основные области применения статических преобразователей в современной технике и можем переходить к рассмотрению основных схем построения и конструктивных исполнений названных преобразователей. Но предупреждаем читателя: номенклатура их столь широка, что едва ли нам удастся рассмотреть все возможные исполнения, поэтому затронем главные и наиболее характерные технические реализации, которые помогут сориентироваться в необъятном мире преобразовательной техники.

1.2. Калейдоскоп статических преобразователей

В этой главе мы поговорим об общих принципах построения статических преобразователей, об их силовых схемах, о конструктивном исполнении различных типов приборов, выпускаемых отечественными и зарубежными фирмами, о методах их управления и о дополнительных функциональных сервисных узлах, имеющихся в составе современной преобразовательной техники.

Современный рынок статических преобразователей настолько широк, настолько много предложений поступает от производителей этой продукции, что у человека, впервые столкнувшегося с выбором конкретного прибора для реализации своих задач, может возникнуть чувство беспомощности. Интернетовские поисковые системы в ответ на запрос выдают сотни ссылок на сайты производителей, специализированные выставки насыщены стендами, где наперебой предлагают приобрести разнообразную преобразовательную технику. Как вообще сориентироваться в подобном разнообразии продукции? Какой именно преобразователь выбрать? Чем все-таки отличаются приборы с очень близкими техническими характеристиками, произведенными разными фирмами кроме того, что они имеют разные фирменные планки производителя? Насколько надежным в эксплуатации будет применение того или иного прибора? К счастью, эти опасения быстро исчезнут, если удастся разобраться в общих принципах построения и функционирования силовой преобразовательной техники.

Начнем с преобразователей, использующихся для построения частотно-регулируемого электропривода и основных силовых схем, использующихся для их реализации. Наибольшее распространение среди схем данного класса преобразовательной техники получили так называемые схемы двухзвенного преобразования. На рис. 1.2.1 показана в самом общем виде двухзвенная преобразовательная схема с указанием формы напряжений, формируемых каскадами этой схемы.

Двухзвенные схемы преобразуют питающее напряжение в напряжение питания электродвигателя в два этапа. На первом этапе произ-

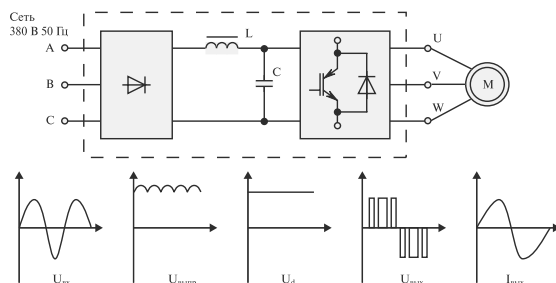


Рис. 1.2.1. Двухзвенная схема преобразования

водится выпрямление сетевого напряжения $U_{\text{вх}}$ в напряжение $U_{\text{выпр}}$ неуправляемым (или управляемым) выпрямителем, в качестве которого выступает диодный мост (или тиристорно-диодный мост), а затем сглаживается емкостным или индуктивно-емкостным фильтром. Получаемое в результате постоянное напряжение U_d на втором этапе преобразуется с помощью «инвертора» в широтно-модулированные импульсы с амплитудой $U_{\text{вых}}$, которые поступают на обмотки электродвигателя. Поскольку двигательные обмотки имеют индуктивный характер реактивного сопротивления, ток в обмотках ($I_{\text{вых}}$) получается в результате усреднения близким к синусоидальному.

Наиболее интересный узел статического преобразователя — это инвертор. В качестве основных коммутационных элементов для инвертора долгое время использовались тиристоры с неполным управлением (включаемые по управлению, или SRC-тиристоры). Сегодня их заменили тиристоры с полным управлением типа GTO, IGCT, SGCT. Но наиболее перспективным на сегодняшний момент все-таки является использование биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). К сожалению, с помощью IGBT на сегодняшний момент удастся строить статические преобразователи с верхней границей мощностей порядка нескольких сотен кВт. Если речь идет о диапазонах мощностей в тысячи кВт, приходится применять известные читателю тиристоры. Но тенденции развития силовой элементной базы позволяют сделать прогноз о возрастании доли IGBT в составе сверхмощных статических преобразователей и о появлении новых разработок мощных высоковольтных IGBT, способных полностью заменить тиристоры.

На рис. 1.2.2 показана структурная схема преобразователя на основе SRC-тириستоров. Элементы VS1—VS6 включены по схеме управляемого выпрямителя, элемент VS7 выполняет функцию коммутатора, запирающего элементы VS8—VS13, работающие в инверторе. Конденсаторы C1—C3 компенсируют индуктивный характер нагрузки. На основе данной схемы выпускалось большое количество преобразователей в диапазоне мощностей от 600 до 13 000 кВт с номинальными

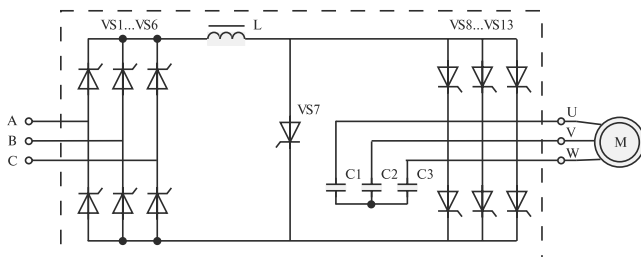


Рис. 1.2.2. Преобразователь на основе SRC-тиристов

выходными напряжениями до 14 000 В. Такие преобразователи использовались на железнодорожном транспорте для управления тяговыми электродвигателями тепловозов и электровозов.

К сожалению, классические SRC-тиристоры не могут работать на высоких частотах коммутации, из-за чего не удается повысить частоту преобразования и уменьшить гармонические искажения выходных сигналов преобразователей. Так, в среднем, значение гармонических искажений выходных сигналов подобных преобразователей составляет 10 % для выходного тока и напряжения. Насколько важно обеспечить минимальные гармонические искажения выходного напряжения и тока статических преобразователей для электропривода? Оказывается, гармонические искажения увеличивают потери электроэнергии в двигателях и могут оказать разрушающее воздействие на электрическую изоляцию его обмоток.

Более перспективным на сегодняшний момент является замена тиристоров SRC-типа на запираемые тиристоры GTO и IGCT, поскольку, кроме повышенных частот коммутации, эти элементы управляемы по выключению. На рис. 1.2.3 показана схема высоковольтного частотного преобразователя, в которой применяются IGCT-тиристоры. На входе преобразователя в данном случае устанавливается трансфор-

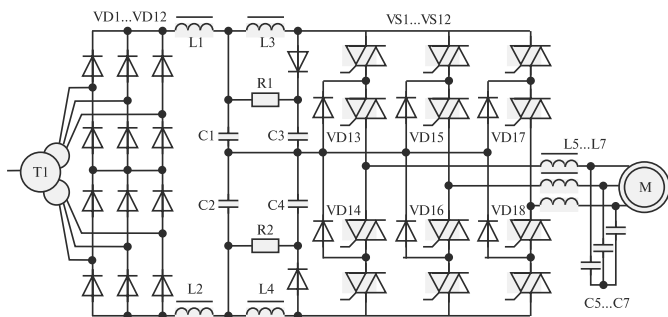


Рис. 1.2.3. Преобразователь на основе IGCT-тиристов

мотор Т1 с двумя вторичными группами обмоток — для повышения выходного напряжения. Выпрямление осуществляется двумя трехфазными диодными мостами (VD1—VD12), включенными последовательно. Выпрямленное напряжение фильтруется элементами L1—L4, R1—R2, C1—C4. Элементы VS1—VS12 составляют управляемый инвертор. На выходе преобразователя установлен LC-фильтр L5—L7, C5—C7, который подавляет высшие гармоники напряжения и исключает повреждение обмоток электродвигателей.

Вновь вернемся к рис. 1.2.1 и обратим внимание на сглаживающие (накопительные) конденсаторы, работающие в звене преобразования переменного тока частоты 50 Гц в постоянное напряжение, питающее звено инвертора. Емкость этих конденсаторов в классических преобразовательных схемах должна быть достаточно большой, чтобы обеспечить хорошее сглаживание выпрямленного тока, а также его поддержание при возникновении скачков и провалов сетевого напряжения. В среднем, величина этих конденсаторов выбирается из соотношения порядка 500 мкФ на 1 кВт выходной мощности. Отсюда следует, что типовой статический преобразователь представляет собой емкостную нагрузку со стороны подачи сетевого напряжения питания. Данное обстоятельство приводит к появлению в питающей сети высших гармоник тока, которые неблагоприятно влияют на сеть. Для питающей сети наиболее желательным считается подключение нагрузок активного характера, поэтому с помощью некоторого усложнения схемотехнического построения выходного каскада статического преобразователя удастся приблизить потребление тока к активному характеру, то есть обеспечить коэффициент мощности прибора близким к 1.

На рис. 1.2.4 показана модифицированная схема входного звена статического преобразователя [7], в состав которого включен так на-

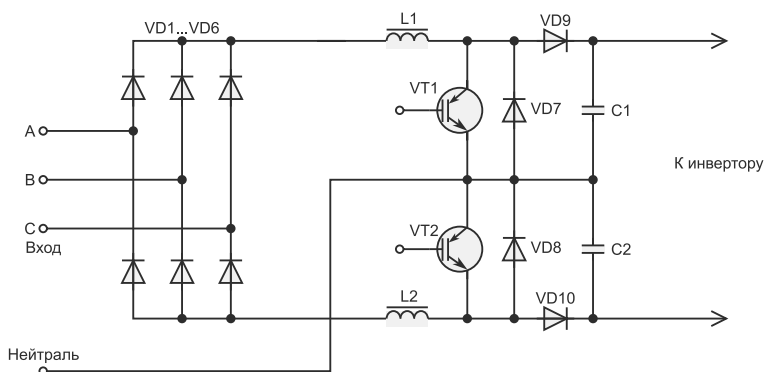


Рис. 1.2.4. Модифицированная схема входного звена статического преобразователя

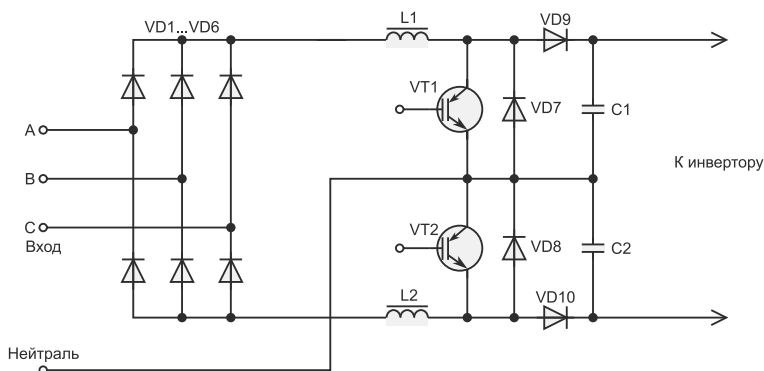


Рис. 1.2.4. Модифицированная схема входного звена статического преобразователя

зываемый «бустер» — повышающий управляемый преобразователь на основе IGBT-ключей.

Бустер выполнен по симметричной схеме. В его состав включены индуктивные элементы $L1$, $L2$, транзисторные ключи $VT1$, $VT2$, обратные диоды $VD7$, $VD8$, выпрямительные диоды $VD9$, $VD10$ и сглаживающие конденсаторы $C1$, $C2$. Основные функции бустера здесь две: во-первых, балансируется напряжение положительной и отрицательной полярностей относительно нейтрального проводника, что исключает появление в выходном переменном напряжении статического преобразователя постоянной составляющей из-за несимметрии управляющих воздействий, и во-вторых, что важно также отметить, поскольку конденсаторы $C1$, $C2$ фильтры отделены от питающей сети элементами бустера, реактивная составляющая мощности будет «курсировать» между нагрузкой, инвертором, емкостями фильтра, и не сможет проникнуть на вход преобразователя, а значит — и в питающую сеть. Именно поэтому питающая сеть оказывается защищенной от высокочастотных гармоник тока.

Дальнейшее совершенствование схем входного звена преобразователей привело к замене неуправляемых диодных выпрямителей (диодных мостов) на управляемые выпрямители, выполненные на основе IGBT-ключей. Эти схемы позволяют обеспечить коэффициент мощности преобразователей порядка 0,99, то есть для питающей сети такие преобразователи могут стать практически активной нагрузкой. На рис. 1.2.5 показана схема входного звена статического преобразователя с управляемым выпрямителем.

В составе управляемого выпрямителя «работают» диоды $VD1$ — $VD6$, транзисторы $VT1$ — $VT6$, входные дроссели $L1$ — $L3$. Кроме этого, имеется специальная схема уравнивателя напряжения, построенная на

транзисторах VT7—VT8, диодах VD7—VD8. Сглаживающий фильтр — элементы L4, C1, C2. Управляемый выпрямитель выполняет функции регулирования напряжения постоянного тока на входе инвертора, управления мощностью за счет ограничения выходного тока. Кроме того, управляемый выпрямитель обеспечивает рекуперативный обмен энергией с питающей сетью. Уравнитель напряжения симметрирует напряжение постоянного тока на шинах подачи питания на инвертор для исключения появления постоянной составляющей в выходном сигнале.

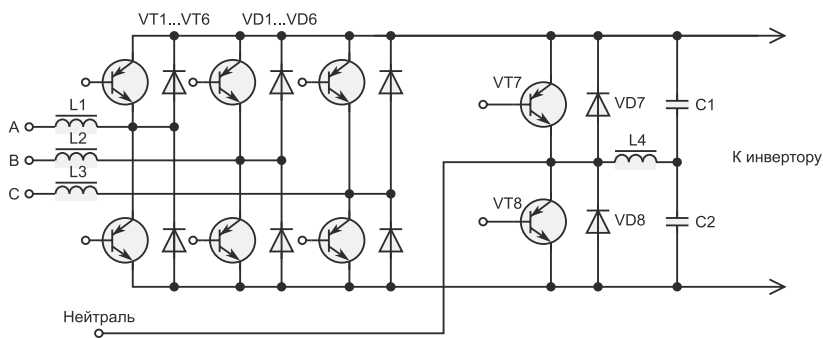


Рис. 1.2.5. Управляемая схема входного звена

Появление так называемых гибридных силовых схем статических преобразователей электроэнергии связано с исследованиями, направленными на снижение их масс и габаритов с одновременным снижением влияния на питающую сеть. В этих схемах вместо фильтрующих конденсаторов большой емкости (а значит — и значительных габаритов) применяются узлы активных фильтров гармоник. Принцип работы активного фильтра гармоник таков: на входе преобразователя устанавливается электронная схема, состоящая из датчиков тока, напряжения, ключевых элементов (IGBT-транзисторов) и сигнального микроконтроллера. Алгоритм управления фильтром построен таким образом, чтобы обеспечить воздействия, позволяющие скомпенсировать внешние возмущения типа скачков и провалов напряжения. Вследствие этого, потребление тока от сети происходит в режиме, близком к активному, а выходное напряжение, питающее инвертор, оказывается более стабильным. Как правило, активные фильтры гармоник работают параллельно с первичным звеном преобразователя.

На рис. 1.2.6 показана возможная гибридная структура входного звена статического преобразователя, содержащего в своем составе активный фильтр гармоник. Как видно из рисунка, гибридная схема представляет собой параллельное соединение классической силовой

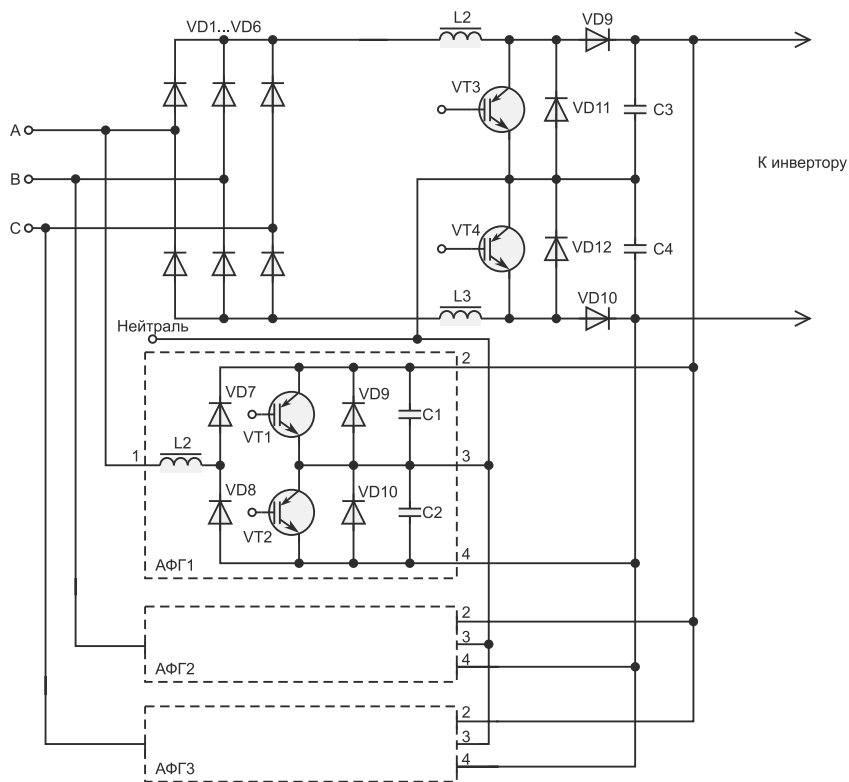


Рис. 1.2.6. Гибридная структура входного звена

схемы с бустерным звеном и активного фильтра гармоник, в составе которого работают элементы VD7, VD8, VD9, VD10, VT1, VT2, L1. Таких фильтров в схеме должно быть три, то есть на каждую фазу «работает» свой фильтр (на рисунке показано внутреннее устройство только одного силового канала).

В том случае, если крайне важно обеспечить минимальное значение гармонических составляющих в нагрузке, гибридная схема реализуется так, как показано на рис. 1.2.7.

Неуправляемый выпрямитель VD1—VD6 здесь построен по традиционной схеме трехфазного моста. Регулирование напряжения на входе инвертора выполняется звеном чопперного типа на элементах VT1, VD7, VD8, C1, C2, L1. Инвертор также включен в классической схеме трехфазного моста на элементах VT8—VT13, VD15—VD19. Управляемый активный фильтр гармоник — элементы VT2—VT7, VD9—VD14, L2—L4, C3—C5. Выходные сигналы инвертора и актив-

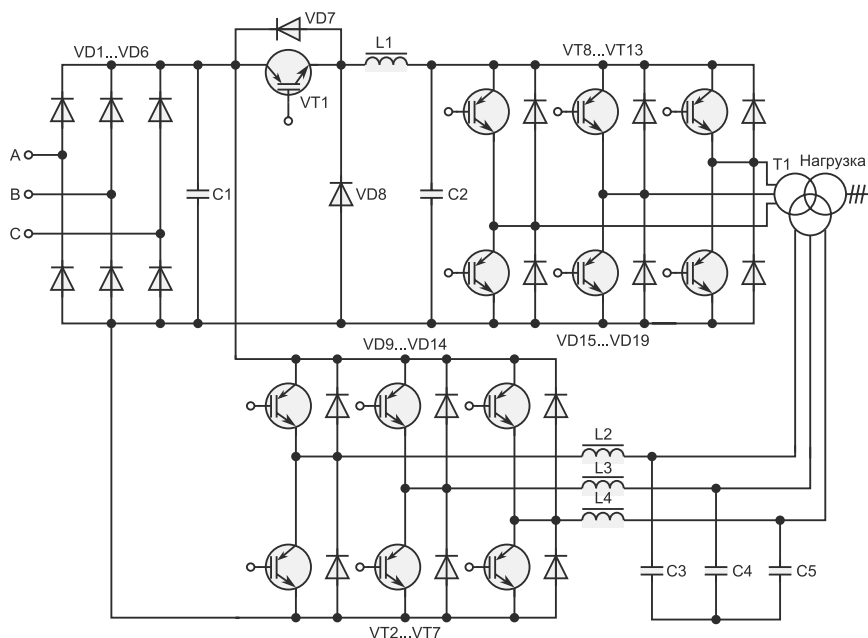


Рис. 1.2.7. Гибридная схема для питания нагрузки

ного фильтра суммируются в трансформаторе Т1, к выходу которого подключается нагрузка (например, электродвигатель).

Интересной с точки зрения отказа от габаритных конденсаторов фильтра является идеология матричного построения силовой схемы статического преобразователя, приведенная на рис. 1.2.8. Схема построена с использованием девяти двунаправленных силовых ключей, которые подключают любую из трех фаз питающего напряжения к любым трем фазам нагрузки. Управляются ключи специальными трехфазными последовательностями, сформированными микроконтроллером. Накапливаемая в нагрузке энергия транслируется в питающую сеть с помощью оригинального рекуперативного узла. Интересно отметить, что матричная структура преобразователя позволяет как повысить, так и понизить частоту выходного напряжения по сравнению с частотой питающей сети, что не всегда удастся в классических тиристорных структурах. Другая важная особенность матричной структуры — возможность сохранения работоспособности преобразователя в целом при отказе одной из ячеек двунаправленных ключей за счет перестройки алгоритма управления исправных ячеек.

А теперь мы поговорим о некоторых типичных промышленных образцах статических преобразователей, которые производятся ведущими

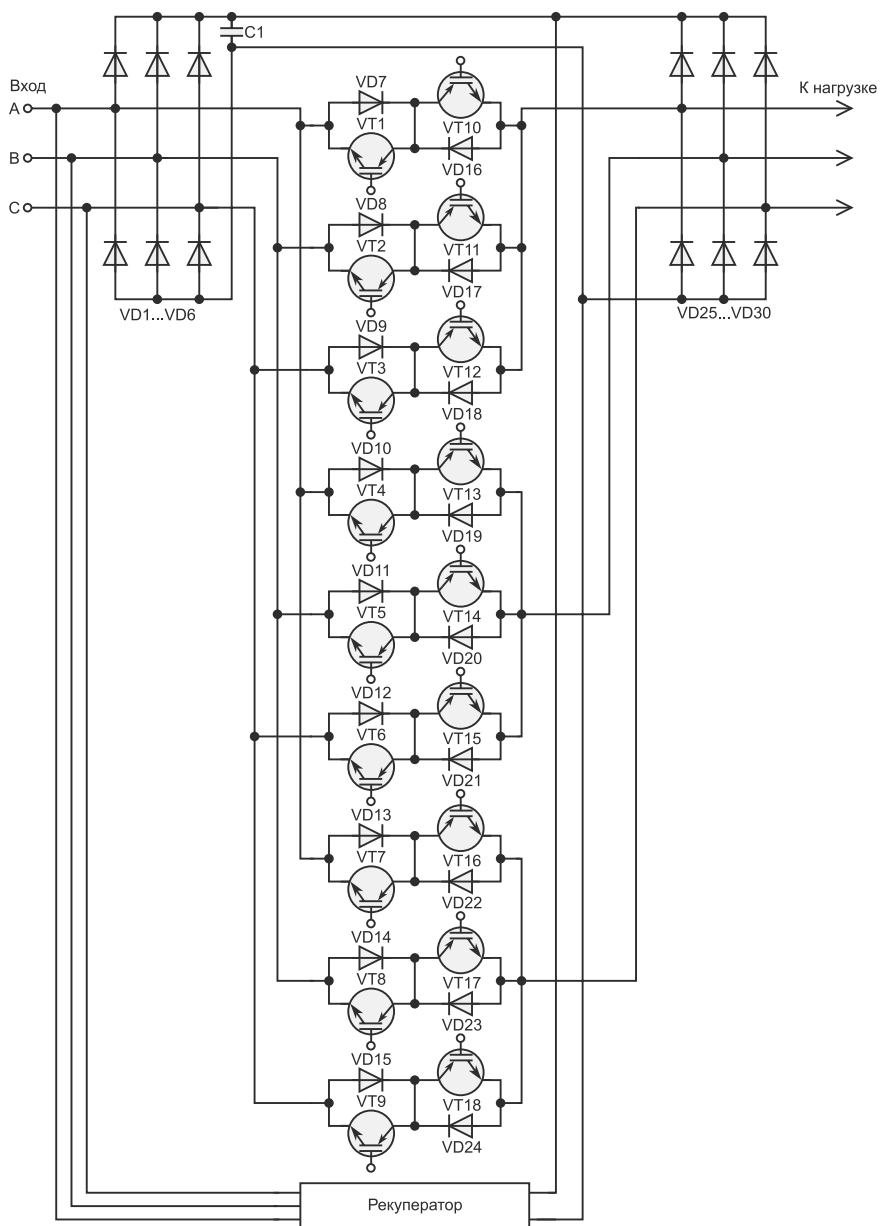


Рис. 1.2.8. Матричная схема статического преобразователя

мировыми фирмами и находят широчайшее применение в названных выше технических областях. Начнем с рассказа о маломощных преобразователях, использующихся для управления электродвигателями. На рис. 1.2.9 представлена линейка универсальных компактных приборов серии Sinamics G100, поставляемых фирмой «Siemens». Фирма позиционирует эту линейку как ряд универсальных и недорогих приборов, работающих в диапазоне мощностей нагрузки от 0,12 до 3,0 кВт с питанием от однофазной сети переменного тока напряжением 200...240 В. Интерфейс управления преобразователями имеет как аналоговую, так и цифровую части, что позволяет использовать их как в системах с ручным управлением, так и в автоматизированных системах, оснащенных микроконтроллерами и другими программно-аппаратными средствами. Кроме того, ко всем преобразователям серии может быть подключена выносная дистанционная панель управления, которую можно устанавливать в удобном для оператора месте. Настройка режимов работы преобразователя (временная характеристика плавного пуска, характеристика торможения, цикл работы и т. д.) выполняется посредством встроенной клавиатуры и жидкокристаллического дисплея, или при помощи персонального компьютера, который подключается к специальному конфигурационному разьему. Чтобы установить одинаковый режим работы для нескольких приборов, достаточно выполнить настроечную операцию один раз, и затем перенести конфигурационную информацию на другие преобразователи. Специальное программное обеспечение для персонального компьютера поставляется в комплекте с преобразователем. Нужно сказать, что подобный метод конфигурирования современных преобразователей не является какой-то уникальной технологией, принятой на вооружение только фирмой «Siemens», — по этому пути идут практически все фирмы-производители, заботящиеся о конкурентоспособности своей продукции.



Рис. 1.2.9. Приборы серии Sinamics G100

ОГЛАВЛЕНИЕ

От автора	3
Глава 1. СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	7
1.1. Преобразовательная техника в современном мире	7
1.2. Калейдоскоп статических преобразователей	14
1.3. Как заставить вращаться двигатель	59
1.4. О нетрадиционных подходах к преобразовательной технике	62
1.5. Мягкий старт — залог долголетия и надежности	78
Глава 2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	95
2.1. Берем за основу MOSFET и IGBT	95
2.2. Когда «deadtime» перестает быть проблемой	162
2.3. Драйверы для управления силовыми элементами	171
2.4. Борьба с пусковыми токами, помехами и пульсациями ...	225
2.5. Как измерить напряжение и ток	253
2.6. Несколько слов о точных изделиях	284
2.7. «Рассыпуха» силовой электроники	297
2.8. Электронные предохранители	322
Глава 3. СЕКРЕТЫ УДАЧНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ	328
3.1. Об использовании готовых силовых блоков	329
3.2. Как проложить силовые шины	348
3.3. Все ли благополучно с тепловыделением?	360
3.4. О некоторых «тонкостях» технологии	400
Литература	411