

# Библиотека Инженера

Клевцов А.В.

## Средства оптимизации потребления электроэнергии Справочно-информационное пособие



Рациональное энергопотребление  
Управление энергопотреблением  
Энергосбережение в коммуналь-  
ной сфере  
Частотно-регулируемый электро-  
привод

пусть эта книга принесет вам удачу



*Серия «Библиотека инженера»*

**А. В. Клевцов**

# **Средства оптимизации потребления электроэнергии**

**Справочно-информационное пособие**

**Москва  
СОЛОН-Пресс  
2010**

ББК 32.882  
УДК 621.399  
К48

**А. В. Клевцов**

К48 Средства оптимизации потребления электроэнергии. — М.: СОЛОН-Пресс, 2010. — 240 с.: ил. — (Серия «Библиотека инженера»)

ISBN 5-98003-106-5

В книге рассмотрены методы, технические решения, современные средства автоматизации и элементы электротехнической комплектации, позволяющие реализовать режим работ технологического оборудования с оптимизацией электропотребления, дан краткий анализ динамики и тенденций совершенствования электротехнического оборудования в плане достижения рационального электропотребления, приведен справочно-информационный материал по техническим характеристикам средств массового электросбережения: частотно-регулируемых электроприводов, бесконтактной коммутационной аппаратуры, приборов учета и измерения расхода электроэнергии, современных изделий светотехники, систем электрообогрева, включая нагревательные провода и кабели.

Пособие предназначено для инженерно-технических работников электроэнергетических служб предприятий, инженеров-проектировщиков, аспирантов и студентов технических университетов, обучающихся по электротехническим специальностям.

ББК 32.882  
УДК 621.339

**Книга — почтой**

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом по фиксированной цене. Оформить заказ можно одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20;
2. Передать заказ по электронной почте на адрес: [magazin@solon-r.ru](mailto:magazin@solon-r.ru).

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». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: [katalog@solon-r.ru](mailto:katalog@solon-r.ru).

Получать информацию о новых книгах нашего издательства Вы сможете, подписавшись на рассылку новостей по электронной почте. Для этого пошлите письмо по адресу: [news@solon-r.ru](mailto:news@solon-r.ru). В теле письма должно быть написано слово SUBSCRIBE.

ISBN 5-98003-106-5

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2010  
© А. В. Клевцов, 2010

## **От автора**

Все упомянутые в настоящем пособии торговые марки являются собственностью их владельцев и использованы без цели причинения ущерба их интересам. Печатаение, перепечатка, использование текста или иллюстраций данного издания без письменного разрешения автора и издательства запрещены.

## **Предисловие**

Применительно к системам и устройствам электроэнергетики, электромеханики, ставший чрезвычайно популярным в последние 7—8 лет термин «энергосбережение» относится главным образом к проблемам организации рационального потребления электроэнергии и к решению задач оптимизации ее реальных затрат без снижения эффективности и надежности функционирования технологического оборудования. Если речь идет о потреблении электроэнергии в коммунальной сфере, то весь комплекс мероприятий по снижению электропотребления не должен затрагивать жизненные интересы людей и влиять на их предпочтения. При обилии всевозможных изданий, посвященных вопросам энергосбережения в промышленности и бытовом секторе, научно-технические работники, специалисты электроэнергетических служб предприятий, студенты и аспиранты соответствующих специальностей технических университетов практически не располагают систематизированными сведениями о методах и технических средствах, позволяющих снизить либо оптимизировать реальное электропотребление при разработке, изготовлении и эксплуатации конкретного технологического оборудования.

К сожалению, даже в наши дни в связи с довольно низкими ценами за один кВт/ч получаемой электроэнергии для большинства крупных и энергоемких производств задача снижения ее потребления не стала острой и актуальной, что находит свое отражение в сугубо декларативном характере проводимых мероприятий по энергосбережению. Пока основной акцент работы, особенно в регионах, удаленных от Москвы, делается на внедре-

ние современных средств учета потребления электроэнергии. В отличие от этого, автором затронута не ставшая пока популярной деятельность, направленная на оптимизацию и снижение электропотребления только за счет инженерно-технических решений, а именно: изменение режимов работы электрооборудования, внедрение новейшей элементной базы, применение специальных схмотехнических решений, использование альтернативных малозатратных технологических решений при изготовлении и внедрении технических средств управления любым оборудованием и т. д.

Предполагаемое пособие не претендует на роль классического справочно-информационного, а призвано частично восполнить существующий информационный пробел по данному направлению и инициировать работу широкого круга специалистов по более рациональному использованию электроэнергии.

В процессе работы над книгой сформулировано и разработано несколько научно-методических положений по оптимизации электропотребления в конкретных системах электропривода, промышленной автоматики, что нашло отражение в ряде внедренных разработок. В книге использован справочно-информационный материал, полученный непосредственно с предприятий-изготовителей электротехнической промышленности России, СНГ, фирм-представителей зарубежных корпораций.

Кроме этого, автор, полагая, что настоящее пособие будет востребовано широким кругом специалистов в области технологической автоматики, подробно изложил основные принципы организации и функционирования современных аппаратов «мягкого» пуска мощных асинхронных электродвигателей, частотно регулируемых электроприводов, как наиболее востребованных видов электрооборудования в плане снижения и оптимизации электропотребления.

Автор выражает благодарность всему коллективу научно-инженерного информационного центра ЗАО «НПП АКИС», принявшему активное участие в технической подготовке рукописи, а также научному редактору издания доктору электротехники Соснину Д. А. за ценные замечания и исправления.

# **Глава 1**

## **Общие принципы организации рационального энергопотребления в массовых электроустановках низкого напряжения**

### **1.1. Реальное состояние условий электропотребления, сложившихся в период с 1990 г. по 2003 г.**

В настоящее время, когда цена на электроэнергию неуклонно растет, мы имеем в эксплуатации большое количество неэкономичных объектов коммунального хозяйства, теплоэнергетики, промышленности, сельского хозяйства и других подобного рода потребителей электроэнергии. Ранее система финансирования промышленного и гражданского строительства побуждала думать лишь о снижении затрат на капитальное строительство, не заботясь об экономии электроэнергии.

В Федеральном законе об энергосбережении от 10 апреля 1996 г. определены основы государственного управления энергосбережением, которые включают:

- основные принципы управления в области энергосбережения;
- осуществление государственного надзора за эффективным использованием ресурсов;
- проведение энергетических обследований предприятий и организаций;
- детальный учет энергетических ресурсов;
- проведение статистических наблюдений за потреблением энергетических ресурсов и их эффективным использованием.

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ**, как фронтальное понятие по всему спектру мероприятий по экономии любого вида энергии, включает безусловную, доминирующую и конкретную составляющую **ЭЛЕКТРОСБЕРЕЖЕНИЯ**, к которой в полной мере относятся все положения Федерального закона. Своевременность таких ме-

роприятий не вызывает сомнений, т. к. с началом формирования и становления рыночных механизмов наметились отчетливые негативные тенденции и в сфере электропотребления:

- возрастание неконтролируемого объема электропотребления на фоне учитываемого объема электропотребления;
- увеличение потерь электроэнергии в распределительных сетях высокого и низкого напряжения из-за износа электрооборудования;
- устранение эксплуатационных служб предприятий и организаций от решения конкретных задач по оптимизации режимов работы технологического оборудования с целью снижения электропотребления;
- неоправданная экономия затрат на совершенствование и модернизацию технических средств контроля и управления электропотреблением;
- рост удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции практически на большинстве промышленных предприятий из-за значительного (до 80 %) износа технологического оборудования;
- несвоевременное и не в полном объеме ремонтно-профилактическое обслуживание технологического оборудования;
- увеличение потерь электропотребления на тех производствах, где была проведена частичная или полная переориентация на выпуск другой продукции без реконструкции системы энергоснабжения.

В системе коммунального хозяйства наиболее энергоемкой была и остается система перекачки чистых и сточных вод. Достаточно сказать, что по состоянию на 2000 г., в России ежегодно расходуется порядка 140—160 млрд · кВт/ч учтенной электроэнергии на перекачку чистых и сточных вод. При этом стоимость электроэнергии в общей сумме эксплуатационных расходов на водоканальных предприятиях коммунального хозяйства при использовании подземных вод составляет почти 80 %. За исключением десятка крупных городов центральной части России, состояние даже простейшей технологической автоматики насосных станций крайне неудовлетворительное, что не позволяет реализовать более или менее экономически оправданные режимы работы мощных электродвигателей.

Наметившееся в последнее время оживление промышленного производства, вызвало интенсивное использование низковольтных комплектных устройств (НКУ) управления самым массовым асинх-

ронным электроприводом и, как следствие, рост потерь электроэнергии из-за несоответствия технических решений требуемым режимам эксплуатации привода. При этом активного формирования режимов оптимального электропотребления средствами управления электроприводом не наблюдается даже у производителей сертифицированных изделий, выпускаемых значительными сериями.

Весьма актуален на сегодняшний день вопрос качества электроэнергии и его повышения. Важность этой проблемы неуклонно возрастает в связи с развитием и широким внедрением на производстве всевозможных вентиляльных силовых преобразователей напряжения (тока) и высокоэффективных технологических установок, таких, как дуговые сталеплавильные печи, сварочные установки, мощные преобразователи частоты. Показатели качества потребляемой электроэнергии из сети у такого оборудования (уровень гармоник тока, потребляемая реактивная мощность и скорость ее изменения) прямо влияют на потери электроэнергии. Следует отметить, что в настоящее время на большинстве промышленных предприятий далеко не полностью реализуются привлекательные возможности управления энергетическими режимами преобразовательных установок с целью минимизации электропотребления.

В условиях сохраняющейся экономической нестабильности, довольно высоких ставок на кредитные ресурсы, относительной неразвитости рынка, правовой незащищенности надеяться на интенсивные инвестиции в реконструкцию электротехнического и технологического оборудования не приходится. Поэтому одними из реальных возможностей для реализации режимов экономного электропотребления, доступными в условиях существующей социально-экономической ситуации, являются внедрение электросберегающих технологий и адаптация их к действующим схемам технологического оборудования.

## **1.2. Общие направления и принципы организации энергосбережения в массовых электроустановках низкого напряжения**

Мировой опыт показывает, что экономное и рациональное потребление электроэнергии в большей степени реализуется за счет оптимизации ее использования в промышленном производстве и коммунально-бытовом секторе.



Если говорить о потребителях электроэнергии вообще, то классификация их основывается на множестве признаков, включающих основные характеристики режима электропотребления:

- номинальное напряжение;
- частота питающего напряжения;
- характер нагрузки;
- значимость потребителя в хозяйственном, социальном и оборонном комплексах страны.

Вся технологическая цепочка — от выработки электроэнергии до передачи ее непосредственно потребителю — призвана удовлетворять все возрастающие нужды массовых потребителей электроэнергии: промышленность, связь, сельское хозяйство, электрический транспорт, жилищный комплекс, коммунальное хозяйство.

Если не включать в понятие «массовый потребитель» ряд энергоемких и специфичных потребителей (железнодорожный и городской электрифицированный транспорт), то основным полем для организации целенаправленной работы по электросбережению являются массовые потребители низкого напряжения ( $U = 380/220$  В) промышленной частоты  $f = 50$  Гц, где до сих пор не принято достаточно скрупулезно считать потребление электроэнергии и связанные с этим потери. Неуклонный рост тарифов на электроэнергию, заставляет специалистов и хозяйственников искать пути снижения электропотребления, которые пока большей частью сводятся к прямому ограничению подачи электроэнергии, без учета истинных нужд и состояния потребителей. Экономия электроэнергии без ущерба интересов потребителей может быть достигнута только внедрением энергосберегающих технологий и методик, оптимизирующих реальное электропотребление.

Очевидны три направления электросбережения.

1. Прямое ограничение подачи электроэнергии потребителям. При этом нарушается сложившийся режим электропотребления, характерный при 100%-м обеспечении.

2. Снижение потерь электроэнергии при сохранении сложившегося режима электропотребления за счет внедрения электросберегающих технологий.

3. Оптимизация электропотребления без ухудшения условий работы потребителей за счет внедрения новейших технологических решений в системе электропотребления.

Значительные перспективы и возможности в деле оптимизации потребления электрической энергии заключены в использова-

нии адаптивных алгоритмов управления энергоемким технологическим оборудованием. Основными предпосылками для организации этой работы являются:

- наличие развитой и апробированной теоретической базы как основы для создания алгоритмов и моделей управления;
- появление широкого ряда интеллектуальных средств управления: программируемых реле и контуров, промышленных компьютерных систем, автономных программируемых приводных устройств и т. д.;
- обострение проблемы экономии электроэнергии в промышленности и бытовой сфере.

В плане реализации интерес представляют адаптивные модели, имеющие небольшой объем вычислений, а, следовательно, не требующие значительных ресурсов технических средств управления. Например, итерационные способы построения модели объекта управления, при которых оценки параметров, влияющих на уровень потребления электроэнергии, постоянно уточняются и через определенный период доводятся до значений, при которых электропотребление будет минимальным. Данному вопросу будет посвящен ряд статей, отражающих основные подходы при внедрении адаптивных алгоритмов управления некоторыми технологическими задачами по критерию минимального потребления электроэнергии.

При определенных условиях направление, связанное с прямым ограничением, будет реализовываться неопределенно долго, особенно в районах с большим дефицитом первичных топливных ресурсов и независимо от мероприятий организационно-технического характера, предусмотренных Федеральным законом об энергосбережении от 10.04.96 г. № 28 ФЗ.

Два других направления опираются на внедрение новейших технологических решений в сфере электропотребления и включают:

- внедрение новейшего электротехнического оборудования, имеющего высокие технико-экономические и эксплуатационные характеристики;
- разработку и внедрение специальных режимов работы электрооборудования, позволяющих снизить электропотребление без ущерба для потребителя;
- регулирование частоты вращения массового асинхронного электропривода с помощью высокоэкономичных преобразователей частоты, реализованных на современной элементной базе силовой электроники;

- широкое внедрение бесконтактной пускорегулирующей и коммутационной аппаратуры;
- внедрение компактных программируемых коммутационных средств, реализующих экономичные временные алгоритмы управления электропотреблением;
- реализацию компенсации реактивной мощности и повышение  $\cos \varphi$ ;
- применение совершенных технических средств учета электропотребления и контроля технического состояния распределительных устройств;
- регулярное проведение энергоаудита потребителей электроэнергии с применением современного диагностического оборудования;
- совершенствование и оптимизацию распределительных сетей низкого напряжения;
- применение уточненных методик для проведения взвешенного технико-экономического обоснования при определении установленной мощности и эксплуатационных режимов работы «энергоемкого» технологического оборудования.

Помимо приведенных мероприятий чисто технического характера, к положительному эффекту в экономии электроэнергии может привести и ряд сугубо организационных мер, включающих:

- введение в высших и средних специальных учебных заведениях для соответствующих специальностей целевого курса (предмета) по основам электросбережения;
- организацию и проведение регулярных семинаров для специалистов электроэнергетических служб предприятий;
- внедрение на каждом энергоемком хозяйствующем субъекте системы материального поощрения за разработку и реализацию режимов оптимального электропотребления;
- проведение эффективной рекламной-информационной кампании по энергосбережению через средства массовой информации;
- разработку законодательных актов, устанавливающих административную и даже уголовную ответственность за определенную степень нарушения или игнорирования порядка учета и расходования электроэнергии;
- постоянное освещение через систему образования комплекса вопросов, связанных с выработкой и соблюдением определенной дисциплины электропотребления, формированием

этических норм, обязательных для выполнения всеми, кто каким-то образом связан с использованием электроэнергии (речь идет о своеобразном кодексе энергопотребления);

- регулярное обследование условий энергопотребления с последующим формированием четких и регламентированных рекомендаций по организации снижения электропотребления.

Следует отметить, что в настоящее время процедура обследования уже выходит за рамки инициативной работы и перестает носить рекомендательный характер. По поручению Минэнерго, вынесен на обсуждение один из возможных подходов к формированию энергоэкологического паспорта предприятия, который учитывает международный и отечественный опыт проведения энергетических обследований оборудования, объектов промышленного и гражданского назначения. При этом на сегодняшний день необходимость и обеспеченность энергетическими паспортами с внедрением энергосберегающих мероприятий в России признаны повсеместно и контролируются территориальными структурами Госэнергонадзора.

# **Глава 2**

## **Методы и средства оптимизации энергопотребления в нерегулируемом промышленном электроприводе переменного тока**

### **2.1. Экономичные серии асинхронных электродвигателей и их конструктивно-технологические особенности**

До распада СССР заводами электротехнической промышленности выпускались асинхронные электродвигатели серий 4А, 4АМ, АИ. В настоящее время производство этих серий осталось за пределами границ России, хотя поставки их для нужд промышленности продолжают. Новая серия 5А разработана и осваивается предприятиями, расположенными на территории России. Электродвигатели устаревших серий разрабатывались исходя из критерия минимальных затрат на изготовление и эксплуатацию, при этом основные размеры и характеристики двигателей зависели от существующего соотношения цен на материалы и электроэнергию: дешевая электроэнергия и дорогие электротехнические материалы. Поэтому электродвигатели серий 4А, 4АМ и АИ имеют низкую материалоемкость, значительное электропотребление, небольшой ресурс (18—22 тыс. ч.) и высокий уровень шума. В табл. 1\* приведено сравнение КПД электродвигателей серий 4АМ, АИ и 5А. Разработка новой серии 5А базировалась на комплексе научно-исследовательских работ, проведенных АО «ВНИПТИЭМ». Электродвигатели этой серии включают 14 габаритов по высоте оси вращения от 71 до 355 мм с диапазоном сетки мощностей от 0,55 до 315 кВт (табл. 2, 3) и имеют два исполнения по степени защиты — IP54 (электродвигатели 5А) и IP23 (электродвигатели 5АН). Исполнение 5А выполнено по традиционной конструкционной схеме закрытых обдуваемых машин с оребренной станиной и центробеж-

---

\* Все таблицы, указанные в тексте под номерами 1—58, приведены в приложении (см. стр. 178—234).

ным вентилятором наружного обдува. Исполнение 5АН имеет двухстороннюю симметричную радиальную вентиляцию. Станины и щиты двигателей высотой до 90 мм включительно, литые из алюминиевого сплава, двигатели с высотой от 100 мм до 132 мм имеют чугунные подшипниковые щиты и станины из алюминия. Электродвигатели высотой от 160 мм до 355 мм выполняются полностью с литой оболочкой из чугуна. Обеспечение степени защиты IP54 в двигателях с высотой вращения от 71 мм до 160 мм производится за счет применения подшипников с контактными уплотнениями и специальных уплотнений коробки выводов. В двигателях от 180 мм до 280 мм используется защита по линии вала в виде V-образных резиновых уплотнителей, а для высот 315 мм и 355 мм — защита с резиновыми лабиринтными уплотнителями.

Магнитопроводы двигателей новой серии 5А набраны из электротехнической стали марок 2212—2214 для габаритов 71—250 мм, 2312—2412 — для габаритов 280—355 мм. В зависимости от высоты оси вращения по-разному выполнены обмотки статора: в габаритах 71—132 мм использованы однослойные концентрические и однослойные вразвалку, в габаритах 160—250 мм применены в основном двухслойные обмотки, в 280—355 мм — двухслойные равносекционные обмотки. Отметим, что статорные обмотки всех двигателей серии 5А (за исключением двух- и четырехполюсных машин габарита 355 мм) имеют всыпные обмотки из круглого эмалированного провода. Двухполюсных и четырехполюсных двигателей 5А 355 мм обмотки выполнены из жестких секций прямоугольного эмалированного провода. При классе нагревостойкости изоляции F нагревостойкости изоляции температура обмоток статора в номинальном режиме далека от предельно допустимой, что позволяет иметь ресурс не менее 30 000 часов и эксплуатировать с сервис-фактором 1,15. Из сравнения КПД электродвигателей серий 4АМ, АИ и 5А (табл. 1) заметно увеличение КПД серий 5А по сравнению с 4АМ, АИ в среднем на 0,5—1,5 %. Повышение КПД достигалось в основном за счет оптимизации размеров активных частей и обмоточных данных, незначительного увеличения массы активных частей. Отметим, что присоединительные размеры в электродвигателях 5А совершенно идентичны присоединительным размерам в электродвигателях серий 4АМ, АИ.

Серия RA — российские асинхронные электродвигатели, освоением и выпуском которых занят Ярославский электромашиностроительный завод. При разработке серии RA добивались получения высоких энергетических, пусковых и виброакустических ха-

рактических при одновременном снижении массы. Серия имеет высоты оси вращения от 71 мм до 280 мм и ориентирована на привязку установочно-присоединительных размеров со шкалой мощностей, по общемировым стандартам (шкала С) в соответствии с европейскими стандартами CENELEC DOCUMENT 28/64 и DIN 42673, DIN 42677. В серии RA станины для высот от 71 мм до 132 мм — алюминиевые, а щиты чугунные. Для электродвигателей от  $H = 160$  мм до 280 мм станины и щиты выполняются чугунными. В связи с довольно затруднительным переходом на другую высоту оси вращения эксплуатационные службы промышленных предприятий крайне неохотно применяют серию RA. При построении новых промышленных объектов применение электродвигателей серии RA в некоторых случаях оправдано.

Номенклатура низковольтных асинхронных электродвигателей новой серии А, выпускаемой Ярославским моторостроительным заводом, отвечает требованиям потребителя в части универсального применения, высоких технических характеристик и эксплуатационной надежности, низкого энергопотребления благодаря высокому КПД. Градация мощности и присоединительных размеров по ГОСТ 28330 или РС 3031—71, полностью соответствует привязке электродвигателей новой серии 5А, приведенной в табл. 2. Основные энергетические характеристики электродвигателей серии А приведены в табл. 4.

ОАО «СИБЭЛЕКТРОМОТОР» в настоящее время выпускает две новые серии асинхронных электродвигателей 6А и АД. Двигатели серии 6А имеют привязку к установочно-присоединительным размерам по европейским стандартам «CENELEC»-DIN 42673 / DIN 42677, освоены с высотой оси вращения 80 и 90 мм (24 типонаминала, включая однофазные 6АЕ) и имеют высокие энергетические, пусковые, виброакустические характеристики, современный дизайн, повышенную надежность. Применение этой серии, так же как и RA, оправдано при замене асинхронных электродвигателей на импортном оборудовании.

Двигатели серии АД имеют привязку мощностей к установочно-присоединительным размерам по российским стандартам — ГОСТ 28330 и полностью взаимозаменяемы с сериями 4АМ, АИР, АИ, 5А. Двигатели выполнены в корпусе из алюминиевого сплава с вертикально-горизонтальным оребрением. Возможно исполнение и в чугунном корпусе. Подшипниковые щиты изготовлены из алюминиевого сплава с армированием ступицы под посадку под-

шипника стальной втулкой. Основная особенность двигателей данной серии — повышенные по сравнению с двигателями серий 4АМ, АИР, 5А значения пусковых и максимальных вращающих моментов, что позволяет с определенной степенью эффективности использовать их взамен двигателей с повышенным скольжением. В табл. 6 для иллюстрации такой возможности приведены основные технические характеристики двух типономиналов электродвигателей серии АД в сравнении с аналогичными типами серии 4АМС с повышенным скольжением. Из табл. 6 видно, что двигатели АД90L2 имеют более высокие значения пусковых и максимальных моментов, чем 4АМС 90L2. Скорость нарастания температуры обмоток статора практически одинакова для обоих типов электродвигателей. Электродвигатель АД90L6 превосходит ранее выпускаемый аналог по обоим показателям — кратностям моментов и скорости нарастания температуры.

Несмотря на постоянное совершенствование серийных асинхронных электродвигателей, основным их недостатком является потребление из сети реактивного тока ( $\cos \varphi < 1$ ), что приводит к неизменным потерям электроэнергии. Уже разработаны и предлагаются к поставке компенсированные электродвигатели, которые практически не потребляют из сети реактивного тока ( $\cos \varphi \approx 1$ ). Такой электродвигатель состоит из обычного асинхронного электродвигателя с дополнительными выводами от обмоток статора и встроенного устройства компенсации реактивной мощности. При этом увеличение стоимости компенсированного электродвигателя (КЭ) по сравнению с серийным не более 10 %. КЭ могут быть изготовлены на любую мощность до 1000 кВт и напряжением питания от 220 В до 10 кВ.

Встроенная компенсация дает повышение выходной мощности на 3,0—3,5 %, повышение пускового момента и перегрузочной способности на 15—20 %. Приоритетные сферы применения: насосы, вентиляторы, компрессоры.

Несмотря на стремительное развитие частотно-регулируемого электропривода, в некоторых случаях оправдано применение метода параметрического регулирования скорости вращения асинхронного электродвигателя, при котором осуществляется плавное изменение напряжения на питающих зажимах электродвигателя. При этом регулировочные механические характеристики электродвигателя образуются из гаммы характеристик при различных значениях питающего напряжения. В целях достижения более прием-



лемых характеристик такого привода освоены в производстве специальные асинхронные электродвигатели для параметрического регулирования (табл. 5).

Основным отличием от общепромышленного электродвигателя является наличие моментной характеристики без явно выраженного максимума в диапазоне регулирования от 3000 до 1500 об/мин или от 3000 до 1000 об/мин. Такой привод может работать только с датчиком связи обратной связи (по скорости или по значению технологического параметра). Использование привода, несмотря на повышенные потери в электродвигателе, при неглубоком регулировании (до 40 %) позволяет получить экономию электроэнергии до 30 %, особенно для мощности, не превышающей 30 кВт. Свыше 30 кВт, предпочтительно внедрение частотно-регулируемого электропривода.

Массовое внедрение частотно-регулируемого электропривода переменного тока неизбежно повлекло разработку и освоение в производстве специальных АД, основными особенностями которых являются:

- усиленная изоляция обмоток статора;
- более точная балансировка ротора на повышенную частоту вращения;
- наличие встроенных в обмотку статора термоограничителей;
- независимое принудительное охлаждение;
- датчик обратной связи;
- встроенный электромагнитный тормоз;
- возможность применения в широком диапазоне частот.

Например, в настоящее время на Владимирском электромоторном заводе с 2000 г. на базе общепромышленных серий 5А, 6А и АИР освоены электродвигатели для частотно-регулируемого привода в диапазоне высот оси вращения от 56 до 355 мм.

## **2.2. Специальные энергосберегающие режимы работы асинхронных электродвигателей и некоторые варианты их реализации**

Если применение экономичных современных асинхронных электродвигателей позволяет снизить определенное количество потребляемой электроэнергии при штатных параметрах рабочего режима, устанавливаемых нормативно-технической документа-

цией, то некоторое снижение электропотребления может быть достигнуто специальными режимами работы в нерегулируемом электроприводе.

Реализация специальных режимов в общем случае предполагает:

- контроль потребляемой мощности и линейного тока;
- контроль температуры корпуса или обмоток;
- измерение выходной мощности на валу;
- определение нагрузки на валу;
- наличие информации о характере технологических и временных циклов работы установки в целом;
- применение технических средств, оптимизирующих пусковые и тормозные режимы работы;
- знание номинальных условий эксплуатации и показателей надежности электродвигателя;
- наличие компактных и недорогих средств переключения обмоток электродвигателей;
- контроль зоны эффективной работы электродвигателя;
- автоматический выбор оптимального сочетания параметров рабочего режима: потребляемой мощности, линейного тока, величины скольжения.

В соответствии с энергетическим балансом АД структура потерь электроэнергии при его работе включает:

- потери на нагревание проводов обмотки статора —  $\Delta P_{мс}$ ;
- потери на гистерезис и вихревые токи —  $\Delta P_{ск}$ ;
- потери на нагревание проводов обмотки ротора —  $\Delta P_{мр}$ ;
- потери в сердечнике ротора на перемагничивание и вихревые токи —  $\Delta P_{ср}$ .

Целью реализации специальных режимов работы АД является снижение потребления из сети активной мощности, частью которой являются приведенные выше потери электроэнергии без заметных изменений условий технологического режима работы оборудования в целом. Анализ энергоиспользования АД показывает, что уровень обозначенных потерь электроэнергии зависит от режима потребления активной мощности приводным АД. Помимо этого, изменение характера режима энергопотребления приводным механизмом на конкретном оборудовании в большинстве случаев является определяющей возможностью для реальной минимизации уровня потребления электроэнергии с учетом существующего технологического режима.

Двигатели общепромышленного назначения, основного исполнения, с повышенным скольжением и многоскоростные могут работать в различных режимах в соответствии с ГОСТ 28173 (МЭК 34-1).

Продолжительный режим работы S1 (рис. 2.1) характерен неизменной нагрузкой в течение длительного времени, постоянными отдаваемыми мощностью и мощностью потерь в единицу времени и установившейся (неизменной) температурой. При этом все параметры рабочего режима, указанные в паспорте на АД, соответствуют режиму работы S1.

Кратковременный режим работы S2 (рис. 2.2.) отличается неизменной нагрузкой в течение времени  $t_p$ , недостаточного для достижения всеми частями машины установившейся температуры, после которого следует остановка на время, достаточное для охлаждения машины до температуры, превышающей температуру окружающей среды не более чем на  $2^\circ\text{C}$ .

Ориентировочно потребляемая мощность АД в режиме S2 определяется:

$$Ps_2 \leq Ps_1 \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{P}{T}}}}, \quad (2.1)$$

где  $Ps_1$  — номинальная мощность АД в режиме S1;  $T$  — постоянная нагрева АД.

Периодический повторно-кратковременный режим работы S3 (рис. 2.3) представляет последовательность идентичных циклов, каждый из которых включает время работы  $t_p$  при неизменной нагрузке на валу, за которое АД не успевает нагреваться до установившейся температуры, и время паузы (стоянки)  $t_n$ , за которое АД еще не охлаждается до температуры окружающей среды. При этом потери при пуске почти не оказывают влияния на температуру частей АД.

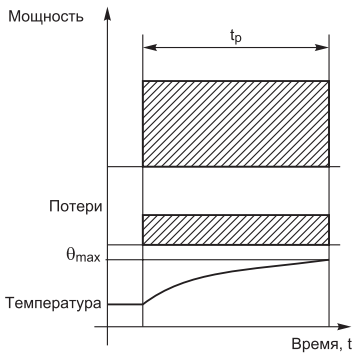


Рис. 2.1

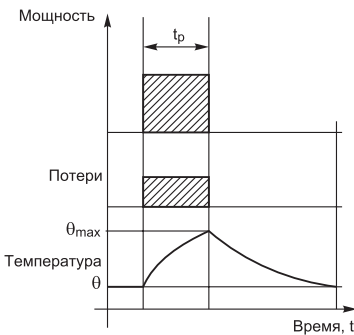


Рис. 2.2

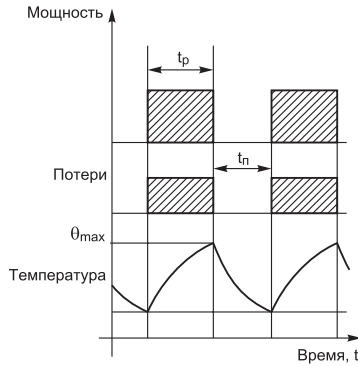


Рис. 2.3

Ориентировочно потребляемая мощность:

$$P_{S_3} = P_{S_1} \sqrt{1 + \frac{\left(1 - \frac{ПВ}{100}\right) \beta_o}{(1 - K_o) \frac{ПВ}{100}}}, \quad (2.2)$$

где  $\beta_o$  — коэффициент уменьшения теплоотдачи во время паузы  $t_n$ ;  $K_o = \frac{\Delta P_{хх}}{\Delta P_n}$ , где  $\Delta P_{хх}$  — потери при холостом ходе;  $\Delta P_n$  — потери при нагрузке;  $ПВ$  — относительная продолжительность включения, %.

Периодический повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов S4 (рис. 2.4) — это последовательность идентичных циклов работы, каждый из которых включает время пуска  $t_c$ , время работы при постоянной нагрузке  $t_p$ , за которое АД не охлаждается до температуры окружающей среды.

Допустимое число пусков АД в течение часа с динамическим моментом инерции  $J_{АД}$  [кг·м<sup>2</sup>], со статической нагрузкой, определяемой полезной мощностью  $P_2$  [кВт], и

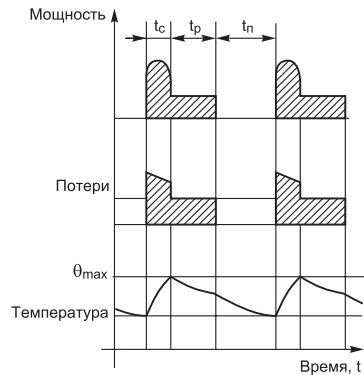


Рис. 2.4

динамической нагрузкой, определяемой динамическим моментом инерции приводимой машины  $J_M$  [кг·м<sup>2</sup>], приближенно определяется:

$$Z = Z_o \frac{K_M \cdot K_P}{F_j}, \quad (2.3)$$

$$K_M = 1 - \frac{m_{\text{стпр}}}{m_{\text{дсп}}}, \quad (2.4)$$

$$K_P = 1 - \left( \frac{P_2}{P_{2н}} \right)^2 \frac{(1 - K_o) \frac{ПВ}{100}}{(1 - K_o) \frac{ПВ}{100} + \left( 1 - \frac{ПВ}{100} \right) \beta_o}, \quad (2.5)$$

$$F_j = \frac{J_{АД} + J_M}{J_{АД}}, \quad (2.6)$$

$$m_{\text{дсп}} = \frac{m_n + 2m_k + 2m_m + 1}{6}, \quad (2.7)$$

где  $Z_o$  — допустимое число пусков в час АД при отсутствии статической и динамической нагрузок на валу;  $m_{\text{стпр}}$  — относительное значение среднего за время разгона статического момента на валу АД;  $m_{\text{дсп}}$  — относительное значение среднего за время разгона момента вращения;  $m_k$  — относительное значение максимального момента;  $m_m$  — относительное значение минимального момента.

Время разгона АД  $t_c$  до номинальной скорости  $n_1$  определяется по формуле:

$$t_c = 0,109 \left( \frac{n_1}{100} \right) \cdot \frac{J_{АД} + J_M}{P_{2н}} \cdot \frac{1}{m_{\text{дсп}} - m_{\text{стпр}}}. \quad (2.8)$$

Обычно в паспорте и инструкции по эксплуатации приводятся значения  $Z_o$  для АД серий АИР, 5А, 6А и т. д. основного исполнения.

Периодический повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов и электрического торможения S5 (рис. 2.5) отличается от предыдущего режима наличием дополнительного периода  $t_r$  быстрого электрического торможения. Такой режим ха-

рактен для привода лифтов и всевозможных подъемно-транспортных систем.

Переменяющийся режим работы S6 (рис. 2.6) представляется последовательностью идентичных циклов, каждый из которых включает время работы  $t_p$  с постоянной нагрузкой и время холостого хода  $t_x$ . При этом длительность  $t_p$  и  $t_x$  такова, что температура АД на достигает установившегося значения. Время разгона (пуска) определяется также, как в режиме S4.

Периодический переменяющийся режим S7 с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением (рис. 2.7) также включает последовательность идентичных циклов, содержащих время пуска  $t_c$ , время работы  $t_p$  с постоянной нагрузкой и время быстрого торможения  $t_T$ .

Есть еще периодический переменяющийся режим с периодически изменяющейся частотой вращения S8 (рис. 2.8), основным отличием

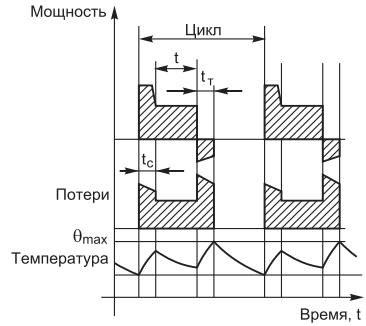


Рис. 2.5

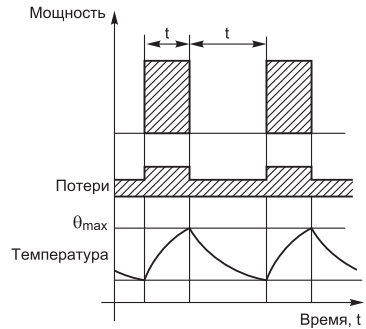


Рис. 2.6

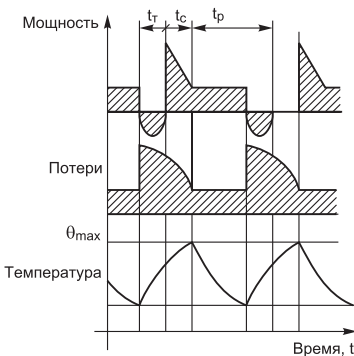


Рис. 2.7

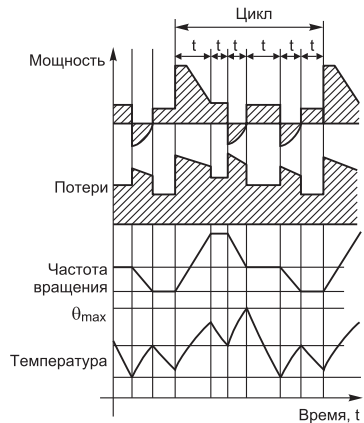


Рис. 2.8

которого от  $S7$  является различная частота вращения при неизменных нагрузках на валу, то есть при мощности  $P_1$  частота  $n_1$ , при мощности  $P_1 = P_2$  — частота  $n_2$  и т. д. Такой режим работы характерен для многоскоростных АД, работающих с неизменной нагрузкой на валу, например в приводах моталок со ступенчатой намоткой или экструдерах.

При работе в режиме  $S1$  возможны случаи значительного снижения нагрузки на валу на довольно продолжительный период (от десятков минут до нескольких часов). В этом случае для снижения потребляемой мощности и некоторого увеличения значения  $\cos \varphi$  бывает целесообразно симметрично снизить напряжение на обмотке статора АД с помощью симисторного преобразователя напряжения ПН (рис. 2.9).

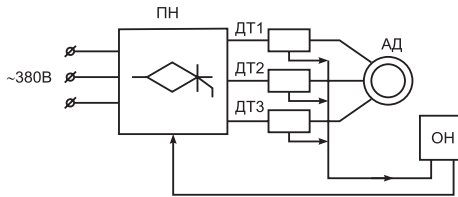


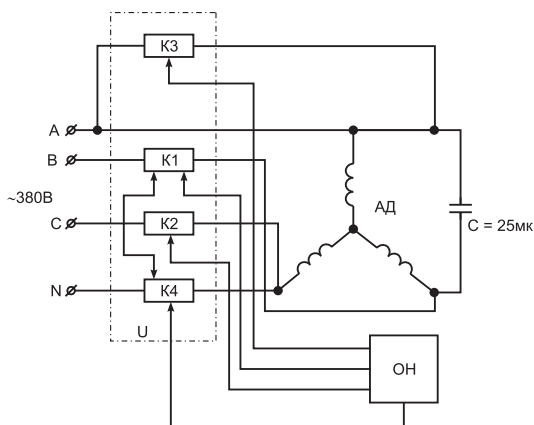
Рис. 2.9

Уровень снижения напряжения зависит от степени продолжительного сброса нагрузки и определяется из условий сохранения значения вращающего момента, достаточного для поддержания такой частоты вращения, при которой действительное скольжение  $S_d$  не превышает критическое  $S_k$ :

$$S_d \leq S_k. \quad (2.9)$$

С помощью ОН (определитель нагрузки) устанавливается контроль за уровнем статического момента нагрузки с изменяемой уставкой на некоторое понижение напряжения.

Кроме этого, возможен вариант реализации снижения энергопотребления при длительном сбросе нагрузки за счет подключения АД к одной из трех фаз питающей сети по команде от ОН. Как показывают опытная эксплуатация схемы и расчеты, наибольший эффект достигается в случае полной разгрузки АД на длительный период. Например, для АД АИР 71В4 0,75×1500 об/мин потребляемая мощность в режиме холостого хода при трехфазном включении составляла 546 Вт, при однофазном включении (рис. 2.10) не превышала 200 Вт.



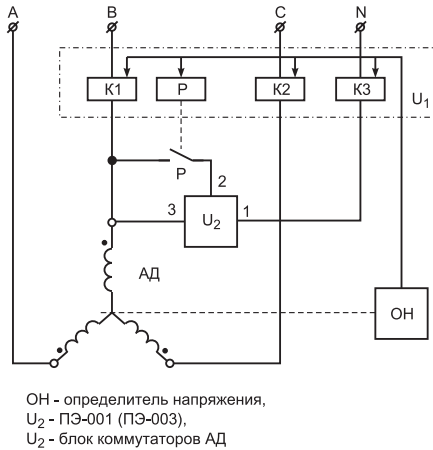
**Рис. 2.10.** U — схема управления и коммутации; K1, K2, K3, K4, ОН — функциональные элементы схемы управления и коммутации, осуществляющие изменение схемы включения АД

Следует отметить, что конкретному схмотехническому решению должна предшествовать работа по определению значения фазосдвигающей емкости  $C$  и схемы включения фаз АД в однофазную сеть из условия минимума эллиптичности основного поля и полного отсутствия обратного поля.

Надежным и проверенным в эксплуатации техническим решением являются электронные пускатели ПЭ-002 и ПЭ-004, выпускаемые одним из заводов Украины, которые позволяют производить запуск трехфазного АД мощностью до 2,2 кВт (ПЭ-003, ПЭ-004) и до 4 кВт (ПЭ-001, ПЭ-002) от однофазной сети — без использования неполярных конденсаторов. При этом с помощью встроенного преобразователя фаз осуществляется «индуктивный» и «емкостный» сдвиг для любых двух фаз. Начальный пусковой момент может регулироваться и достигать наибольшего для конкретного электродвигателя при полном отсутствии обратного поля и минимуме эллиптичности.

Интересным представляется решение, выгодно заменяющее предыдущий вариант подключения АД к однофазной сети с конденсатором при полной разгрузке работающего АД (рис. 2.11). В схеме используется одноканальный преобразователь фаз ПЭ-001 (ПЭ-003), блок бесконтактных коммутаторов тока (K1, K2, K3) с релейным выходом Р. При продолжительной разгрузке АД по команде с определителя нагрузки отключаются элементы K1, K2, включаются элемент K3 на время работы в режиме холостого хода





**Рис. 2.11.** ОН — определитель напряжения; U<sub>2</sub> — ПЭ-001 (ПЭ-003);  
 U<sub>1</sub> — блок коммутаторов АД

и реле Р на 4—5 с для запуска преобразователя фаз U<sub>2</sub>. При этом предварительно производится несколько пусков АД от однофазной сети для регулировки момента с помощью подстроечного резистора, встроенного в преобразователь фаз U<sub>2</sub>.

Работа АД в режимах S2—S8 сопровождается переходными процессами, вызывающими значительные потери электроэнергии. Проведем оценку потерь электроэнергии и времени переходного процесса нерегулируемого электропривода с АД как в режиме холостого хода (привод разгружен), так и при постоянной нагрузке на валу ( $M_H = \text{const}$ ). Потери энергии  $\Delta A_{\text{п}}$  от переменных потерь мощности при пуске и электродинамическом торможении в режиме холостого хода определяются выражением [23, 24]:

$$\Delta A_{\text{от}} = \Delta A_{\text{оп}} = (1 + R_1/R_2') J_1 \cdot W_0^2 / 2, \quad (2.10)$$

где  $R_1, R_2'$  — активные сопротивления обмоток статора и ротора (приведенные);  $J_1$  — момент инерции нерегулируемого электропривода;  $W_0$  — синхронная угловая скорость.

При этом время переходного процесса (при пуске и торможении) как при  $M_H = 0$ , так при  $M_H = \text{const}$  определяется:

$$t_{\text{пп}} = J_1 \cdot W_0 / M_{\text{п}} = J_1 W_0 / M_{\text{т}}, \quad (2.11)$$

где  $M_{\text{п}}, M_{\text{т}}$  — средние пусковой и тормозной моменты.

Потери энергии в переходных режимах при  $M_H = \text{const}$  и при максимально допустимом электромагнитном моменте  $M_{\text{эм}}$  с до-

статочной для инженерных расчетов точно можно определить при пуске:

$$\Delta A_{II} = \Delta A_{OII} [M_{ЭМ} / (M_{ЭМ} - M_H)] = M_{ЭМ} / M_{ДП}, \quad (2.12)$$

$$\Delta A_T = \Delta A_{OII} [M_{ЭМ} / (M_{ЭМ} + M_H)] = M_{ЭМ} / M_{ДТ}, \quad (2.13)$$

где  $M_{ДП} = M_{ЭМ} - M_H$  — динамический момент при пуске;  $M_{ДТ} = M_{ЭМ} + M_H$  — динамический момент при торможении.

Суммарные потери за время пуска и торможения ориентировочно составят:

$$\Delta A \approx 2\Delta A_O M_{ЭМ}^2 / (M_{ЭМ}^2 - M_H^2), \quad (2.14)$$

где  $\Delta A_O = \Delta A_{OT} = \Delta A_{OII}$  — потери при разгруженном приводе.

Бороться со снижением потерь  $\Delta A_O$  и  $\Delta A$  можно путем использования специальных электродвигателей, имеющих оптимальные или близкие к ним значения критического скольжения для пуско-тормозных режимов. Например, для уменьшения времени переходного процесса и потерь энергии используют крановые электродвигатели либо АД с повышенным скольжением, у которых:

$$S_K \approx S_{КОПТ} \approx 0,41 \text{ при пуске;}$$

$$S_K \approx S_{КОПТ} \approx 1,48 \text{ при торможении противовключением;}$$

$$S_K \approx S_{КОПТ} \approx 0,74 \text{ при наличии реверса.}$$

При использовании в пуско-тормозных режимах общепромышленных серий АД, значения  $S_K$  которых далеки от оптимальных значений по критерию минимума времени переходного процесса и потерь электроэнергии во время его прохождения, в случае постоянной нагрузки на валу в ряде приводных устройств можно применять быстродействующие муфты, с помощью которых момент нагрузки  $M_H$  «подключается» к валу АД после окончания переходного процесса его запуска и «отключения» нагрузки от вала перед началом торможения или реверса электродвигателя. В этом случае потребление электроэнергии будет покрывать практически только потери переходных процессов разгруженного электродвигателя  $\Delta A_O$ . Для реализации такого режима необходимы датчик скорости или скольжения и сигнал от системы управления приводом о начале торможения (рис. 2.12).

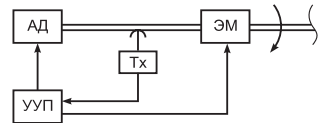


Рис. 2.12. Тх — датчик угловой скорости (тахометр); ЭМ — специальная электромагнитная муфта; УУП — устройство управления приводом

Большие возможности для снижения и оптимизации электропотребления нерегулируемого по частоте вращения электропривода заключены в использовании коммутационной бесконтактной аппаратуры, позволяющей активно формировать характер переходных процессов за счет варьирования уровнем электромагнитного момента  $M_{эм}$ , значение которого достигается определенным изменением в нужный момент величины напряжения, питающего АД. Такой режим обеспечивается ограниченным, кратковременным параметрическим регулированием. Как известно, частным случаем ограниченного параметрического регулирования является мягкий пуск крупных АД при пониженном напряжении питания с последующим его ростом до номинального значения по заранее установленной зависимости  $U=f(t)$ . Например, если обеспечить такое значение электромагнитного момента  $M_{эм}$ , чтобы ускорение и замедление электропривода были равны, то потери электроэнергии можно снизить при переходных процессах в среднем на 30—35 %, не считая других побочных положительных эффектов (улучшение условий работы элементов механических передач). Вышеприведенные выражения для потерь электроэнергии соответствуют пуско-тормозным режимам при максимально допустимом значении  $M_{эм}$  и, соответственно, при разных значениях ускорения и замедления.

### **2.3. Техничко-экономические аспекты повышения КПД и коэффициента мощности асинхронных электродвигателей**

Как известно, асинхронные электродвигатели (АД) являются основным типом приводных электродвигателей, применяемых в промышленности, сельском хозяйстве и в бытовой технике, и потребляют более чем 50 % вырабатываемой электроэнергии. Поэтому вопросы оптимизации и снижения электропотребления применительно к АД являются довольно актуальными. Напомним, что основными параметрами рабочего режима АД являются:

1. Потребляемая комплексная мощность:

$$S_1 = P_1 + j \cdot Q_1 = 3U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + j \cdot 3U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1, \quad (2.15)$$

где  $P_1$ ,  $Q_1$  — активная и реактивная составляющие.

Активная мощность  $P_1$  отражает среднюю мощность необратимого преобразования электроэнергии в АД, получаемой из сети. Реактивная мощность  $Q_1$  определяет мощность энергетического обмена между сетью и работающим АД.

2. Потребляемый линейный ток:

$$I_1 = \frac{P_2}{U_1 \cdot \eta \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.16)$$

где  $P_2$  — полезная (отдаваемая) мощность на валу АД, кВт;  $U_1$  — подводимое напряжение сети, В;  $\eta$  — коэффициент полезного действия, %;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности.

3. Коэффициент полезного действия  $\eta$  выражает отношение мощности  $P_2$  к активной мощности  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2}, \quad (2.17)$$

где  $\sum P$  — суммарные потери в АД.

4. Скольжение  $S$ , устанавливающее соотношение между угловыми скоростями магнитного поля  $\omega_n$ , равного угловой частоте синусоидального тока питающей сети, и ротора  $\omega_p$ :

$$S = \frac{\omega_n - \omega_p}{\omega_n} = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (2.18)$$

где  $n_1$ ,  $n$  — частоты вращения поля и ротора в об/мин.

5. Коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , определяющий отношение между активной и реактивной мощностями:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}. \quad (2.19)$$

Из выражений (2.17) и (2.19) видно, что наиболее выразительными показателями энергоэффективности АД являются параметры  $\eta$  и  $\cos \varphi$ .

В качестве показателя энергосбережения можно привести относительное снижение суммарных потерь асинхронного электродвигателя с повышенным КПД ( $\sum P_\vartheta$ ) по сравнению с суммарными потерями ( $\sum P$ ) ранее применяемого:

$$\vartheta = \frac{\sum P - \sum P_\vartheta}{\sum P}. \quad (2.20)$$

Если задаваться значением показателя  $\mathcal{E}$ , то КПД более экономичного электродвигателя определяется как

$$\eta_{\mathcal{E}} = \frac{\eta}{1 - \mathcal{E}(1 - \eta)}, \quad (2.21)$$

где:  $\eta$  — КПД ранее применяемого электродвигателя.

Если знать дополнительные затраты на производство энерго-сберегающих электродвигателей и сравнить их с получаемой экономией электроэнергии, то можно с практической точностью оценить эффект от использования асинхронного электродвигателя с повышенным КПД. Современные производители асинхронных электродвигателей устанавливают, как правило, минимальное значение относительно снижения потерь ( $\mathcal{E} \approx 0.2$ ). В табл. 1 приведена ориентировочная шкала базовых значений КПД при  $\mathcal{E} \approx 0.2$ . Подбор и поставка электродвигателей новейших серий как отечественного, так и зарубежного производства должны производиться исходя из следующих данных:

- КПД ранее установленного и сгоревшего асинхронного электродвигателя ( $\eta$ );
- стоимость его ремонта ( $Q_p$ );
- КПД поставляемого электродвигателя ( $\eta_{\mathcal{E}}$ );
- стоимость нового электродвигателя ( $Q_{\mathcal{E}}$ ).

При этом разница в стоимости нового электродвигателя и стоимости ремонта  $\Delta C = Q_{\mathcal{E}} - Q_p$  является отправной точкой для установления целесообразности замены:

$$\Delta \mathcal{E} \geq \Delta C, \quad (2.22)$$

где  $\Delta \mathcal{E}$  — годовая экономия от внедрения более экономичного асинхронного электродвигателя, руб.

$$\Delta \mathcal{E} = C \mathcal{E} P_2 \frac{1 - \eta}{\eta} K_3 t_0, \quad (2.23)$$

где  $C$  — стоимость 1-го кВт·ч электроэнергии, руб.;  $K_3$  — коэффициент загрузки асинхронного электродвигателя;  $t_0$  — годовая наработка, ч.

## 2.4. Выбор электродвигателей для приводных устройств

Правильный выбор электродвигателя — это прежде всего частичное решение проблемы оптимизации электропотребления средствами электропривода при полном удовлетворении требований производительности и надежности технологического оборудования. Электродвигатель должен быть выбран так, чтобы:

- мощность использовалась как можно полнее;
- рабочая температура была не более предельно допустимой, но как можно ближе к ней;
- пусковой момент соответствовал динамическим характеристикам и начальным условиям пуска приводного механизма;
- перегрузочная способность соответствовала временным перегрузкам механизма;
- при больших кратковременных набросах момента нагрузки требуемая максимальная мощность покрывалась располагаемой максимальной мощностью электродвигателя.

Установка электродвигателя завышенной мощности сопровождается излишними потерями электроэнергии, дополнительными капитальными вложениями и увеличением массогабаритных характеристик установки. При установке электродвигателя недостаточной мощности снижаются проектная производительность и динамические характеристики приводного механизма. Выбору электродвигателя должны предшествовать тщательное изучение режимов работы приводного механизма в целом, анализ энергоиспользования в стационарном и переходном режимах работы, а также рассмотрение внешних отрицательных воздействий: изменения напряжения, температуры окружающей среды, возможного внезапного увеличения момента нагрузки на валу приводного механизма. Кроме этого, выбор зависит от существующей системы питания приводного электродвигателя: трехфазная сеть промышленной частоты  $f = 50$  Гц,  $U = 380$  В, инвертор тока (напряжения) регулируемых частоты и напряжения, параметрический регулятор напряжения с неизменяемой выходной частотой.

В случае постоянной и мало меняющейся нагрузки на валу статический электромагнитный момент электродвигателя:

$$M = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_1} \cdot \frac{r_2 S}{(r_1 S + cr_2)^2 + (x_1 + cx_2)^2 S^2}, \quad (2.24)$$

должен быть приблизительно равен нагрузочному моменту  $m_L \leq M$ .

Проверку на нагрев и перегрузку во время работы производить не нужно, но оценка достаточности пускового момента необходима. В процессе пуска, как известно, уравнение равновесия моментов на валу имеет вид:

$$M = m_L + M_D, \quad (2.25)$$

где  $M_D$  — динамический момент системы;  $m_L$  — нагрузочный или постоянный момент системы.

$$M_D = J \frac{d\omega_2}{dt} 10^{-4} [\text{Н} \cdot \text{М}],$$

где  $J$  — момент инерции всех вращающихся частей механической системы на валу,  $\text{кг} \cdot \text{см}^2$ ;  $\omega_2$  — угловая скорость вращения вала,  $\text{рад/с}$ .

Во время пуска должно выполняться следующее условие: пусковой момент  $M_{II} > m_L$ , а динамический момент системы:

$$M_D = M - m_L > 0. \quad (2.26)$$

По окончании процесса пуска  $M_D = 0$  и установившийся режим характеризуется равенством  $M = m_L$ .

Выражение для пускового момента при  $S = 1$  и  $\omega_2 = 0$  имеет вид:

$$M_{II} = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_1} \cdot \frac{r_2}{(r_1 + cr_2)^2 + (x_1 + cx_2)^2}, \quad (2.27)$$

где в выражениях  $M$  и  $M_{II}$  коэффициент  $c \approx 1 + \left( \frac{x_1}{x_M} \right)$ ;  $x_M$  — индуктивное сопротивление намагничивающего контура;  $x_1$  — индуктивное сопротивление обмотки статора.

По принятой классификации такой характер нагрузки соответствует режиму S1, отличительной особенностью которого является длительная непрерывная работа с номинальным моментом на валу и установившейся температурой.

Все остальные сочетания условий приложения момента нагрузки к валу электродвигателя в полной мере характеризуются известными режимами работы (S2—S8) и требуют проверки электродвигателя по нагреву как определяющему фактору нормальной работы любой электрической машины.

S2 — кратковременный режим с длительностью периода неизменной номинальной нагрузки 10, 30, 60 и 90 мин.

S3 — повторно кратковременный режим с продолжительностью включения (ПВ) 15, 25 и 60 % в цикле 10 мин.

S4 — повторно кратковременный режим с частыми пусками (число включений в час 30, 60, 120, 240 при ПВ 15, 25, 40, 60 %) при коэффициенте инерции нагрузки на валу:

$$C_J = \frac{J_H}{J_P} = 1.2; 1.6; 2; 2.5; 4, \quad (2.28)$$

где  $J_H$  — момент инерции ротора,  $\text{кг} \cdot \text{см}^2$ ;  $J_P$  — момент инерции нагрузки,  $\text{кг} \cdot \text{см}^2$ .

S5 — повторно кратковременный режим с частыми пусками и электромагнитным торможением с ПВ 15, 25, 40, 60 % и числом включений в час 30, 60, 120, 240 при  $C_J = 1.2; 1.6; 2; 2.5$ .

S6 — перемежающийся режим с ПВ = 15, 25, 40, 60 % с продолжительностью 1-го цикла 10 мин.

S7 — режим, перемежающийся с частыми реверсами и остановками, электромагнитным торможением. Число циклов «останов с торможением — реверс — разгон» в час составляет 30, 60, 120, 240 при коэффициенте инерции  $C_J = 1.2; 1.6; 2; 2.5; 4$ .

S8 — режим, перемежающийся с двумя или более частотами вращения, с числом циклов в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции  $C_J = 1.2; 1.6; 2; 2.5; 4$ .

Выбор мощности асинхронного электродвигателя по условиям нагрева при кратковременном и повторно кратковременном режимах работы традиционно осуществляется построением графика нагрева (или расчетным путем) либо более упрощенными методами, основанными на определении эквивалентного тока или эквивалентного момента. Указанные методы имеют достаточно точные с инженерных позиций результаты и предполагают следующие допущения:

- асинхронный электродвигатель является полностью однородным телом;



- средние потери в электродвигателе при переменном моменте нагрузки равны потерям при продолжительной номинальной нагрузке;
- коэффициент мощности постоянный;
- сопротивление обмоток статора и ротора постоянное.

Аналитические основы указанных методов описаны в [1] и практически мало используются эксплуатационными службами промышленных предприятий. Выбор мощности электродвигателей в этих случаях производится исходя из опыта эксплуатации аналогичного оборудования и простейших ориентировочных расчетов, учитывающих особенности механических и перегрузочных характеристик конкретных серий асинхронных электродвигателей. Кроме того, в инженерной практике, независимо от способа выбора мощности, всегда проверяется достаточность максимального момента для удовлетворения условиям кратковременных перегрузок привода. В этом случае коэффициент перегрузки электродвигателя  $k_{II}$  должен быть больше отношения максимального момента  $M_{\max}$  нагрузки к номинальному моменту электродвигателя, то есть:

$$k_{II} > M_{\max} / M_{\text{ном}} . \quad (2.29)$$

Данные по кратности максимального и пускового моментов всегда приводятся в паспорте на конкретный тип электродвигателя.

# Глава 3

## Частотно-регулируемый электропривод переменного тока

### 3.1. Теоретические основы синтеза систем управления электроприводом переменного тока и принципы построения статических преобразователей частоты

В данном разделе речь будет идти об электроприводе переменного тока, где в качестве исполнительного органа используется асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым или фазным ротором, который с позиций математической теории электрических машин и синтеза систем управления рассматривается как элемент сложной электромеханической системы — объекта регулирования. С целью упрощения аналитического описания процессов, происходящих при управлении асинхронным электродвигателем, приняты некоторые допущения [7, 8, 9, 10]:

- магнитодвижущие силы, создаваемые токами фаз, синусоидально распределены вдоль воздушного зазора, тем самым игнорируется влияние высших пространственных гармоник магнитного поля;
- электрическая машина симметрична, т. е. обмотки фаз имеют равное число витков;
- не рассматривается влияние зубцовых составляющих магнитодвижущей силы;
- отсутствуют насыщение и потери в стали;
- отсутствует влияние энергии электростатического поля, образованного за счет наличия емкости внутри обмоток и между ними.

Если учесть, что практически всегда отсутствует электрическое соединение нулевой точки электродвигателя и преобразователя, то сумма токов обмоток статора и ротора, являющихся произвольными функциями времени, равна нулю:

$$i_{S_1}(t) + i_{S_2}(t) + i_{S_3}(t) = 0. \quad (3.1)$$

Так как в идеализированной машине потоки и потокосцепления пропорциональны токам, то можно рассматривать синусоидальные пространственные волны потоков и потокосцеплений фаз, а также их результирующую волну, которая может быть представлена пространственным вектором, равным по модулю амплитуде волны и направленным вдоль этой волны [1].

На рис. 3.1 показано поперечное сечение электродвигателя с числом пар полюсов  $p = 2$  (распределенные обмотки статора и ротора обозначены центрами соответствующих катушек).

**Примечание:** горизонтальные оси систем координат  $a, b$  и  $d, q$  условно совмещены с осями статора и ротора соответственно (рис. 3.2).

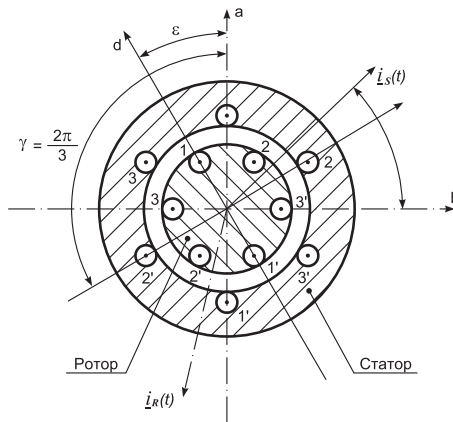


Рис. 3.1.  $a, b$  — неподвижная система координат статора;  $d, q$  — вращающаяся система координат со скоростью ротора;  $\varepsilon$  — угол между системами координат;  $\alpha$  и  $\beta$  — переменные углы положения вектора фазных токов для трехфазных симметричных систем статора и ротора;  $\rho_s$  — угол, характеризующий положение результирующего вектора тока статора в комплексной плоскости, перпендикулярной оси электродвигателя.

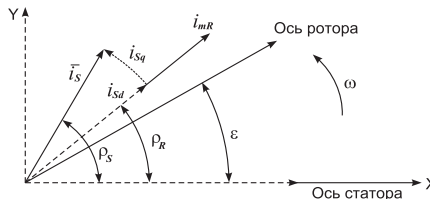


Рис. 3.2.  $X, Y$  — координаты комплексной плоскости (действительная ось совмещена с осью статора) перпендикулярной оси электродвигателя

Выражение для результирующего вектора тока статора в комплексной плоскости, перпендикулярной оси двигателя:

$$\bar{i}_S(t) = i_{S_1}(t) + i_{S_2}(t)e^{j\gamma} + i_{S_3}(t)e^{j2\gamma} = i_S e^{j\varphi_S(t)}. \quad (3.2)$$

При синусоидальных токах статора, образующих симметричную трехфазную систему, результирующий вектор тока движется по круговой траектории с постоянной угловой скоростью. Аналогично — результирующий вектор тока ротора во вращающейся со скоростью ротора системе координат  $d$  и  $q$ :

$$\bar{i}_R = i_{R_1}(t) + i_{R_2}(t)e^{j\gamma} + i_{R_3}(t)e^{j2\gamma}. \quad (3.3)$$

В этом случае (при рассмотрении такой идеализированной электрической машины) векторы потокоцепления статора и ротора определяются:

$$\bar{\Psi}_S(t) = L_S \bar{i}_S(t) + M \bar{i}_R(t)e^{j\epsilon}, \quad (3.4)$$

$$\bar{\Psi}_R(t) = M \bar{i}_S(t) + L_R \bar{i}_R(t)e^{j\epsilon}, \quad (3.5)$$

где  $L_S$ ,  $L_R$  и  $M$  — соответственно статорная, роторная и взаимная индуктивности обмоток.

Тогда напряжения статора и ротора в векторной форме будут определяться:

$$\bar{U}_S(t) = R_S \bar{i}_S(t) + \frac{d\bar{\Psi}_S}{dt} = R_S \bar{i}_S(t) + L_S \frac{d\bar{i}_S(t)}{dt} + M \frac{d(\bar{i}_R e^{j\epsilon})}{dt}, \quad (3.6)$$

$$\bar{U}_R(t) = R_R \bar{i}_R(t) + \frac{d\bar{\Psi}_R}{dt} = R_R \bar{i}_R(t) + L_R \frac{d\bar{i}_R(t)}{dt} + M \frac{d(\bar{i}_S e^{-j\epsilon})}{dt}, \quad (3.7)$$

где  $R_S$ ,  $R_R$  — активные сопротивления фаз обмоток статора и ротора, а

$$U_S(t) = U_{S_1}(t) + U_{S_2}(t) + U_{S_3}(t)e^{j2\gamma}. \quad (3.8)$$

Выражение для электромагнитного момента идеализированного электродвигателя имеет вид [7]:

$$m_d(t) = \frac{2}{3} M I_m [\bar{i}_S (\bar{i}_R e^{j\epsilon})]. \quad (3.9)$$

Векторная диаграмма для результирующих векторов тока статора и ротора с учетом угла  $\epsilon$  сдвига между системами координат  $a$ ,  $b$  статора и  $d$ ,  $q$  ротора будет выглядеть, как на рис. 3.2.

Здесь: результирующий вектор тока статора  $\vec{i}_S$  вращается с угловой скоростью  $\omega = 2\pi f$ , и его положение в комплексной плоскости определяется углом  $\rho_S$ , а положение результирующего вектора тока ротора  $\vec{i}_R$  —  $\rho_R$ , вращающимся с угловой скоростью ротора во вращающейся системе координат  $d, q$ , смещенной на угол  $\varepsilon$  относительно неподвижной системы координат  $a, b$  статора. В этом случае выражение электромагнитного момента примет вид:

$$m_d(t) = \frac{2}{3} M i_S(t) \cdot i_R(t) \cdot \sin(\rho_S - \rho_R). \quad (3.10)$$

Отметим, что уравнения напряжений статора и ротора, электромагнитного момента могут быть заменены системой из шести дифференциальных уравнений для составляющих векторных величин напряжения статора  $U_S$ , ротора  $U_R$ , тока статора  $i_S$ , тока ротора  $i_R$ , потокосцепления статора  $\Psi_S$ , потокосцепления ротора  $\Psi_R$  в любой из рассматриваемых систем координат.

В дополнение к этим выражениям приведем общеизвестные уравнения механического движения, вытекающие из рассмотрения динамической модели асинхронного электродвигателя, представленной на рис. 3.3.

$$I = \frac{d\omega}{dt} = md - mL, \quad (3.11)$$

$$\omega = \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (3.12)$$

где:  $I$  — момент инерции;  $mL$  — момент нагрузки;  $md$  — электромагнитный момент.

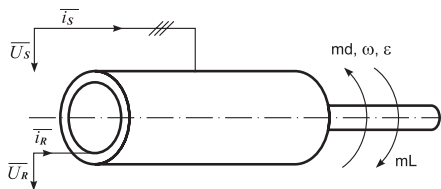


Рис. 3.3

На рис. 3.4 показана эквивалентная схема роторных цепей асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым или фазным

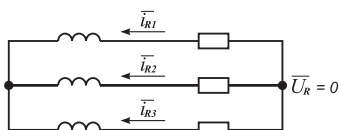


Рис. 3.4

ротором, используемая при организации математической модели асинхронного электродвигателя.

Основополагающими вопросами при синтезе систем частотно-го управления асинхронным электродвигателем являются:

1. Выбор метода управления асинхронным электродвигателем, их может быть два: скалярный или векторный.

2. В случае векторного метода необходимо решение вопроса о выборе:

- системы отчета и ориентации координатных осей;
- регулируемых координат и законов их взаимосвязанного управления.

Что касается выбора системы отчета, в практике разработки частотно-регулируемых электроприводов наиболее распространены системы, координатные оси которых ориентированы:

- по вектору  $\Psi_R$  потокосцепления ротора с вращающейся системой координат  $d, q$ ;
- по вектору напряжения ротора  $\vec{U}_R$  с вращающейся системой координат  $d, q$ ;
- по продольной оси ротора с вращающейся системой координат  $d', q'$ ;
- по оси статорной обмотки любой из фаз (a, b, c) с неподвижной системой координат a, b.

Удачный выбор системы отчета регулируемых координат и законов их взаимосвязанного управления приводит к наиболее рациональной структуре системы управления, которая характеризуется:

- относительно простым выражением электромагнитного момента с минимальным числом основных координат, подлежащих регулированию;
- минимумом внутренних прямых и обратных собственных связей;

- минимумом внутренних прямых и обратных перекрестных связей;
- наличием в прямых каналах только линейных звеньев;
- реальными возможностями и удобством измерения и расчета переменных объекта, подлежащих регулированию.

В работах Ф. Блашке [8, 9], А. А. Аббонданти [7], А. Наба [10] и [12] были сформулированы принципы синтеза системы управления, ориентированной по вектору потокосцепления ротора  $\bar{\psi}_R$ , которые стали основой для построения математических моделей и их программно-аппаратной реализации на базе специализированных микроконтроллеров. Практически во всех частотно-регулируемых электроприводах зарубежного и российского производства алгоритмы векторного управления основаны на управлении асинхронным двигателем в системе координат, ориентированных по вектору  $\bar{\psi}_R$ . В связи с этим рассмотрим основные положения, касающиеся способов определения вектора потокосцепления  $\bar{\psi}_R$ .

Первый и данный метод основан на непосредственном (физическом) измерении с помощью датчиков Холла или специальной измерительной обмотки мгновенных значений напряженности магнитного поля в двух точках воздушного зазора между ротором и статором, сдвинутых в пространстве на угол  $\frac{2\pi}{3}$ . Преимуществом такого метода является абсолютная независимость получаемых значений от изменения температуры обмотки ротора и достоверность получаемой информации.

В качестве недостатков следует отметить:

- необходимость применения специальных активных фильтров в тракте измерения магнитного потока для подавления высших гармонических составляющих, обусловленных зубцовыми составляющими, что ограничивает диапазон выходных частот преобразователя для питания электродвигателя;
- существующее ограничение по диапазону регулирования скорости в случае использования измерительной обмотки;
- необходимость применения электродвигателей специальной конструкции, что усложняет процесс внедрения привода.

Широко применяемый в настоящее время метод вычисления вектора потокосцепления  $\bar{\psi}_R$  по математической модели асинхронного электродвигателя, вводимый в систему управления, основан на измерении токов фаз статора и скорости ротора [14, 15].

Если ввести коэффициент расстояния  $\sigma$  и приравнять число витков обмоток статора и ротора, то можно записать:

$$L_S = (1 + \sigma_S)L_0; \quad (3.12)$$

$$L_R = (1 + \sigma_R)L_0, \quad (3.13)$$

где  $L_0 = M$ , а  $\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_S) \cdot (1 + \sigma_R)}$ .

Тогда уравнение напряжения ротора в векторной форме можно представить (для электродвигателя с короткозамкнутым ротором):

$$\bar{U}_R \cdot \bar{i}_R(t) + L_0 \frac{d}{dt} [(1 + \sigma_R) \bar{i}_R(t) + \bar{i}_S \cdot e^{-j\epsilon}] = 0. \quad (3.14)$$

Так как в электродвигателе с короткозамкнутым ротором токи ротора не могут быть непосредственно измерены, определяется вектор намагничивающего тока, характеризующий вектор потока сцепления ротора (рис. 3.2):

$$\bar{i}_{mR}(t) = \bar{i}_R \cdot e^{j\epsilon} = \bar{i}_S + (1 + \sigma_R) \cdot \bar{i}_R \cdot e^{j\epsilon}. \quad (3.15)$$

Тогда уравнение напряжения ротора примет вид:

$$\frac{L_R}{R_R} \cdot \frac{d\bar{i}_{mR}}{dt} + (1 + j\omega \frac{L_R}{R_R}) \cdot \bar{i}_{mR} = i_S \cdot e^{-j\epsilon}. \quad (3.16)$$

Раскладывая уравнение в системе координат комплексной плоскости на действительную и мнимую части, получим:

$$T_R \frac{d\bar{i}_{mR}}{dt} + i_{mR} = R_e (\bar{i}_S e^{-j\epsilon}) = i_{Sd}, \quad (3.17)$$

$$\frac{dp_R}{dt} = \omega_{mR} = \omega + \frac{1}{T_R \cdot i_{mR}} \cdot i_m (i_S \cdot e^{-j\epsilon}) = \omega + \frac{i_{Sq}}{T_R \cdot i_{mR}}. \quad (3.18)$$

С учетом приведенных соотношений и векторной диаграммы токов асинхронного электродвигателя, показывающей угловые соотношения при переходе от неподвижной системы координат статора а, б к вращающейся системе координат поля ротора д, е, уравнение момента электродвигателя можно представить в виде:

$$m_d(t) = \frac{2}{3} L_0 \frac{1}{1 + \sigma_R} i_{mR} I_m (\bar{i}_S e^{-j\epsilon}) = K i_{mR} i_{Sq} = K' i_{Sd} i_{Sq}. \quad (3.19)$$

То есть, как и в машине постоянного тока с независимым возбуждением, электромагнитный момент в координатах  $\psi_R$  определяется произведением потока (продольная составляющая тока статора  $i_{Sd}$ ) на ток якоря (поперечная составляющая тока статора  $i_{Sq}$ ).



На основании предыдущих выражений на рис. 3.5 и 3.6 представлены варианты моделей асинхронного электродвигателя и модели потока в координатах  $\Psi_R$ .

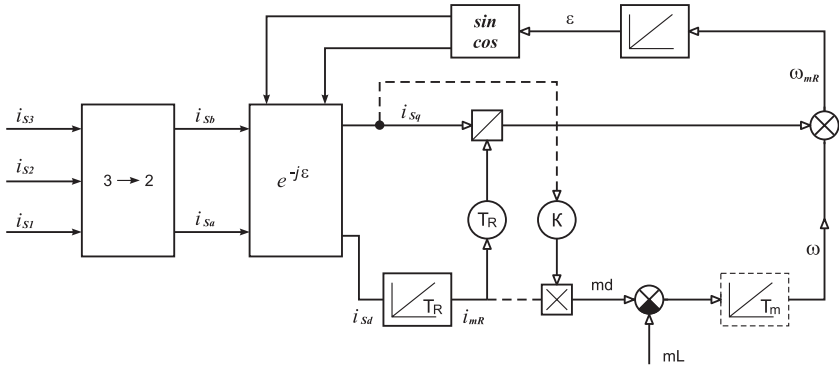


Рис. 3.5

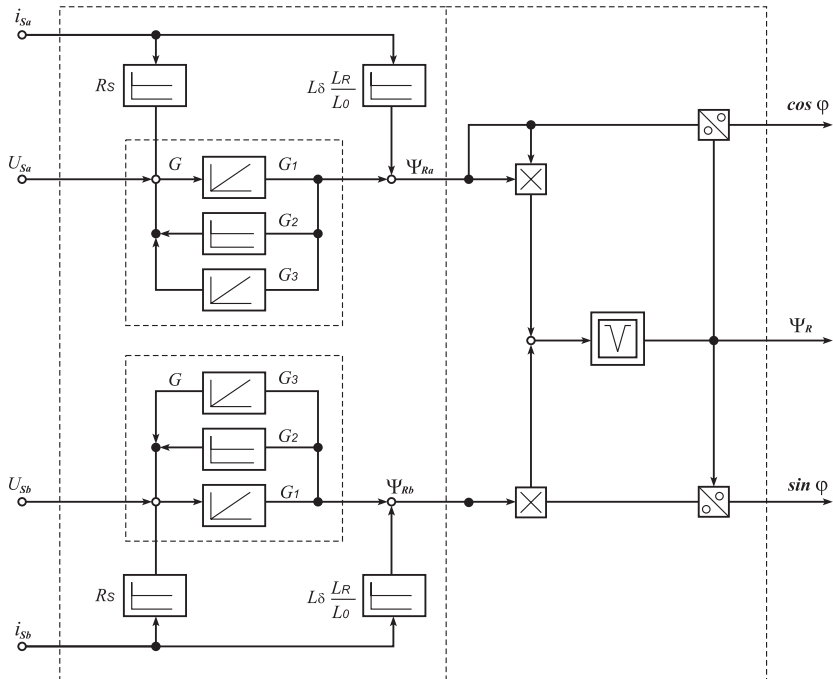


Рис. 3.6

Модель потока синтезируется в ортогональной системе координат статора а, b на основании решения уравнения напряжения статора в векторной форме [19]:

$$\Psi_{Ra} = \frac{L_R}{L_h} \left[ \int_0^t (U_{Sd} - i_{Sd} R_S) d\tau - L\sigma i_{Sa} \right], \quad (3.20)$$

$$\Psi_{Rb} = \frac{L_R}{L_h} \left[ \int_0^t (U_{Sb} - i_{Sb} R_S) d\tau - L\sigma i_{Sb} \right], \quad (3.21)$$

где  $L_\sigma$  — индуктивность рассеяния.

На рис. 3.6 представлена модель асинхронного электродвигателя с ориентацией по вектору потокосцепления ротора  $\Psi_R$ .

Структурная схема вычислительного устройства с моделью потока в координатах вектора  $\Psi_R$  (рис. 3.6) содержит обратные связи (пропорциональные и интегральные), обеспечивающие стабильность интеграторов.

Выражение для передаточной функции интегратора, охваченного обратными связями для каналов  $U_{Sa}$  и  $U_{Sb}$ , имеет вид:

$$G = \frac{1}{1 + \left( \frac{K_3}{P} + K_2 \right) \frac{K_1}{P}} = \frac{1}{1 + (G_3 + G_2)G}, \quad (3.22)$$

где  $G_1 = \frac{K_1}{P}$  — передаточная функция собственно интегратора;

$G_2 = K_2$  и  $G_3 = \frac{K_3}{P}$  — передаточные функции обратных связей;

$P = j\omega$ .

Уровень фазовой ошибки вычислителя потока при  $P = j\omega$  определяется:

$$\varphi = \arctg \frac{\omega_0^2 / \omega - \omega}{2D}, \quad (3.23)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{K_1 \cdot K_2}$  — собственная частота;  $D$  — демпфирование;

$d = \frac{D}{\omega_0}$  — коэффициент демпфирования.

На выходе устройства вполне вероятны затухающие колебания с угловой частотой:

$$\omega_K = \sqrt{K_1 K_3 - \frac{K_1^2 K_2^2}{4}}. \quad (3.24)$$

Колебания могут возникнуть при пуске электропривода или при остановке на малых частотах преобразователя частоты.

В настоящее время силовая часть большинства преобразователей частоты (ПЧ) выполнена по структуре двойного преобразования электрической энергии:

- выпрямитель (управляемый либо неуправляемый);
- силовой фильтр в звене постоянного тока;
- инвертор (тока или напряжения), причем инвертор почти всегда реализуется в зависимости от мощности на полностью управляемых элементах: силовых IGBT-транзисторах либо запираемых тиристорах с малым временем включения и выключения.

ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока по характеру связи с питающей сетью делятся на два класса:

- автономные инверторы напряжения (АИН);
- автономные инверторы тока (АИТ).

В АИН имеет место однозначная зависимость уровня напряжения в звене постоянного тока (после фильтра) от напряжения на нагрузке, то есть в общем случае АИН является источником напряжения (рис. 3.7).

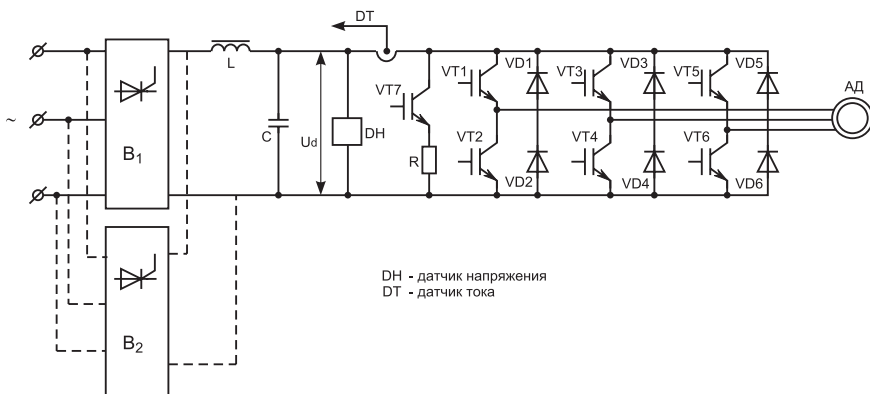


Рис. 3.7

Для реализации обмена реактивной энергией между АД, как активно-индуктивной нагрузкой, и звеном постоянного тока служит конденсатор  $C$  силового фильтра, а быстровосстанавливающиеся диоды, включенные параллельно ключом, обеспечивают протекание тока при возврате реактивной энергии от АД к емкости фильтра. На выходе инвертора напряжение может регулироваться двумя способами:

- регулированием выходного напряжения  $U_d$  на выходе управляемого выпрямителя, при этом инвертор выполняет функцию коммутатора фаз и формирователя требуемой частоты. Такой АИН представляет собой ПЧ с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ), который в современных частотно-регулируемых электроприводах практически не применяется из-за характерных недостатков, присущих данному методу формирования синусоидального тока в статорной цепи АД;
- широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения по синусоидальному закону (ШИМ-модуляция). В этом случае выпрямитель  $V_1$  (рис. 3.7) является неуправляемым.

В общем случае к основным отличительным характеристикам инвертора следует отнести:

- симметричную синусоидальную ШИМ;
- центрированную модуляцию с минимизацией гармонических искажений;
- возможность настройки оптимального режима коммутации силовых ключей и, в зависимости от уровня задания частоты, реализацию автоматического перехода от синусоидальной симметричной ШИМ к прямоугольной или трапециевидальной модуляции с целью более максимального использования АД по напряжению;
- диапазон регулирования несущей частоты от 1 до 25 кГц.

В АИН отсутствует возможность рекуперации энергии в питающую сеть в случае перехода режима работы АД в генераторный режим (например, при интенсивном торможении).

Для реализации рекуперации энергии в сеть может быть установлен второй комплект управляемого выпрямителя  $V_2$  (рис. 3.7), работающий как инвертор, ведомый сетью. Кроме этого, для обеспечения режима торможения АД и снижения уровня перенапряжения в звене постоянного тока используется узел сброса (слива) энергии на внешний резистор  $R$  через транзисторный ключ  $VT7$ , открывающийся по команде системы управления при достижении

определенного уровня напряжения на конденсаторе фильтра  $C$ . Положительным свойством АИН является его универсальность, то есть возможность работы как источника напряжения для питания одиночного АД или группы АД в разомкнутых системах регулирования частоты вращения и в режиме источника тока при наличии замкнутых контуров регулирования тока и скорости. К недостаткам структуры АИН стоит отнести необходимость использования значительной емкости фильтра  $C$  и технические трудности обеспечения рекуперации электрической энергии в сеть.

В АИТ (рис. 3.8) управляемый выпрямитель работает в режиме регулятора тока, а инвертор выполняет функцию коммутатора фаз, формируя требуемую частоту. Фильтр, состоящий из индуктивности  $L$ , сглаживает пульсации тока. В структуре АИТ существует однозначная зависимость выходного тока звена постоянного тока  $I_d$  от тока АД.

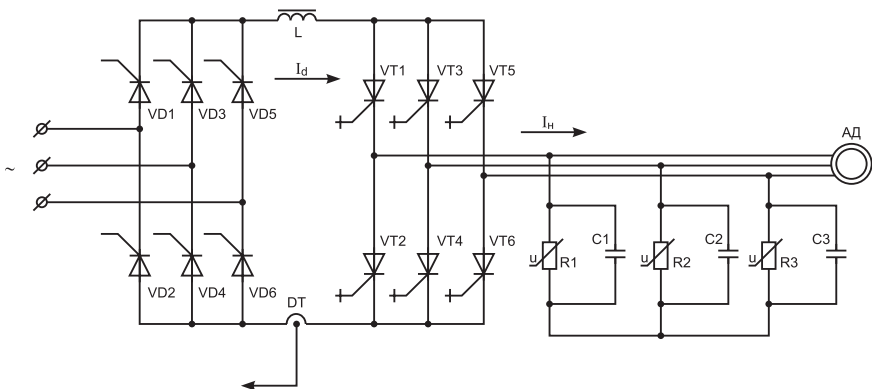


Рис. 3.8

Варисторы  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и конденсаторы  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  — элементы схемы ограничения коммутационных перенапряжений, обусловленных ЭДС самоиндукции статорных обмоток АД.

В структуре АИТ достаточно легко осуществляется режим торможения АД с рекуперацией энергии в сеть без изменения направления тока  $I_d$  в звене постоянного тока. При переходе АД в генераторный режим, изменение направления против ЭДС инвертора вызывает перевод последнего в выпрямительный режим, а выпрямитель переводится в режим работы инвертора, ведомого сетью.

Недостатки структуры АИТ:

- наличие значительных перенапряжений на ключах инвертора, что вынуждает использовать снабберные цепи;
- значительные габариты сглаживающего дросселя фильтра;
- невозможность работы на групповую нагрузку;
- достаточно низкий коэффициент мощности по сравнению с АИН.

Редко встречается в промышленном оборудовании структура ПЧ с непосредственной связью (ПЧНС), основу которого составляют (рис. 3.9) три комплекта реверсивных управляемых выпрямителей ВР1, ВР2, ВР3, на выходе которых формируются три синусоидальных напряжения с угловой частотой  $\omega$  и сдвинутых по фазе на  $120^\circ$ .

На рис. 3.9 дан вариант силовой схемы для случая, когда ВР1:ВР2:ВР3 выполнены по мостовой схеме Ларионова. Без разделения нулевой точки АД возможно выполнение силовой схемы ПЧ только при любых трехфазных нулевых схемах выпрямителей ВР1:ВР2:ВР3. Основными и несомненными достоинствами ПЧНС являются отсутствие промежуточного звена постоянного тока и, как следствие, однократное преобразование энергии. Недостатки:

- большие аппаратные затраты на создание силовой схемы из-за значительного числа управляемых ключевых элементов (от 18 до 36);
- низкий  $\cos \varphi$ ;

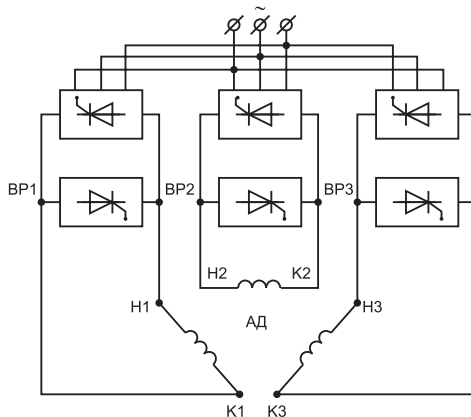


Рис. 3.9

- высокий состав гармонических составляющих тока и напряжения;
- практически отсутствие возможности получения выходной частоты, близкой к частоте сети.

### **3.2. Современное состояние и тенденции совершенствования частотно-регулируемого электропривода**

В течение последних 8—10 лет проектировщикам технологического оборудования приходится решать непростую задачу выбора между привычным электроприводом постоянного тока и частотно-регулируемым электроприводом переменного тока (ЧРЭ). Неспоримые и основные достоинства электропривода постоянного тока все в большей степени становятся привилегией частотно-регулируемого привода переменного тока в связи со стремительным ростом технических возможностей элементной базы силовой электроники, которая в значительной степени сдерживала реализацию высоких динамических характеристик, точности поддержания частоты вращения, возможности функционирования с низкой частотой вращения при значительном моменте на валу электродвигателя, постоянства крутящего момента с широким диапазоном регулирования числа оборотов. Весомыми аргументами к массовому внедрению ЧРЭ в технологическом оборудовании промышленного производства являются традиционные достоинства асинхронного электродвигателя: высокая надежность, простота в эксплуатации, высокая степень защиты от внешней среды, низкая стоимость по сравнению с электродвигателем постоянного тока и малые эксплуатационные расходы. Высокий уровень технических характеристик ЧРЭ достигнут благодаря интенсивному производству силовых модулей на базе IGBT-транзисторов, высокоскоростных процессоров обработки сигналов в реальном времени и разработке эффективных математических моделей управления асинхронным электродвигателем.

В настоящее время дальнейшее совершенствование ЧРЭ направлено на:

- а) разработку специальных математических моделей управления вектором потока либо создание системы отсчета относительно вектора потокосцепления;

- б) качественное улучшение уже существующих функциональных возможностей;
- в) расширение коммуникационных возможностей ЧРЭ;
- г) улучшение электромагнитной совместимости с питающей сетью и окружающей средой.

Все усовершенствования, касающиеся улучшения функциональных возможностей, направлены в основном на получение от привода необходимого и оптимального крутящего момента при максимально возможном КПД, на создание возможности точного поддержания заданной частоты вращения ротора. Своеобразной кульминацией в реализации ряда уникальных возможностей электропривода являлось получение номинального крутящего момента при нулевой частоте вращения. Современные модели управления дают возможность контролировать частоту вращения с разрешением до 5 об/мин. Для этого необходима реализация компенсации четырех факторов, вносящих основную погрешность при расчете принятой модели управления: возникновение пространственной гармоник на низкой частоте вращения из-за наличия пазов статора, наличие несимметричности параметров, изменение сопротивления в цепи ротора, изменение сопротивления в цепи статора. Несомненным достоинством ЧРЭ, как будет показано ниже, является возможность реализации энергосберегающих режимов работы технологического оборудования и получения оптимальных динамических характеристик с учетом инерционных свойств нагрузки. К настоящему времени коммуникационные возможности многих типов ЧРЭ выражаются наличием не менее 4-х релейных или с открытым коллектором выходов не менее 4-х аналоговых (4—20 мА, 0—10 В) и дискретных входов, позволяющих осуществлять функционально полную автоматизацию электропривода. При этом большинство приводов поддерживает последовательную связь по протоколу RS232 и RS485 со скоростью не менее 4800 бод.

Все более рациональным становится интерфейс общения эксплуатационного персонала с системой управления ЧРЭ за счет перехода с системы буквенно-цифрового кодирования к программированию на английском языке с помощью LCD. К сожалению, применение ЧРЭ не лишено побочных явлений, особенно проблемы электромагнитной совместимости с электрической сетью и радиосферой. Больше всего неудобств создает гармонический состав токов, потребляемый ЧРЭ из сети. Преодоление этого явления возможно с помощью хорошо подобранной индуктивности реак-



тора на входе ЧРЭ в зависимости от длины и мощности питающей линии. Кардинально проблема решается путем замены шестипульсовой схемы выпрямления на двенадцатипульсовую и с применением активных мостовых схем. Еще одно неприятное сопутствующее явление заключается в содержании очень узких (коротких) выбросов перенапряжения в выходном напряжении инвертора. Такие выбросы возникают при переключениях IGBT-транзисторов в инверторах с ШИМ на частотах от 2 до 25 кГц и крайне отрицательно влияют на состояние межвитковой изоляции электродвигателей, вызывая ее преждевременное старение. Ограничить амплитуду выбросов позволяют установка на выходе инвертора сглаживающих устройств (реакторов, синусных фильтров), а также использование специального кабеля, подавляющего высокочастотные составляющие выходного напряжения.

Проблема радиоизлучения от ЧРЭ в опасном для здоровья человека диапазоне в организационном плане решается законодательным путем на международном уровне путем принятия ряда соглашений, направленных на ограничение допустимого уровня излучения. Частично, проблема ограничения уровня радиоизлучения решается за счет встраивания в силовой модуль ЧРЭ фильтра электромагнитной совместимости. В качестве обобщения следует отметить существование устойчивой тенденции совершенствования ЧРЭ в направлении модульного построения: модуль управления на базе большой интегральной схемы сигнального высокопроизводительного процессора, модуль звена постоянного тока с элементами фильтрации, датчиков контроля и силовой модуль инвертора.

Началом промышленного освоения и выпуска частотно-регулируемых электроприводов следует считать факт появления на рынке специальных инверторных тиристорных с малым временем выключения и приемлемыми значениями  $dV/dt$  и  $di/dt$ . Этот этап начался в конце 60-х гг. и характеризовался освоением в производстве электроприводов 1-го поколения.

Удельные массогабаритные показатели и стоимость электроприводов были высоки, а динамические и статические характеристики значительно уступали соответствующим по мощности электроприводам постоянного тока. Основными лимитирующими элементами в направлении достижения лучших показателей были силовые элементы в звене постоянного тока и инвертора. Управляющая часть, несмотря на применение микросхем малой и сред-

ней интеграции, доставляла значительно меньшее число ограничений по сравнению с элементами силовой схемы. К концу 70-х гг. электрические параметры инверторных тиристоров достигли максимально возможных значений при полученных к тому времени физических параметрах исходного химического материала — кремния. Другой более высокий уровень возможностей появился в конце 70-х — начале 80-х гг. с началом выпуска новых комплектующих изделий: запираемых тиристоров, мощных биполярных транзисторов и больших интегральных схем микропроцессорной техники. При этом массогабаритные и эксплуатационные характеристики электроприводов переменного тока претерпели значительные изменения в лучшую сторону, что привело практически к уравниванию их с аналогичными параметрами электроприводов постоянного тока. Во второй половине 80-х годов, с точки зрения дальнейшего улучшения статических и динамических характеристик ограничительное воздействие стали оказывать алгоритмы функционирования системы управления приводом и аппаратно-программные средства их реализации. «Первопроходцем» в создании электроприводов нового типа можно считать фирму АВВ, которая в конце 1994 г. практически заняла лидирующее положение на мировом рынке в области разработки и производства эффективных приводов переменного тока. Например, в приводах серии ACS-600 многие параметры достигли своего естественного предела и лимитирующим звеном во всем приводе является асинхронный электродвигатель.

Кроме фирмы АВВ, российский рынок постепенно завоевывается рядом крупных производителей: Siemens, Silkovert, Lenze, Combivert, KEV (Германия), Hitachi, Toshiba, Mitsubisi (Япония), AMD (Россия—Польша), Altivar (Франция), Emotron (Швеция), Control Techniques (Великобритания) и др. В табл. 7а, 7б приведены общие характеристики наиболее распространенных преобразователей частоты; в табл. 8а, 8б иллюстрируются возможности управления отображением информации; в табл. 9а, 9б даны сведения о возможностях управления вводом-выводом в ПЧ. Возможные средства защиты ПЧ приведены в табл. 10а, 10б. В табл. 11 приведены краткие технические характеристики новейших инверторов зарубежного производства, демонстрируемые в 2002 г. на выставках «Энергосбережение-2002» и «Электро-2002». Характерным для этих моделей является реализация комбинированной модели управления асинхронным электродвигателем (векторной и

скалярной с расширенными функциями). Настройка конкретной модели к реальному объекту производится путем соответствующей инсталляции (программирования) привода.

Кроме большинства известных функций, присущих зарубежным моделям частотных преобразователей (см. табл. 7—9), имеют место следующие режимы и возможности:

- обеспечение малозумной работы электродвигателя за счет реализации специального метода ШИМ-модуляции на частотах «белого шума»;
- автоматический энергосберегающий режим;
- автоматическая компенсация скольжения и момента;
- плавное ускорение и торможение по S-образной характеристике;
- возможность быстрого копирования параметров с одного преобразователя на другой;
- возможность блокировки двух частот механического резонанса;
- функция защиты от блокировки ротора;
- наличие устройства динамического торможения;
- многоуровневая ШИМ.

Рис. 3.10 поясняет принцип автоматического энергосберегающего режима. В более ранних моделях оптимальное соотношение  $U/F$  устанавливалось при инсталляции привода в соответствии с мощностью и характером изменения нагрузки на валу электродвигателя. Причем установка производилась исходя из набора характеристик  $U/F$ , число их не превышало 15. В последних моделях энергосберегающий режим достигается за счет постоянной адаптации диапазона изменения частоты вращения и напряжения на двигателе в зависимости от реальных нагрузочных характеристик.



Рис. 3.10

Как видно из анализа технических характеристик современных зарубежных преобразователей частоты, основными тенденциями к улучшению характеристик являются:

- расширение коммуникационных возможностей;
- снижение габаритных размеров;
- расширение диапазона допустимых температур;
- присутствие сквозной концепции в управлении от самых ранних моделей;
- снижение количества используемых компонентов в схемотехнике и конструктивном исполнении;
- расширение диапазона несущих частот (до 18 кГц) и, как следствие, снижение акустического шума;
- расширение диапазона выходной регулируемой частоты (до 480 Гц);
- улучшение гармонического состава входного тока;
- совершенствование процедуры гибкой и адаптивной настройки характеристики  $U/F$  с целью достижения наилучшего энергосберегающего режима.

Весьма примечателен инвертор типа Silcovert (рис. 3.11) фирмы KEV (ФРГ), способный реализовать по выбору три типа управления — скалярное, векторное без датчика обратной связи по скорости и прямое управление моментом. Основные технические данные приведены в табл. 11. К особенностям, помимо возможности обработки трех алгоритмов управления электродвигателем, следует отнести:

- регулирование скорости от 0 до 480 Гц;
- минимум акустического шума за счет высокой частоты модуляции (до 16 кГц);
- возможность блокировки трех частот механического резонанса;
- простое управление и настройку со встроенного или съемного пульта;
- наличие режима особо плавного пуска/остановки с помощью S-образной функции изменения скорости;
- бесперебойное функционирование во время кратковременного падения напряжения;



Рис. 3.11

- автоперезапуск после перебоев с питанием;
- наличие динамического торможения;
- торможение постоянным током.

Данный инвертор при весьма малых габаритных размерах имеет значительные энергетические возможности (табл. 12), что особенно важно при разработке и проектировании компактных электроприводов. Стандартные функции включают:

- защиту от перегрузок по току и напряжению;
- увеличение момента при старте;
- настраиваемую характеристику  $U/F$ ;
- настраиваемые темпы разгона/торможения от 0,1 до 3000 с;
- 8 настраиваемых уставок скорости;
- режим компенсации скольжения;
- полное управление и программирование через стандартный интерфейс RS-485;
- временной пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД-регулятор);
- адаптивные темпы разгона/торможения.

Значительное распространение получили преобразователи частоты нового поколения семейства SYSDRIVE фирмы OMRON (Япония). В них соотношение цена/возможности наиболее низкое из многих изделий зарубежного и отечественного производств, предлагаемых на российском рынке.

В настоящее время фирма OMRON выпускает шесть основных серий частотных преобразователей, отличающихся функциональными возможностями и диапазоном мощностей по принципу от простой модели к сложной.

Серия 3G3JV относится к классу малогабаритных малощумящих устройств общего применения со встроенной функцией энергосбережения, оптимальному для управления вентиляторами, насосами, экструдерами и намоточными установками. В табл. 13 приведены основные характеристики инвертора.

Серия 3G3PV представляет класс недорогих устройств, созданных в основном для задач водоснабжения и вентиляции. Реализованная модель управления основана, как и в предыдущей серии, на алгоритме скалярного управления  $U/f = \text{const}$ . Диапазон мощностей весьма широк от 1,5 до 300 кВт, функциональные возможности более универсальные (табл. 13).

Универсальный преобразователь частоты семейства 3G3HV завершает ряд устройств, работающих по алгоритму  $U/f = \text{const}$ , об-

ладает повышенной надежностью и может эксплуатироваться в самых жестких условиях. Встроенные функции энергосбережения и ПИД-управления позволяют использовать инвертор для управления вентиляторами, насосами, различными транспортными механизмами. Основные технические характеристики приведены в табл. 13.

В классе устройств, работающих по алгоритму векторного управления, фирма OMRON выпускает три модели, отличающиеся реализованной моделью векторного управления и рядом мощностей.

Универсальный регулятор частоты с векторным управлением серии 3G3RV предназначен для широкого круга задач, работает по алгоритму управления вектором тока с оптимизацией частоты переключения ключей инвертора, что дает хорошую динамическую и статическую точность поддержания скорости.

Преобразователь частоты 3G3MV работает по векторной модели прямого управления моментом, малогабаритный, высокодинамичный, с большой глубиной регулирования. Имеет режим вольт-частотного управления  $U/f = \text{const}$ , который устанавливается программированием.

Универсальный регулятор с векторным управлением 3G3FV (рис. 3.12) реализует классическую модель управления моментом и скоростью, основанную на расчете магнитного потока и разделении тока статора на две составляющие: момент и магнитный поток. Отличается возможностью работы с полным моментом в области нулевых частот и улучшенными динамическими характеристиками, имеет функцию автоматического определения параметров АД. В табл. 7 приведены основные технические характеристики шести серий преобразователей частоты фирмы OMRON.

К сожалению, ряд отечественных производителей делают безуспешные попытки достичь уровня



Рис. 3.12

ведущих зарубежных фирм, выпуская чрезвычайно малыми партиями приводы мощностью от 1.5 до 315 кВт. Например, АО «Чебоксарский электроаппаратный завод» освоил преобразователь частоты ПЧ-30, предназначенный в основном для регулирования скорости асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 30 кВт в составе насосных агрегатов и вентиляционных установок. Система управления обеспечивает пуск, автоматическое повторное включение (АПВ) с регулируемым темпом и остановку двигателя с торможением на «выбеге», а также возможность работы в режиме автоматического поддержания постоянства давления, производительности, уровня жидкости и других параметров по сигналам внешних датчиков со стандартным аналоговым сигналом 0—10 В, 0—5 мА, 0—20 мА, 4—20 мА постоянного тока.

В преобразователе ПЧ-30 реализовано частотное управление, заключающееся во взаимосвязанном регулировании частоты  $f$  и действующего значения напряжения  $U$  основной гармоники напряжения, питающего электродвигатель. Закон изменения частоты и напряжения в рабочем диапазоне регулирования линейный:  $U/f = \text{const}$ . Основные технические характеристики ПЧ-30:

Номинальный ток нагрузки	63 А
Питание	3-х фаз. 380 В
Диапазон регулирования частоты	5–60 Гц
Диапазон регулирования скорости	1 : 10
Номинальная мощность электродвигателя	32 кВт
Полная мощность инвертора	46 кВа
Габаритные размеры, масса, не более	560 × 370 × 338 мм, 40 кг

В электроприводе серии АТ-01, так же как и в ПЧ-30, реализована модель скалярного управления, основанная на взаимосвязанном изменении частоты  $f$  и действующего значения  $U_1$  основной гармоники питающего электродвигатель напряжения. Блок-схема электропривода приведена на рис. 3.13 и представлена силовой частью преобразователя частоты и системой управления (обведена пунктирной линией).

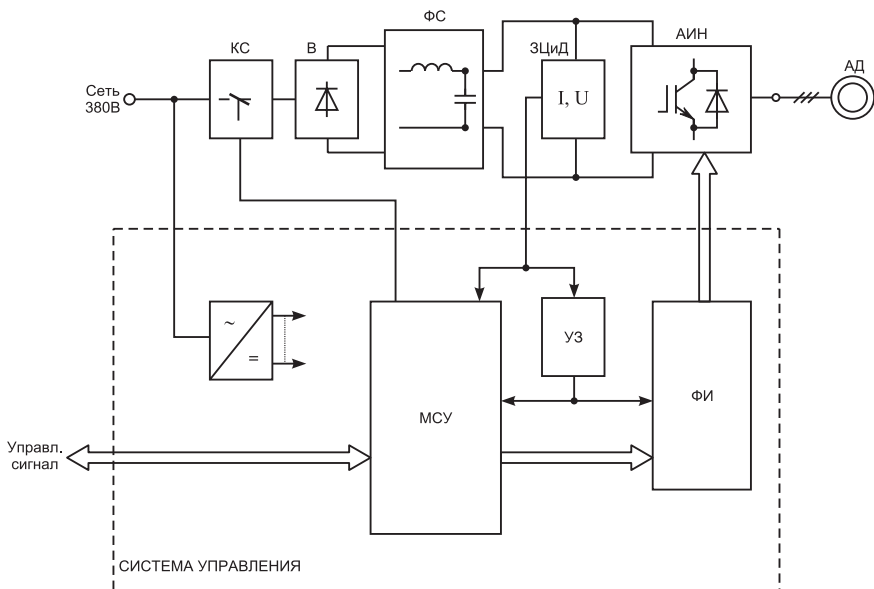


Рис. 3.13

К силовой части относятся:

КС — силовой коммутационный аппарат, выполняющий функции подключения электропривода к сети, подготовки к работе и аварийного отключения;

В — силовой диодный выпрямитель;

Ф — фильтр силовой для сглаживания пульсаций напряжения звена постоянного тока преобразователя;

ЗЦиД — узел защитных цепей и датчиков напряжения и тока, осуществляющий защиту силовых элементов преобразователя и электропривода от перенапряжений, токов перегрузки и короткого замыкания;

АИН — трехфазный мостовой транзисторный автономный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), осуществляющей преобразование постоянного (выпрямленного) напряжения в переменное трехфазное требуемой частоты;

АД — асинхронный электродвигатель.

Система управления электроприводом включает:

ИП — источник питания;

МСУ — микропроцессорный модуль на базе однокристалльной микроЭМ серии K1816VE035, осуществляющий формирование



управляющих сигналов для АИН по закону ШИМ, а также управление КС в функции входных сигналов управления и сигналов датчиков.

Общим для отечественных приводов является привязка зарубежных силовых модулей к собственным средствам управления, опять же собранных на импортной элементной базе (сигнальные процессоры, высоковольтные драйверы). Отечественная промышленность в области производства частотно-регулируемых приводов переменного тока практически не в состоянии противостоять экспансии аналогичных импортных изделий. В табл. 14а, 14б приведены реализуемые функции в П.Ч, из которых видно, насколько отличаются возможности зарубежных и отечественных ПЧ. Весьма примечательной и перспективной моделью российского преобразователя частоты стоит назвать АП-100, разработанного НТЦ «Приводная техника» совместно с СП «ГАМЕМ» и отвечающего в полной мере сегодняшнему дню развития преобразовательной техники. Краткие технические характеристики приведены в табл. 15, внешний вид — на рис. 3.14, функциональные возможности, помимо общепринятых, включают:

- автоматическую компенсацию колебаний входного напряжения;
- энергосберегающий режим;
- реализацию ПИД-регулятора;
- наличие бесконтактной цепи заряда фильтра.

В современном частотно-регулируемом электроприводе без привязки к конкретному оборудованию можно выделить три основные части: преобразователь электроэнергии (выпрямитель-инвертор), систему управления и электродвигатель асинхронный.

С точки зрения структурно-функционального построения характерным для современного частотного электропривода является:

- распространение блочно-модульных принципов компоновки;
- внедрение информационных средств для визуализации технологических процессов и процесса управления;
- компьютеризация;

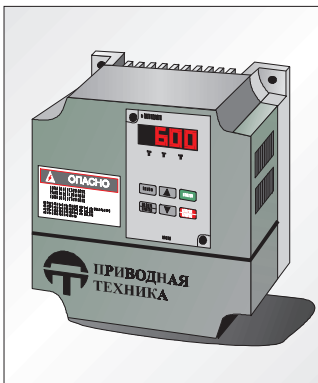


Рис. 3.14

- дальнейшее развитие методов подчиненного управления;
- развитие и внедрение систем диагностики;
- комплектность поставки, включая компьютерные средства контроля, управления и сервиса;
- создание объектно-ориентированных электроприводов, наиболее полно учитывающих функциональные требования и эксплуатационные особенности конкретного объекта;
- выполнение функций регулирования технологических параметров: уровня, давления, влажности, температуры, дозирования.

Преимущественно во многих частотно-регулируемых приводах применяется простая и экономичная схема: неуправляемый выпрямитель и независимый инвертор напряжения. На рис. 3.15 приведена обобщенная структурная схема электропривода.

Преобразователи с инверторами тока, считавшиеся до недавнего времени наиболее простыми и удобными, имеют в настоящее время ограниченное применение из-за известных недостатков системы инвертор тока — асинхронный электродвигатель. В приводах большой мощности используются асинхронно-вентильные ка-

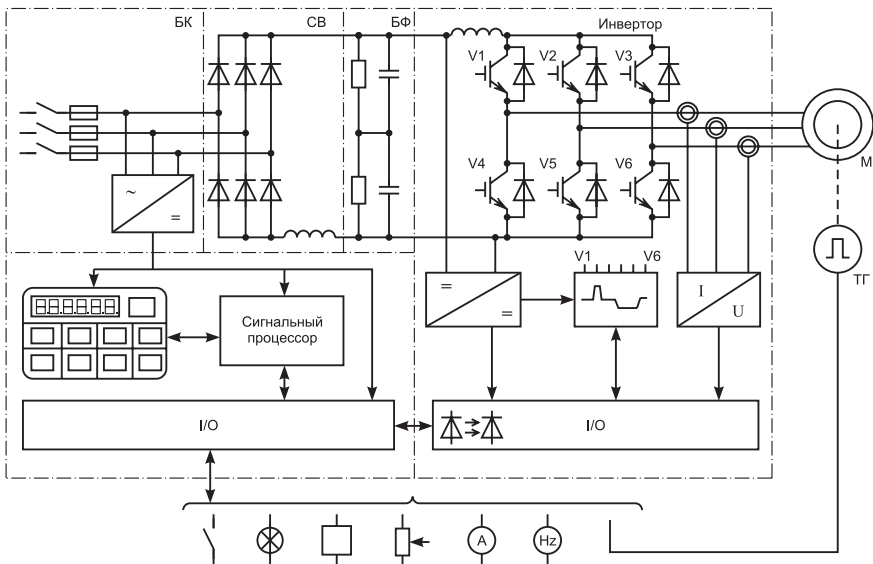


Рис. 3.15

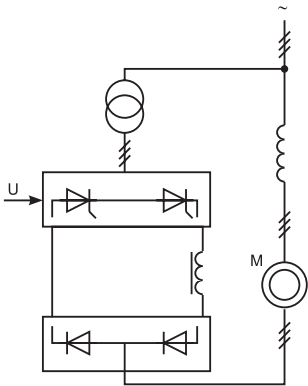


Рис. 3.16

скады, основу которых составляют неуправляемый выпрямитель и ведомый сеть инвертор (рис. 3.16).

В современных регулируемых электроприводах переменного тока используются три основные структуры системы автоматического регулирования (САР):

- реализация заданной статической зависимости между частотой  $f$  и действующим значением  $U_1$ , питающего электродвигатель напряжения (скалярное управление электроприводом);
- алгоритм векторного управления;
- алгоритм прямого управления моментом.

Блок-схема скалярного управления представлена на рис. 3.17. При управлении с разомкнутым контуром частота вращения электродвигателя регулируется изменением частоты  $f$  выходного напряжения таким образом, что реальная частота вращения вала будет определяться моментом нагрузки и выходной частотой  $f$  преобразователя. Выходное напряжение преобразователя  $U_{REF}$  зависит от частоты и определяется соотношением:

$$K = \frac{U_{REF}}{f}. \quad (3.25)$$

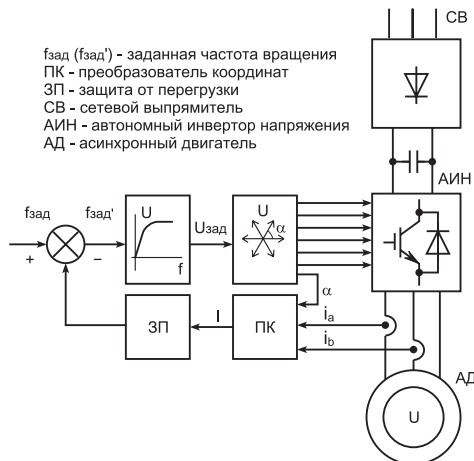


Рис. 3.17

При регулировании частоты питающего напряжения нужно обеспечить необходимую жесткость механических характеристик  $n_2 = f(M)$  асинхронного электродвигателя во всем диапазоне регулирования.

При этом электродвигатель должен иметь достаточную перегрузочную способность, определяемую, как (11):

$$K_n = \frac{M_{\max}}{M} = \frac{1}{2} \left( \frac{S_H}{S_K} + \frac{S_K}{S_H} \right) a + b, \quad (3.25)$$

где:  $S_H$  — номинальное скольжение при нагрузке электродвигателя;  $S_K$  — критическое скольжение, определяемое:

$$S_K = \frac{\pm cr^2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + cx_2)^2}}, \quad (3.26)$$

где:  $r_2$  — приведенное активное сопротивление ротора;  $r_1$  — активное сопротивление статорной обмотки;  $x_1$  — индуктивное сопротивление статорной обмотки;  $c$  — коэффициент, равный  $1 + \frac{x_1}{x_M}$ ,

где:  $x_M$  — полное индуктивное сопротивление намагничивающего контура электродвигателя.

$$a = \frac{\sqrt{1 + d^2}}{(1 + \sqrt{1 + d^2})}; \quad (3.27)$$

$$b = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + d^2}}; \quad (3.28)$$

$$d = \frac{x_1 + cx_2}{r_1}. \quad (3.29)$$

Условия обеспечения надлежащей жесткости механических характеристик и перегрузочной способности возможно при сохранении постоянства амплитуды вращающегося поля статора. На рис. 3.18 показан желаемый вид механических характеристик при питании электродвигателя. Чтобы получить такого рода характеристики, необходимо выполнить условия постоянства амплитуды потока  $\Phi_{im}$  при различной выходной частоте. Пренебрегая падением напряжения в активном и индуктивном сопротивлениях обмотки статора, можно записать:

$$U_1 \approx E_1 = 4,44 K_{об1} \cdot f_1 \cdot \omega_1 \cdot \Phi_{im}. \quad (3.30)$$

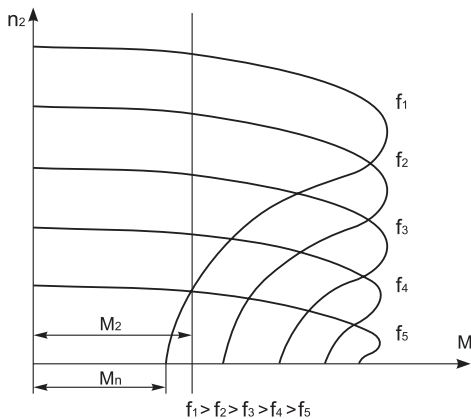


Рис. 3.18

Отсюда видно, что для сохранения  $\Phi_{im} = \text{const}$  при различных значениях выходной частоты инвертора необходимо регулировать ее исходя из условия:

$$\frac{U_1}{f_1} \equiv \Phi_{im} = \text{const}. \quad (3.31)$$

При значительном уменьшении частоты, следовательно и  $U_1$ , перегрузочная способность электродвигателя несколько снижается из-за относительного увеличения падения напряжения в статорной обмотке в связи с очевидным возрастанием потребляемого тока и, как следствие, снижения амплитуды вращающегося поля.

В практике реализации частотно-регулируемого электропривода микроконтроллер системы управления обеспечивает ввод и обработку параметров, составляющих в конечном итоге определенную конфигурацию характеристики  $U = f(f)$ . Типичный перечень параметров приведен в табл. 16, а на рис. 3.19 — примерный вид характеристики «напряжение—частота».

В некоторых типах частотно-регулируемых электроприводов в памяти управляющего контроллера хранится набор характеристик «напряжение—частота», одну из которых можно установить при установке привода в зависимости от конкретных условий работы. Иногда их количество может достигать 25.

Система управления, в зависимости от применения, может реализовывать заданную статическую зависимость указанного соот-

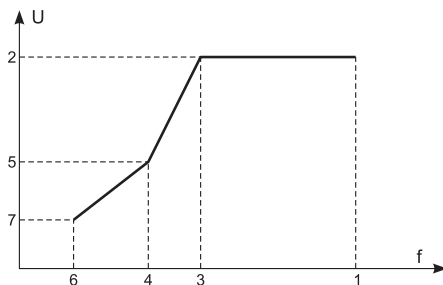


Рис. 3.19

ношения, например различный угол наклона зависимости  $U/f$ . При этом САР измеряет фазные токи  $i_a$ ,  $i_b$  либо ток в минусовой шине инвертора и вычисляет активное значение тока, пропорциональное моменту. В случае перегрузки электродвигателя ток превышает установленное ограничение и выходная частота снижается. Типичная область применения ПЧ с САР скалярного типа: насосы, вентиляторы, центрифуги, конвейеры. В случае замкнутого управления (наличие обратной связи по скорости) производится регулирование частоты вращения или момента, или обоих параметров поочередно. Регулятор скорости (рис. 3.17) поддерживает частоту вращения, равную заданной, независимо от изменений нагрузки. Регулятор момента поддерживает момент двигателя, равным заданному, при условии изменения скорости электродвигателя. Реализация такого алгоритма возможна только при наличии обратной связи по скорости.

Блок-схема САР с векторным управлением представлена на рис. 3.20. Такая модель используется для регулирования частоты вращения или момента двигателя, а также обоих параметров поочередно. Типичное применение: краны, подъемники, намоточные устройства, моталки, лебедки, бумажные машины, приводы для металлургической и деревообрабатывающей промышленности.

Основной отличительной особенностью векторного управления является реализация пуска «с хода» при подключении преобразователя к уже вращающемуся двигателю. При этом измеряется ток статора  $i_a$ ,  $i_b$  и число оборотов ротора. Полученные сигналы вводятся в математическую модель асинхронного электродвигателя (рис. 3.20).

В модели двигателя производится расчет магнитного потока и разделение тока статора на две составляющие — момент  $i_q$  и маг-

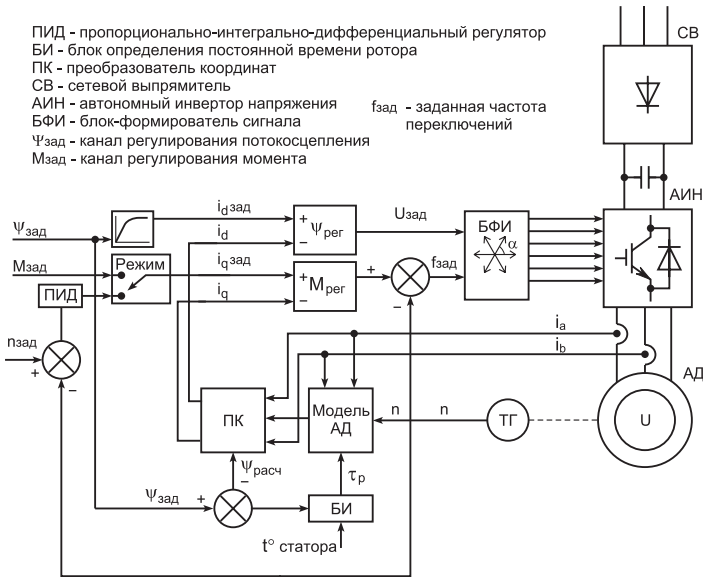


Рис. 3.20

нитный поток  $i_d$ . Обе составляющие тока могут регулироваться отдельно, по своему каналу и независимо. Это дает возможность при сохранении потока изменять момент электродвигателя.

Дальнейшее совершенствование показателей частотно-регулируемого электропривода стало возможным в результате разработки и реализации специальных алгоритмов прямого управления моментом на основе теории разрывных управляющих воздействий в скользящем режиме, методология которых строится на синтезе математических моделей систем управления, имеющих вид дифференциальных уравнений в форме Коши с разрывной правой частью.

Блок схема САР прямого управления моментом DTC (direct torque control) представлена на рис. 3.21 и состоит из регулятора скорости, устройства задания и ограничения момента, задания потока статора и частоты переключения. Работа системы основана на реализации во времени работы двух моделей:

1. Регулирование в скользящем режиме вектора потокосцепления статора и момента  $M$  электродвигателя по значениям, вводимым в нее заданных и действительных величин. Такое регулирование осуществляется модулем сверхбыстрых процессоров.

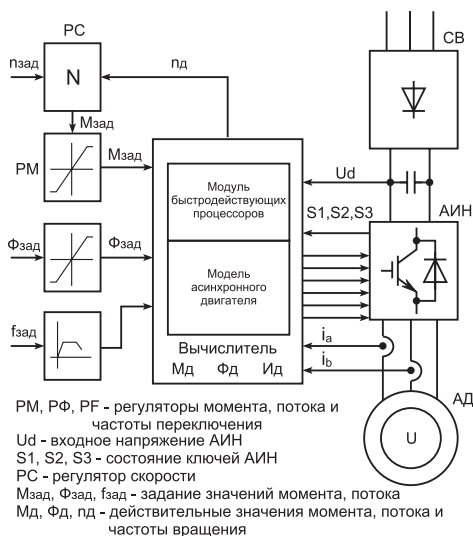


Рис. 3.21

2. Модель асинхронного электродвигателя через каждый промежуток времени осуществляет вычисление действительных значений потока статора и момента по вводимой в нее информации: токам фаз статора, напряжению звена постоянного тока и положению ключей инвертора. Кроме этого, производится вычисление скорости асинхронного электродвигателя и частоты выходного тока инвертора.

Такой принцип управления моментом позволяет значительно улучшить характеристики электропривода в части снижения времени достижения заданного момента (не более 1.5 мс), увеличения точности управления моментом при очень низких частотах вращения и нулевой скорости. Кроме этого, весьма привлекательны такие особенности, как отсутствие широтно-импульсной модуляции и необходимости использовать датчик частоты вращения электродвигателя. На рис. 3.21 приведен вариант структурной организации ядра системы прямого управления моментом. По сути, модуль быстродействующих процессоров — это гистерезисный регулятор момента, где управляющие воздействия на силовые ключи инвертора (частота и порядок переключения) вырабатываются в зависимости от сравнения заданных значений магнитного потока и момента с их действительными значениями, синтезируемыми математической моделью электродвигателя. В зависимости от



конкретной системы управления вектор потокосцепления статора  $\bar{\Psi}_s$  определяется в течение 10—25 мкс, то есть в каждом цикле управления:

$$\bar{\Psi}_s = \int (\bar{U}_s - R_s \bar{I}_s) dt, \quad (3.32)$$

где:  $\bar{U}_s$  и  $\bar{I}_s$  — векторы напряжения и тока статора (рис. 3.22), представленные в неподвижной относительно статора системе координат X, Y;  $R_s$  — активное сопротивление статора.

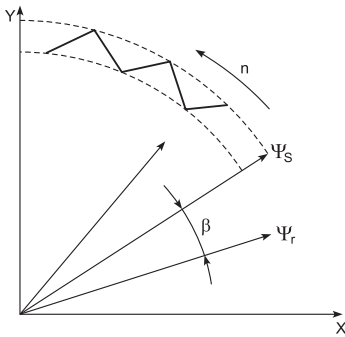


Рис. 3.22

Вектор напряжения  $\bar{U}_s$  определяется исходя из значения измеренного напряжения звена постоянного тока и положения силовых ключей инвертора (рис. 3.23).

Электромагнитный момент вычисляется, как произведение векторов потокосцеплений статора и ротора:

$$\bar{M}_\vartheta = p \frac{1 - \sigma}{\sigma L_m} \bar{\Psi}_r \bar{\Psi}_s, \quad (3.33)$$

где:  $p$  — число пар полюсов;  $\sigma$  — коэффициент рассеивания;  $L_m$  — индуктивность намагничивания.

Алгоритм управления моментом предусматривает: поддержание модуля вектора потока статора  $\bar{\Psi}_s$  постоянным, а регулирование момента достигается изменением угла  $\beta$  (рис. 3.22) за счет модуляции положения вектора потокосцепления статора в таком направлении и на такую величину, когда достигается максимально возможный момент. Учитывая, что постоянная вре-

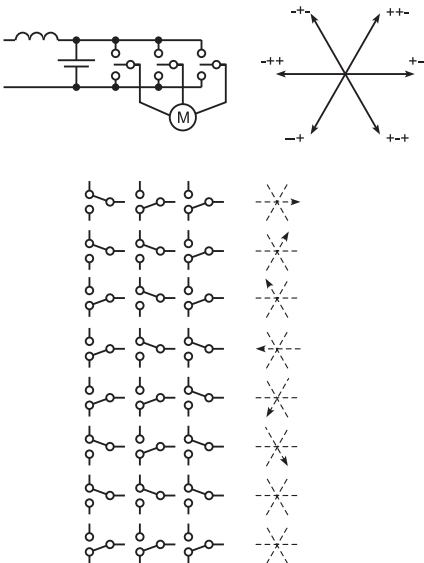


Рис. 3.23

мени роторной цепи любого асинхронного электродвигателя превышает 100 мс, что во много раз медленнее, чем изменение потокосцепления статора  $\Psi_S$ , оптимальная логика переключений «успевает» находить наилучший вектор напряжения, при котором ошибка между созданным и действительным значениями момента будет минимальной. Для достижения более точного регулирования момента производится корректировка в реальном времени абсолютного значения вектора потокосцепления статора  $\Psi_S$  за счет соответствующего изменения напряжения (рис. 3.22). На рис. 3.23 изображены векторы напряжений статора в зависимости от положения ключей инвертора. Здесь показаны шесть векторов напряжения и два вида нуль-векторов. Отметим, что использование рассмотренного алгоритма прямого управления моментом, помимо высокой точности и быстродействия, предопределяет такие возможности, как инвариантность к изменению параметров объекта и возмущениям.

Как уже было сказано, в большинстве ПЧ для формирования синусоидального тока в статорной обмотке АД используется ШИМ (широтно-импульсная модуляция). Наряду с массой преимуществ такой способ получения синусоидального тока не свободен от существенных недостатков, главный из которых заключается в том, что для получения малых гармонических искажений тока необходимо значительно увеличивать частоту переключений управляющих элементов инвертора (до 20–25 кГц). Это вызывает рост динамических потерь в ключах инвертора, а также усложнение и без того тяжелых энергетических условий, в которых работают силовые элементы схемы. Помимо этого, принцип ШИМ не позволяет полностью использовать напряжение источника питания, особенно в случаях, когда необходимо реализовать повышенный момент на валу АД.

В НТЦ «Приводная техника» разработана и реализована векторная модель ПЧ, в основу которой положен альтернативный традиционной ШИМ принцип управления положением вектора тока, суть которого состоит в минимизации частоты переключений силовых ключей инвертора. Структурная схема системы управления ПЧ, реализующая такой алгоритм функционирования, представлена на рис. 3.24.

Система управления построена по двухконтурной схеме, включающей контур скорости и контур тока. Задачей контура скорости

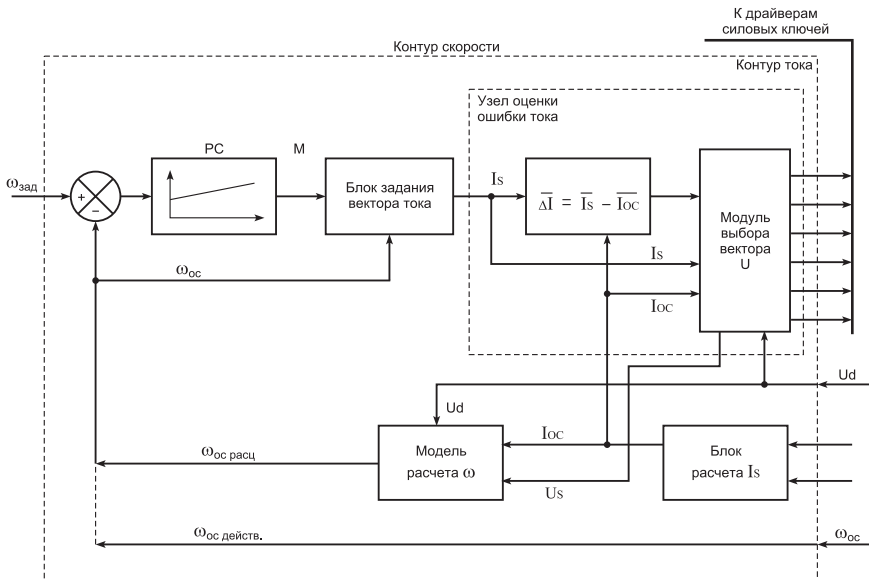


Рис. 3.24

является задание мгновенного положения вектора тока, необходимого для поддержания заданной угловой скорости.

При этом используется действительный сигнал  $\omega_{ос}$  обратной связи с датчика угловой скорости  $\omega_{ос}$  при замкнутом варианте системы управления, либо вычисленное значение  $\omega_{ос}$  в случае разомкнутой обратной связи.

Задачей контура тока является обеспечение реального положения вектора тока и его амплитуды в соответствии с заданными значениями. Ошибка вектора тока  $\Delta I$  может задаваться в зависимости от требований конкретного приводного устройства. Алгоритм управления построен таким образом, что последующее переключение ключей инвертора должно снизить значение ошибки вектора тока.

Допустимое значение ошибки  $\Delta I$  задается исходя из нужного уровня гармонических искажений. Таким образом, момент переключения не привязан к периоду ШИМ, а зависит от реальной ошибки вектора тока, что в значительной степени минимизирует частоту переключений. Из-за высокой динамики управления током статора метод эффективен в равной степени как для переходных, так и для установившихся процессов.

### **3.3. Энергосберегающие технологии на основе частотно-регулируемого электропривода переменного тока**

Применение регулируемого электропривода переменного тока позволяет значительно улучшить технологические процессы в коммунальном хозяйстве, бумажной, деревообрабатывающей, химической, пищевой, машиностроительной промышленности, снизить потребление электроэнергии за счет оптимизации производительности технологического оборудования, вентиляторов, насосов, компрессоров, транспортных механизмов, снизить эксплуатационные расходы, во многих случаях отказываясь от установки дорогостоящего и менее надежного привода постоянного тока. Так как регулирование скорости электродвигателя происходит путем изменения частоты питающего напряжения, то производительность оборудования пропорциональна первой степени, а потребление электроэнергии — кубу частоты вращения электродвигателя. Последнее обстоятельство и лежит в основе технологии электросбережения в работающем технологическом оборудовании. В целях наглядности обобщения принципов энергосбережения, приведем ряд примеров в сфере регулирования процессов на водопроводных перекачивающих станциях и очистных сооружениях:

1) Обычно регулирование подачи воды осуществляется двумя или несколькими параллельными насосами различной производительности путем поочередного включения насосов в работу. За счет этого получается ступенчатое регулирование. Если хотя бы самый крупный насос подключить к сети через ПЧ, то в этом случае обеспечивается более рациональное регулирование при меньших затратах оборудования (кроме параллельных насосов и электродвигателей, исключаются клапанные задвижки и трубопроводы) и электроэнергии.

2) Водонапорные баки и высокоуровневые бассейны используются для выравнивания рабочего давления в водопроводной сети при прерывистом режиме насоса. Если производительность насоса будет регулироваться посредством ПЧ, то резервуары можно вообще ликвидировать либо уменьшить их габариты. Кроме этого, можно добиться более равномерного давления в точке потребления.

3) Электродвигатель насоса с регулированием от ПЧ забирает от сети пусковой ток значительно меньший, чем при прямом пуске. Таким образом, номинальные токи и типоразмеры электро-

оборудования снижаются, и потребление электроэнергии также уменьшается.

4) Электродвигатели насосов, как правило, имеют большую мощность, что вызывает необходимость компенсации реактивной мощности во избежание загрузки ею распределительной сети. Установку конденсаторных компенсирующих устройств можно исключить, если реактивную энергию ПЧ вернуть в сеть одновременно с оптимизацией производительности насоса.

5) Подача насоса регулируется тремя способами:

- дросселированием с помощью клапанов;
- прерывистым регулированием (пуск-остановка);
- регулированием частоты вращения с помощью ПЧ.

КПД прерывистого регулирования редко бывает удовлетворительным, а частые пуски вызывают дополнительные потери электроэнергии. Регулирование путем дросселирования сводится к уменьшению потока жидкости в трубопроводе, что приводит к дополнительному расходу энергии, т. к. насос постоянно должен преодолевать противодействие, создаваемое клапаном.

Мощность, потребляемую насосом, находим по формуле:

$$P = \frac{QH\rho g}{\eta} \text{ [кВт]}, \quad (3.34)$$

где:  $Q$  — подача,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $H$  — напор, М;  $\rho$  — плотность жидкости среды,  $\text{кг}/\text{дм}^3$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $\eta$  — КПД насоса.

Из выражения (3.34) следует, что мощность  $P$  находится в прямой зависимости от произведения подачи на напор. Из рис. 3.25

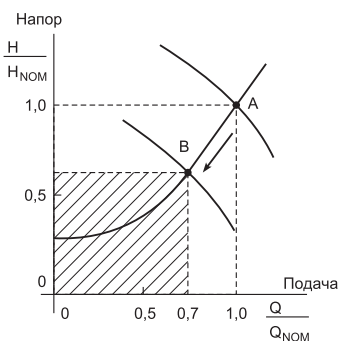


Рис. 3.25

видно, что потребляемая мощность при регулировании частоты вращения меньше половины мощности, потребляемой при регулировании дроссельными клапанами.

Несколько слов об экономической эффективности применения ЧРЭ в насосных агрегатах. Методика расчета экономической эффективности ЧРЭ разработана в Московском энергетическом институте и утверждена в 1997 г. Министерством топлива и энергетики.

В части использования ЧРЭ в приводах насосов оценка экономической эффективности основывается на:

- измерении среднего расхода воды за сутки  $Q_{ср}$ ;
- оценке минимально необходимого общего напора с корректировкой по географической разности высот местности;
- определении требуемого набора  $H_{тр}$ ;
- определении требуемой мощности ЧРЭ:

$$P_{ЧРЭ} = (1,1 \div 1,2) \frac{H_{тр} \cdot Q_{ср}}{367 \cdot \eta_{нас} \cdot \eta_{АД}}, \quad (3.35)$$

где  $\eta_{нас}$  — КПД насосного агрегата;  $\eta_{АД}$  — КПД АД.

При этом значительное превышение параметров насоса по номинальному расходу относительно реального водопотребления может существенно снизить КПД насосного агрегата и привести к необходимости приобретения более дорогостоящего оборудования.

В соответствии с вышеупомянутой методикой, ориентировочный срок окупаемости рассчитывается с учетом экономии электроэнергии и уменьшения потерь воды за счет внедрения ЧРЭ.

На рис. 3.26 показана экономия мощности при разных подачах и двух способах регулирования.

*Применение 1.* ПЧ в качестве привода дозировочных насосов позволяют установить заданную дозу, требуемую подачу, а также поддерживать указанные параметры с заранее установленным отклонением. При этом обеспечиваются режимы экономного электропотребления: плавный разгон, частотное торможение, оптимальный режим в режиме регулирования дозы во времени в зависимости от технологических потребностей.

*Применение 2.* ПЧ в качестве привода вентиляторов в калориферных тепловых узлах животноводческих комплексов. В качестве технологического параметра используется перепад температуры наружного воздуха относительно требуемой внутри помещения. При этом поддержание необходимой температуры в помещении обеспечивается по условию минимизации расхода горячей воды.

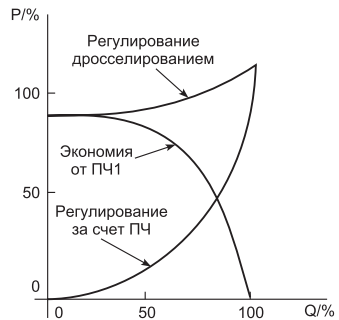


Рис. 3.26

Работа частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭ) в пуско-тормозном режиме встречается так же часто, как и при использовании нерегулируемого электропривода. Анализ потерь электроэнергии в ЧРЭ посвящено много работ, поэтому коснемся этого вопроса лишь в части инженерно-практической оценки и состава реальных потерь при переходных процессах, возникающих при пуске и торможении АД, управляемого преобразователем частоты. Как правило, при программировании ПЧ задаются условия и параметры разгона/торможения:

- время разгона,
- время торможения,
- характер зависимости выходной частоты от времени во время разгона/торможения (характеристика разгона/торможения),
- характер зависимости напряжения в функции выходной частоты до выхода на необходимую частоту вращения,
- вид торможения (свободный выбег, электродинамическое, частотное, рекуперативное).

При линейной зависимости  $f_{\text{вых}}$  в функции времени время переходного процесса при разгоне/торможении определится:

$$t_{\text{ПП}} = t_c(t_T) + (3 \div 4) T_{\text{эм}}, \quad (3.36)$$

где  $t_c(t_T)$  — заданное при программировании время разгона (торможения);  $T_{\text{эм}}$  — электромеханическая постоянная времени, равная отношению суммарного момента инерции привода  $J_{\text{л}}$  к жесткости механической характеристики АД:

$$T_{\text{эм}} = \frac{J_{\text{л}}}{\beta}. \quad (3.37)$$

Потери энергии в переходных режимах при условии постоянства статического момента на валу  $M_n = \text{const}$  можно с достаточной точностью определить [23, 24]:

$$\begin{aligned} \Delta A = & \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) [(M_n + J_2 a_0)(\Delta W_c + a_0 T_{\text{эм}}) t_c + \\ & + (4M_n \Delta W_c - J_2 a_0^2 T_{\text{эм}}) T_{\text{эм}}], \end{aligned} \quad (3.38)$$

где  $J_2$  — момент инерции регулируемого электропривода;  $a_0$  — заданное значение углового ускорения, определяемого отношением

конечной заданной угловой скорости при программировании электропривода к времени разгона (торможения)  $t_c(t_T)$ .

$$a_0 = \frac{W_k}{t_c} = \frac{W_k}{t_T}, \quad (3.39)$$

при этом при разгоне  $a_0 > 0$ , при торможении  $a_0 < 0$ .

$\Delta W_c$  — статическое падение скорости, равное отношению статического номинального момента  $M_n$  к жесткости механической характеристики  $\beta$ :

$$\Delta W_c = \frac{M_n}{\beta}. \quad (3.40)$$

Как видно из выражения (3.38), потери энергии при частотном регулировании обратно пропорциональны времени разгона (торможения) и жесткости механической характеристики  $\beta$ , пропорциональны электромеханической постоянной времени  $T_{эм}$ . Следовательно, при выборе электродвигателя для ЧРЭ необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства:

- желательное применение АД с более высокой синхронной скоростью;
- при увеличении передаточного отношения используемого редуктора уменьшается момент инерции  $J_2$  на валу АД, что позволит при тех же потерях повысить динамические возможности привода в целом;
- при использовании АД с более высокой синхронной скоростью повышаются энергетические возможности: КПД и  $\cos \varphi$ .

При соответствующем выборе указанных выше параметров ЧРЭ можно добиться, в зависимости от частоты пускотормозных режимов и уровня нагрузки, снижения потерь электроэнергии по сравнению с нерегулируемым электроприводом в 3—10 раз.

### **3.4. Выбор основных компонентов частотно-регулируемого электропривода переменного тока**

Нередко вызывает затруднение у специалистов эксплуатационных служб проблема выбора основных компонентов комплектного частотно-регулируемого асинхронного электропривода, к которым относятся:

- преобразователь частоты (ПЧ);



- асинхронный электродвигатель(АД);
- шкаф управления с поддерживающими необходимым режим работы ЧРЭ элементами электроавтоматики, управления и сигнализации.

Заметим, что наличие шкафа управления определяется требованиями по условиям эксплуатации, принципами управления установки, а также возможностями встроенного в преобразователь частоты управляющего контроллера. Вопрос выбора АД для комплектного ЧРЭ очень актуален, поскольку выбор АД прямо связан с уровнем электропотребления, затратами на ремонт и техническое обслуживание. Надлежащий выбор ПЧ внесет весомую лепту в экономию вложенных денежных средств при достаточном для данной задачи управлении уровне технологического обеспечения конкретного оборудования. Расчет и выбор электропривода можно разбить на три этапа:

- 1) сбор исходных данных;
- 2) выбор приводного электродвигателя;
- 3) выбор конфигурации и типа преобразователя частоты.

Процедура сбора исходных данных — важнейший этап работы и носит в какой-то степени характер исследования условий, нагрузки и режимов работы. В качестве исходных данных, как минимум, необходимо знать:

- напряжение сети;
- тип нагрузки;
- диапазон частоты вращения двигателя  $n_{\min} \dots n_{\max}$  (об/мин);
- момент нагрузки ( $T$ ) и характер зависимости от частоты вращения;
- требуется ли работа преобразователя на параллельную нагрузку (группа электродвигателей — количество);
- требуется ли поочередный пуск электродвигателей из группы;
- возможно ли переключение обмоток электродвигателя с  $\Delta$  на  $Y$ ;
- в целях сохранения преемственности стыковки механических частей приводного механизма (если ранее был установлен электродвигатель постоянного тока), каковы желательные габаритные установочные размеры (высота оси вращения) и способ крепления (лапы, фланец, комбинированное крепление);
- пусковой момент или кратность пускового момента;

- нужен ли режим сушки изоляции;
- какие вынужденные перегрузки могут быть во время работы;
- кратность перегрузок;
- продолжительность перегрузки;
- имеют ли место начальные или повторные пуски под номинальной нагрузкой или близкой к ней;
- характер функциональных связей с технологической электроавтоматикой;
- условия эксплуатации электропривода;
- уровень квалификации технического персонала.

Следует заметить, что приведенный перечень нельзя считать исчерпывающим, так как область применения частотно-регулируемого электропривода настолько широка, что учесть все особенности конкретного объекта внедрения не представляется возможным.

Известно, что наиболее точными и достоверными являются прямые методы расчета необходимой мощности АД, основанные на определении допустимой температуры нагрева обмоток статора или эксплуатационного ресурса АД. В объем расчета входит составление математического описания «греющих» потерь и тепловых характеристик в заданном частотном диапазоне работы АД с последующим определением:

- превышения температуры корпуса АД над температурой окружающей среды;
- превышения средней температуры обмотки статора над оболочкой АД;
- частотной зависимости греющих потерь АД;
- нижней и верхней частот полосы регулирования АД.

Данная методика выбора АД производится с использованием непростой вычислительной работы, что часто в условиях обычной производственной фирмы или предприятия выполнить бывает крайне затруднительно. Радикальным выходом в плане использования такой методики является разработка универсальной работоспособной компьютерной программы, позволяющей при задании начальных исходных параметров смоделировать расчетную тепловую схему и определить диапазон регулирования АД. Рассмотрим альтернативную и более доступную для практического использования методику выбора электродвигателя, которая осуществляется в следующей последовательности.

Выбирается число пар полюсов или синхронная частота вращения  $n_c$ , которая должна быть больше или равна  $n_{\max}$  привода.

$$n_c \geq n_{\max} \cdot \quad (3.41)$$

Для приводов с постоянным моментом, возможно использование электродвигателя на частоте вращения не больше синхронной. Окончательный выбор электродвигателя производится с помощью номограммы (рис. 3.27) и усредненной типовой характеристики

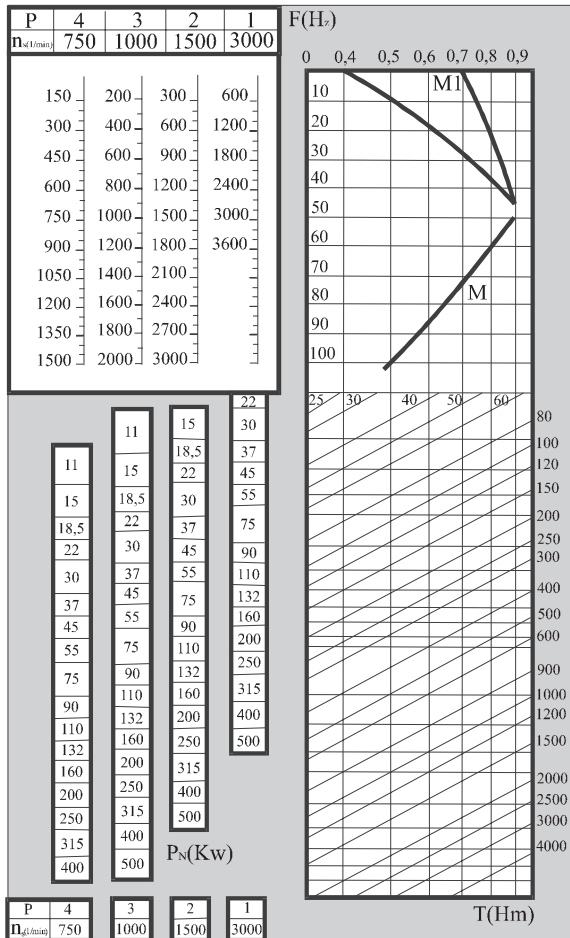


Рис. 3.27

нагрузочной способности электродвигателя по стандарту МЭК (МВТ 160М). Номограмма составлена с учетом уменьшения охлаждения и нагрева электродвигателя при применении ПЧ. Выбор производится в следующей последовательности:

- в секторе 1 выбирают  $n_{\max}$  соответствующую выбранному числу пар полюсов  $p$  (1, 2, 3, 4);
- переходят горизонтально в сектор 2, до кривой  $M$ ;
- переходят вертикально вниз до сектора 3, до прямой, соответствующей нагрузочной способности  $T$ ;
- переходят налево, горизонтально, в сектор 4, на шкалу мощности, соответствующей первоначально выбранному числу пар полюсов в точке пересечения горизонтали и шкалы мощности показана требуемая мощность электродвигателя.

Приведенная номограмма может быть использована для выбора электродвигателя в приводе с моментом нагрузки от 25 Н·м и выше. Для менее мощных электроприводов выбор электродвигателя можно производить исходя из типовой характеристики нагрузочной способности электродвигателя (рис. 3.28).

Следует отметить, что для приводов насосов и вентиляторов приведенный порядок выбора на основе  $n_{\max}$  достаточен, но для привода с постоянным моментом требуемую мощность нужно определять также для  $n_{\min}$ , придерживаясь той же последовательности. При этом окончательный выбор мощности основывается на максимально достигнутой для  $n_{\min}$  и  $n_{\max}$ .

Как известно, для приводов насосов или вентиляторов требуемая мощность указывается при номинальной скорости, поэтому

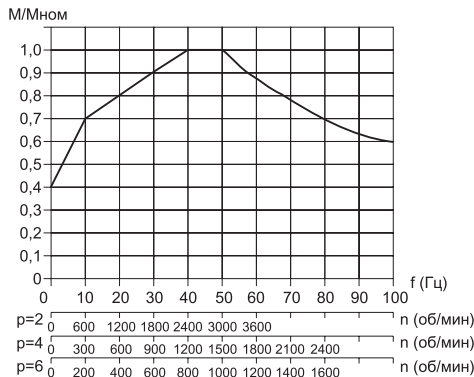


Рис. 3.28

для возможности работы с номограммой требуемый момент определяется по выражению:

$$T = \frac{9550 P}{n} \text{ [Н·м]}, \quad (3.42)$$

где  $P$  — мощность, кВт;  $n$  — частота вращения, об/мин.

Последовательность выбора электродвигателя с использованием нагрузочной характеристики начинается с задания требуемого диапазона регулирования  $n_{\min}$  и  $n_{\max}$ . Для привода с постоянным моментом на валу последовательность выбора следующая:

- по заданию определяется момент нагрузки на валу  $M_3$  (или заданная мощность);
- выбирается число пар полюсов исходя из заданного диапазона регулирования;
- проверяется нагрузочная способность в % к  $M_{НОМ}$  для

$$n_{\min} \text{ и } n_{\max} \left( q = \frac{M}{M_{НОМ}} \right); \quad (3.43)$$

- вычисляется требуемый момент на валу  $M_m$  исходя из наименьшей нагрузочной способности:

$$M_m = \frac{M_3}{q_{\min}}, \quad (3.44)$$

$$q_{\min} = \frac{M}{M_{НОМ}}, \quad (3.45)$$

- определяется требуемая мощность электродвигателя

$$P_m = \frac{M_m n_c}{9550} \text{ [кВт]}, \quad (3.46)$$

где  $n_c$  — синхронная частота вращения электродвигателя.

- выбирается ближайший (в сторону увеличения) стандартный электродвигатель.

Для привода с квадратичным моментом нагрузки выбор следует производить в следующей последовательности:

- из задания определяются: мощность вентилятора на заданной технологической частоте вращения  $P_3$  и  $n_3$  соответственно, максимальная частота вращения  $n_{\max}$  и минимальная  $n_{\min}$ ;
- выбирается число пар полюсов электродвигателя;
- определяется синхронная скорость  $n_c$  на частоте 50 Гц;

- так как момент вентилятора пропорционален квадрату скорости, а мощность пропорциональна кубу скорости, выбирается электродвигатель исходя из значения  $n_{\max}$ ;
- при скорости  $n_{\max}$  требуемая мощность электродвигателя

$$P_m = \frac{n_{\max}}{n_3} P_3, \quad (3.47)$$

- определяется  $q$  на скорости  $n_{\max}$  в относительных единицах;
- определяется требуемый момент двигателя:

$$M_m = \frac{P_m 9550}{n_{\max} q}, \quad (3.48)$$

- определяется номинальная мощность электродвигателя:

$$P_{\text{ном}} = \frac{n_c M_m}{9550}, \quad (3.49)$$

- выбирается стандартный электродвигатель на ближайшую бóльшую мощность.

Как уже было показано в предыдущих разделах настоящей главы, существует достаточно обширный ряд моделей ПЧ, отличающихся техническими характеристиками и возможностями «вживления» в существующую или проектируемую структуру технологической автоматике. Поэтому, когда заходит речь о приобретении и установке ПЧ на конкретное оборудование, необходимо собрать исходные данные, указанные выше и определиться с выбором модели ПЧ.

Выбор преобразователя частоты вращения производится исходя из:

- напряжения сети;
- вида привода (постоянный момент/квадратичный момент);
- расчетного тока  $I_p$  преобразователя частоты.

Вид привода уже был определен при проведении процедуры выбора электродвигателя. Поэтому исходя из задания определяется напряжение питания сети и определяется расчетный ток

$$I_p = \left( 0,565 + 0,15 \frac{M_{\max}}{M_n} \right) I_n, \quad (3.50)$$

где  $\frac{M_{\max}}{M_n}$  — кратность максимального момента, определяется из спецификации электродвигателя;  $I_n$  — номинальный ток электродвигателя.

После определения  $I_p$  выбирается преобразователь частоты исходя из следующего условия

$$I_{нп} > I_p, \quad (3.51)$$

где  $I_{нп}$  — номинальный ток преобразователя частоты.

Стоит подчеркнуть особую важность правильного выбора основных компонентов электропривода, если иметь в виду некоторые особенности электропотребления ПЧ, нагруженных АД с короткозамкнутым ротором. По обмотке АД протекает переменный ток, содержащий высшие гармоники, кратные частоте сети и несущей частоте ШИМ. Это вызывает увеличение добавочных потерь, что в свою очередь негативно сказывается на энергетических характеристиках АД, таких, как КПД, коэффициент мощности, номинальная мощность и вызывает перегрев его отдельных частей. Испытания показывают, что в случае питания АД от ПЧ номинальная мощность и номинальный момент снижаются в среднем на 18–20 % по причине возникновения добавочных потерь. Это обстоятельство необходимо учитывать при окончательном выборе АД и ПЧ независимо от принятой методики.

В случае если к приводу предъявляются специальные требования, то выбор электродвигателя и преобразователя частоты производится при участии специалистов предприятия-изготовителя либо специализированной фирмы, занимающейся внедрением, техническим обслуживанием и ремонтом электроприводов переменного тока.

# **Глава 4**

## **Коммутационная электроаппаратура низкого напряжения в электротехнических устройствах и системах**

### **4.1. Современные подходы при создании коммутационных аппаратов низкого напряжения и перспективы их совершенствования**

Рассмотрение коммутационной электроаппаратуры низкого напряжения и изделий силовой электроники в одном разделе — не случайность. Дело в том, что повышение технико-экономических показателей коммутационной электроаппаратуры следующего столетия невозможно без широкого внедрения гибридных технологий, то есть интеграции в одном изделии традиционных электромеханических аппаратов и мощных электронных ключей. Если посмотреть на таблицу некоторых сравнительных характеристик статических электронных и электромеханических ключей (Табл. 19 Приложения), то очевиден факт постепенного приближения динамических характеристик электронных ключей к соответствующим характеристикам «идеального» ключа. В свою очередь, электромеханические коммутационные аппараты при статическом или квазидинамическом режимах работы наиболее реально воплощают свойства «идеального ключа». Следовательно, главной перспективой развития и совершенствования коммутационных аппаратов является создание гибридных конструкций, сочетающих преимущества электромеханических аппаратов и бесконтактных элементов.

В настоящее время новые разработки коммутационной аппаратуры направлены на:

- снижение материалоемкости;
- расширение функций;
- реализацию модульности построения изделий;



- рост коммутационной мощности при резком снижении мощности управления;
- снижение потерь при коммутации;
- увеличение количества циклов включения-выключения.

С точки зрения снижения и достижения оптимального электропотребления все указанные направления актуальны как для контактной (электромеханической) коммутационной аппаратуры, так и для бесконтактных коммутирующих элементов. В табл. 21 приведены мощности, потребляемые катушками пускателей новой серии ПМ12, выгодно отличающиеся от соответствующих параметров ранее широко применяемых пускателей серий ПМА, ПМЕ, ПМЛ.

С точки зрения электросбережения перспективны жидкометаллические контакты для вакуумных контакторов низкого напряжения на большие токи, так как небольшая масса, габариты, малые потери на силовом контактном узле, низкое электропотребление привода способствуют быстрому внедрению этого вида аппаратов как в общепромышленные энергообъекты, так и в электроустановки автономных объектов. По сути, это существенный скачок в развитии силовых контактных аппаратов низкого напряжения. В общем случае, помимо снижения электропотребления на коммутацию больших токов, применение жидкометаллических контактов (ЖМК) обеспечивает отсутствие вибрации и свариваемости, независимость контактного сопротивления от контактного нажатия, независимость состояния контактной поверхности от числа срабатываний, отсутствия электродинамических сил сужения (сил Двайта) в контактной зоне, малые электрические и механические потери в скользящих контактных узлах, возможность регенерации контактного материала в процессе коммутации, возможность циркуляции жидкого металла с целью интенсификации охлаждения контактного узла. Кроме ртути, в качестве активного материала используются галлий и его сплавы, а также сплавы щелочных металлов с температурами плавления до минус 68°С и ниже. К настоящему времени разработаны основные принципы конструирования и синтеза жидкометаллических контактных узлов и электрических аппаратов с улучшенными технико-экономическими показателями. Уровень развития ЖМК в настоящее время достаточно высок, и применение их в вакуумных коммутационных аппаратах должно дать существенный экономический эффект. Одним из основных недостатков ЖМК является зависимость их ра-

ботоспособности от положения в пространстве и от направления и величины механических воздействий. От этого недостатка свободны композиционные ЖМК, представляющие собой контактный материал, состоящий из твердого пористого каркаса, пропитанного легкоплавким металлом или сплавом. Основным недостатком такого решения является трудность смачивания легкоплавкими металлами и сплавами диэлектрических материалов. В табл. 33 приведены основные характеристики композиционных жидкометаллических контактных материалов, используемых в вакуумных коммутационных аппаратах.

Как известно, наиболее характерной особенностью развития перспективных энергосберегающих технологий является широкое использование изделий силовой электроники, в том числе в создании мощных бесконтактных коммутационных аппаратов, обеспечивающих запуск и остановку асинхронных электродвигателей, как самого массового потребителя электроэнергии. За обеспечение режимов плавного пуска и торможения такие коммутационные аппараты получили название «мягких» пускателей. В промышленности наиболее распространен прямой пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, который осуществляется непосредственным подключением к питающей сети через коммутационную аппаратуру. Это вызывает ударные нагрузки в обмотках электродвигателя с интенсивным токопотреблением, что значительно ограничивает его ресурс. Кроме этого, такой пуск сопровождается ударами по подшипниковым узлам и приводному механизму, гидро- и пневмоударами в трубопроводах, резкими ударными нагрузками в механических передачах с зазорами. При прямом пуске асинхронных электродвигателей мощностью от 45 до 400 кВт допускается только продолжительный режим работы (режим S1 по ГОСТ183—74), то есть два последовательных пуска (с остановкой между ними) из холодного состояния или один пуск из нагретого состояния при работе в номинальных условиях. Кроме этого, в соответствии с ГОСТ28327—89 прямой пуск имеет ограничения по величине инерционной массы, приведенной к валу асинхронного электродвигателя.

В качестве примера серийно выпускаемые пускатели тиристорные трехфазные серии ПТТ (рис. 4.1) позволяют реализовывать следующие функции:

- бесконтактное включение и отключение в номинальном режиме работы;

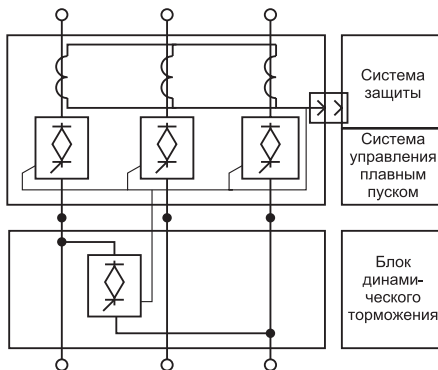


Рис. 4.1

- плавный разгон электродвигателя с ограничением величины пускового тока на заданном уровне;
- плавную остановку с заданной длительностью переходного режима;
- режим динамического торможения;
- плавный разгон электродвигателя с ограничением величины пускового тока на заданном уровне с последующим шунтированием силовых элементов ПТТ контактами электромагнитного пускателя (контактора);
- аварийное отключение цепи нагрузки при неполнофазном режиме, токах короткого замыкания и перегрузках, превышающих их установленные значения.

Временная диаграмма на рис. 4.2 иллюстрирует пример плавного (мягкого) запуска и останова трехфазного асинхронного электродвигателя через пускатель мягкого пуска (soft-starter). Ва-

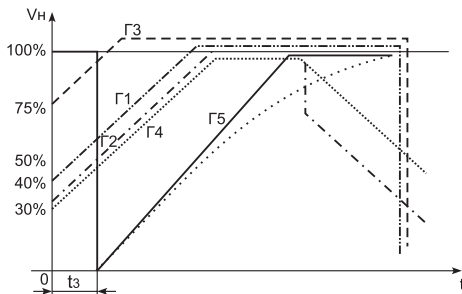


Рис. 4.2

рыирование пускового момента может производиться в пределах от 200 %  $M_{\text{п}}$  до 450 %  $M_{\text{п}}$  за счет оптимизации конфигурации характеристики  $U_{\text{п}} = f(f)$ . Изменение напряжения  $U_{\text{н}}$  на обмотках электродвигателя достигается за счет соответствующего изменения угла управления силовыми элементами  $\alpha$ .

К регулируемым параметрам относятся:

- время плавного пуска, 1—60 с;
- время плавного останова, 0—120 с;
- первоначальное напряжение,  $U_{\text{п}} = (30\text{—}90\%) U_{\text{ном}}$ ;
- предельная величина тока, пуск ( $I_{\text{п}}$ ), (150—500 %)  $I_{\text{ном}}$ ;
- снижение напряжения, останов ( $U_{\text{п}}$ ), (100—40 %)  $U_{\text{ном}}$ .

Отечественной промышленностью практически единичными экземплярами выпускаются тиристорные пусковые устройства:

- МРН-М, состоящий из силового блока, микропроцессорного блока управления с пультом управления;
- УНТ-2, представляющий моноблок со схемой автоматики, силовым блоком и пультом управления;
- УПР-1 и УПР-2, представляющие также моноблок со степенью защиты IP00 либо встроенные в шкафы со степенью защиты IP20 и выше, в том числе для эксплуатации на открытом воздухе;
- ТПУЭ — с обеспечением режима электросбережения.

Характерным для данных пусковых устройств является то, что в переходных режимах (запуск и торможение) коммутация электродвигателя к сети реализуется через силовые тиристоры. В стационарном режиме работы (после окончания пуска) подключение к сети обеспечивается через авиационные контакторы без устройств дугогашения, шунтирующие тиристоры. Такое решение позволяет в значительной степени оптимизировать конструкцию и массогабаритные размеры силового блока. Микропроцессорный блок управления создан на базе однокристалльной 8-разрядной микроЭВМ K1816BE031, обеспечивающей выполнение режимов пуска и торможения, шунтирования и дешунтирования силовых тириستоров соответственно при запуске и остановке.

На рис. 4.3 и 4.4 приведены схемы подключения тиристорных пусковых устройств МРН-М и УПТ-2 для электродвигателей мощностью до 100 кВт, в табл. 36 Приложения — основные технические характеристики. В табл. 37 и 38 Приложения приведены основные технические характеристики пускорегулирующих тиристорных устройств серий УПР-1, УПР-2 и ТПУЭ соответственно.

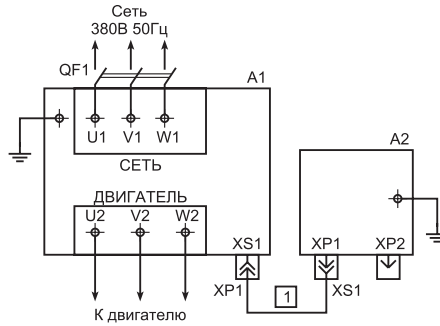


Схема подключения МРН-М

A1 - Блок тиристорный

A2 - Пульт управления

1 - Жгут соединительный

QF1 - Трехфазный автоматический выключатель,  $I_{ном}=630A$   
(в комплект не входит)

Рис. 4.3

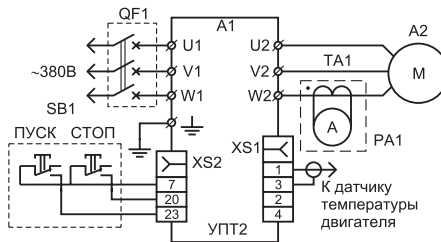


Схема подключения УПТ-2 для нагрузки мощностью до 160кВт

Рис. 4.4

УПР обеспечивают:

- питание от трехфазной сети — 380 В;
- диапазон регулирования выходного напряжения силовой цепи — 0.1...0.95;
- время изменения напряжения на нагрузке от 0.1 до 0.95 номинального напряжения — 0.5...20.0 с;
- диапазон регулирования длительности затянутого останова — 1.0...10.0 с;
- диапазон регулирования времени динамического торможения — 0.5...5.0 с;
- режимы и длительность работы — продолжительный, повторно кратковременный с ПВ-15, 25, 40, 60-%;

- конструктивное исполнение — моноблок со степенью защиты IP00, возможна поставка пускорегулирующих устройств, встроенных в шкафы со степенью защиты IP21 и выше, в том числе для эксплуатации на открытом воздухе.

Предусмотрены варианты устройств, питаемых с выхода НПЧ, с нестандартными напряжением и частотой и высокими искажениями синусоиды и для работы с датчиком скорости (тахогенератором).

Пусковые устройства ТПУЭ обладают характерными функциональными возможностями и обеспечивают:

1. Плавный пуск (1—32 с).
2. Плавный останов (1—20 с).
3. Энергосбережение (оптимизация энергетических характеристик электродвигателя по степени его загрузки).
4. Сушку электродвигателя.
5. Защиту электродвигателя от:
  - установившегося короткого замыкания при пуске;
  - затяжного пуска (когда превышает установленное время);
  - обрыва одной или нескольких фаз;
  - перегрузки электродвигателя в рабочем режиме;
  - опрокидывания электродвигателя (может устанавливаться в пределах от 1 до 60 с);
  - перегрева обмоток электродвигателя при наличии встроенного в электродвигатель датчика температурной защиты;
  - повторного включения (по заказу заказчика устанавливается время, не ранее которого можно повторно включить электродвигатель).
6. Индикацию режимов работы.
7. Индикацию аварийных состояний.
8. Возможность создания автоматических систем по регулированию заданных технологических параметров (давление, расход воды, температуры и т. д.).

На рис. 4.2 представлены типичные гистограммы изменения напряжения на электродвигателе для различных напряжений. При подключении электродвигателя, нагруженного на компрессор (Г1) или насос (Г2) через ПТТ, значительно смягчаются механические перегрузки в осях и кинематике механизмов, уменьшается гидравлический удар в трубопроводах, минимизируется пусковой ток. Причем в зависимости от конкретных условий угол наклона пуска может быть изменен с целью достижения оптимальных условий

разгона. Если в качестве нагрузки используется вентилятор (Г3), то при линейном увеличении напряжения при пуске оптимизируется пусковой момент, уменьшается пусковой ток, снижается механический износ в трансмиссионных механизмах. При работе смесителя (Г4) при нормальном наклоне  $U(f)$  также минимизируется пусковой ток и уменьшаются механические перегрузки. Для механизмов с тяжелыми пусками характерна гистограмма изменения напряжения (Г5), когда удается избегать очень больших пусковых токов и механических перегрузок, а следовательно, и потерь электроэнергии.

В табл. 22 приведены основные параметры серийно выпускаемых тиристорных пускателей серии ПБТ, в табл. 23 указаны параметры перегрузочной способности, необходимые при выборе пускателя на конкретные режимы работы электродвигателя. На рис. 4.5 показаны варианты исполнения бесконтактных пускателей серии ПБР (ПБН), а в табл. 27 — основные технические характеристики.

К сожалению, в настоящее время цена на отечественные бесконтактные аппараты весьма велика, например, пускатель серии ПБР с  $I_n = 160$  А стоит порядка 35 тыс. руб., в то время как традиционный пускатель ПМА 6212 с  $I_n = 160$  А — 3000 руб.

Изделия зарубежного производства, в отличие от серийных отечественных, отличаются большей компактностью, надежно-

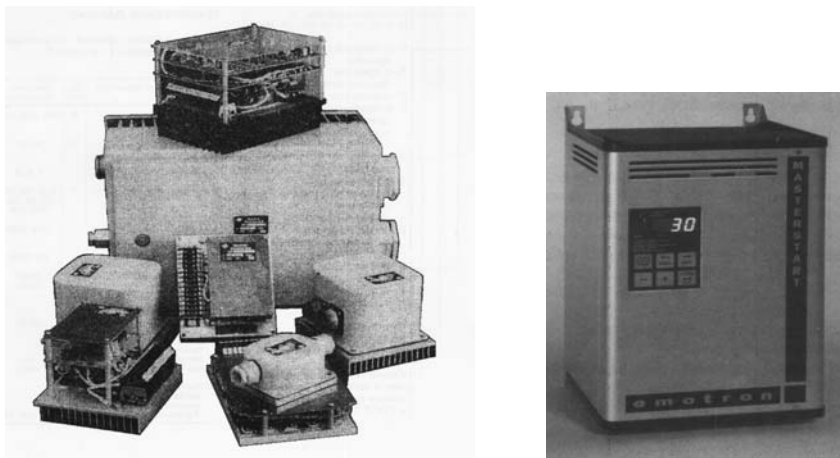


Рис. 4.5

стью, лучшим сервисным обеспечением, многообразием реализуемых функций, но цена также является препятствием для широкого внедрения. На рис. 4.5 показан внешний вид бесконтактного пускателя шведской фирмы «Emotron» (модель MSD 170835). Управление прибора организовано на базе микроконтроллера, в частности, для контроля и управления может быть использован последовательный интерфейс RS232. Диапазон мощностей от 4 до 600 кВт.

В целях снижения и оптимизации электропотребления этой же фирмой выпускаются ряд изделий:

- преобразователь нагрузки EL-FIG3 — измеряет выходную мощность на валу и выдает выходной сигнал, пропорциональный нагрузке двигателя, который подается на индикатор, регистратор или контроллер;
- определитель нагрузки двигателя EL-FIV3 — включается в работу, если нагрузка снизилась ниже допустимого предела или превысила допустимый максимум. Контакты реле могут использоваться для управления другим оборудованием.

Все описанные устройства обладают следующими свойствами:

- непосредственным подключением к питающему кабелю электродвигателя;
- предотвращением ненужных отключений и остановки оборудования;
- реализацией контроля и управления — простой и экономичной;
- не требуют технического обслуживания.

## **4.2. Изделия силовой электроники в структуре современных средств автоматизации и устройств коммутации тока**

Как известно, к концу 70-х гг. основу элементной базы силовой электроники составляли пять групп приборов:

1. Неуправляемые полупроводниковые диоды (вентили), в основном кремниевые.
2. Традиционные тиристоры (SCR — Silicon Controlled Rectifier).
3. Запираемые тиристоры (GTO — Gate — turn — off).
4. Биполярные транзисторы (BPT — Bipolar Power Transistor).
5. Полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET Metal — Oxid — Semiconductor — Field — Effect — Transistor).



Об элементах первых четырех групп хорошо осведомлены практически все специалисты, так или иначе сталкивающиеся с современным электрооборудованием. Кроме того, существует большое количество любительских и профессиональных справочных изданий, в достаточной мере освещающих параметры и все аспекты применения. Полевые транзисторы MOSFET с изолированным затвором — с начала 80-х гг. наиболее динамично развивающийся класс приборов. Основная область применения: высокочастотные преобразователи (сотни кГц), мощные ключи постоянного тока, низковольтные (до 200 В) преобразователи для ключевых источников питания, приводов вентильных двигателей, электронных ключей постоянного тока, компактных систем бесперебойного питания. Годовые темпы прироста выпуска на мировом рынке изделий на базе MOSFET в 1989 г. составили 63 %, в 1994 г. — 57 %. К 1999 г. прогнозировалось 46 %. В табл. 12 приведены предельные значения основных параметров силовых МОП-транзисторов (MOSFET), достигнутых к концу 1998 г.

Запираемые тиристоры GTO — это обособленный класс полностью управляемых полупроводниковых приборов, широко применяемых в мощных коммутационных аппаратах и преобразовательной технике. Вплоть до 1997 г., в связи с общим падением промышленного производства, уровень коммерческого спроса на этот перспективный класс приборов силовой электроники упал, хотя есть предпосылки массового применения в электроподвижном составе городского и железнодорожного транспорта в качестве основного элемента управляемых выпрямителей. Некоторые ограничения вносятся из-за существующих осложнений при работе запираемых тиристоров на частоте коммутации выше 500 Гц вследствие значительных потерь энергии в снабберных (демпфирующих)

цепях и в самом тиристоре. Проведенные исследования и технологические решения привели к созданию запираемых тиристоров 2-го поколения, которые могут работать на частотах выше 500 Гц с довольно малыми емкостями снабберной цепи, а то и вовсе без них. Это так называемые GCT-тиристоры. На рис. 4.6 иллюстрируется

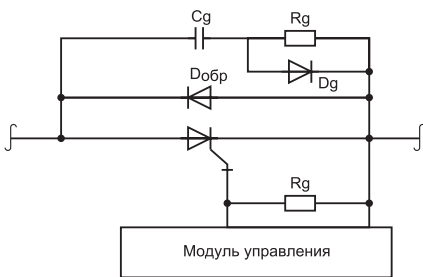


Рис. 4.6

типовая схема включения запираемого тиристора с элементами снабберной цепи: Cg, Rg, Dg. Добр — диод обратного тока; Rg — резистор управляющей цепи.

Крупнейшим производителем силовых полупроводниковых приборов ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск) осваиваются новейшие технологические методы, позволяющие изготавливать оптимизированные запираемые тиристоры: мезатехнология, протонное и электронное облучение рекомбинационных центров полупроводниковой структуры, технологии прозрачных или тонких эмиттеров и др. Все это дает возможность снизить почти вдвое значение снабберной емкости (примерно до 1 мкФ на 1000 А коммутируемого тока) и соответственно повысить частоту коммутации до 1100 Гц без заметного увеличения потерь. Наиболее общим направлением работ по совершенствованию GCT-тиристорov является реализация запираения очень большим током, равным или превосходящим анодный ток, вводимым через управляющий электрод с очень большой скоростью 1000—2000 А/мкс. Это дает возможность снизить время задержки выключения примерно в 8—9 раз. В табл. 34 и табл. 35 Приложения приведены основные параметры серийно выпускаемых и перспективных запираемых тиристорov соответственно. С позиций электросберегающих технических решений запираемые тиристоры применяются и будут применяться для изготовления мощных бесконтактных коммутационных аппаратов: электронных пускателей «мягкого» пуска, устройств динамического торможения, переключателей ответвлений в специальных трансформаторах и т. д.

К концу 1990 г. появились новые классы приборов — биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) и на их основе интеллектуальные силовые интегральные схемы и модули. Эти приборы являются продолжением технологии развития и совершенствования силовых транзисторов со структурой металл — оксид — полупроводник, управляемых электрическим полем. Как и силовой транзистор со структурой MOSFET, IGBT имеет изолированный затвор и очень малую мощность управления. По быстродействию IGBT уступают полевым транзисторам MOSFET, но значительно превосходят биполярные. Типичные значения времени рассасывания накопленного заряда и спада тока при выключении IGBT составляют соответственно 0,2—0,4 и 0,2—1,5 мкс. Следует отметить, что практически каждые полгода увеличивается уровень предельных параметров. Напри-

мер, первое поколение IGBT-транзисторов (1985 г.) допускало предельные коммутируемые напряжения 1000 В и токи 200 А в модульном и 25 А в дискретном исполнении. При этом прямое падение напряжения в открытом состоянии не превышало 3—3.5 В при частоте коммутации до 5 кГц, время включения около 1 мкс. Второе поколение приборов до 1991 г. включительно позволяло коммутировать напряжения до 1600 В, токи до 500 А в модульном исполнении и 50 А в дискретном исполнении; снизилось прямое падение напряжения до 2.5—3 В, частота коммутации увеличилась до 20 кГц, время включения/выключения снизилось до 0.5 мкс. Третье поколение, конец 1994 г., характеризуется следующими параметрами:

- максимальное коммутируемое напряжение до 3500 В;
- максимальный ток в модульном исполнении до 1200 А;
- максимальный ток в дискретном исполнении до 120 А;
- прямое падение напряжения 1.5—2.2 В;
- частота коммутации 50 кГц;
- время включения/выключения около 0.2 мкс.

Кроме этого, приборы третьего поколения имеют потери при выключении на 30 % меньшие, при включении — 35 %, параметры обратного диода — на 35—30 % лучшие. Стремительный рост уровня параметров обусловлен ростом требований к приводам переменного тока, в которых основным звеном является независимый инвертор напряжения, собранный на IGBT-транзисторах, выполняющий функцию преобразователя частоты. На российском рынке с транзисторами IGBT и модулями сложилась ситуация, в которой трудно выделить доминирующее положение конкретного производителя, т. к. продажу изделий через свои представительства в России ведут порядка 18 фирм, включая Fuji, Toshiba (Япония), Siemens & Eupes (Германия), International Rectifier (США). Делают свои шаги и российские производители, выпускающие дискретные МОП и IGBT-транзисторы, двухключевые полумостовые модули на базе МОП и IGBT-транзисторов (рис 4.7). Координацию производства и применения изделий осуществляет научно-промышленный консорциум «Интеллектуальная силовая электроника» НПП «ИНЕЛС». В табл. 29 и 30 Приложения приведены параметры полумостовых модулей на МОП и IGBT-транзисторах, в табл. 31 — параметры диод-транзисторных и транзистор-диодных модулей (чопперов).

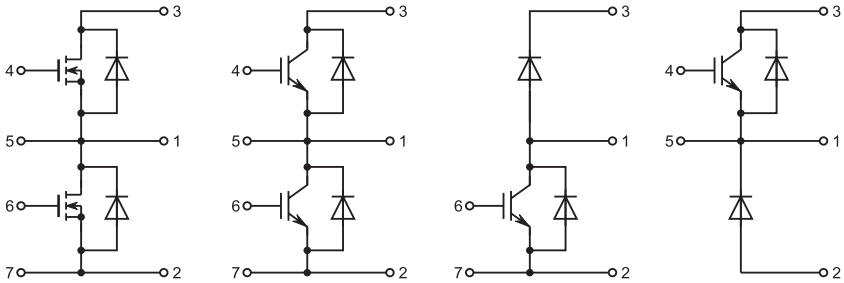


Рис. 4.7

Силовые модули с изолированным основанием содержат два последовательно соединенных ключа на полевых (М2ТКП) или биполярных транзисторах с изолированными затворами с обратными быстровосстанавливающимися диодами (М2ТКИ) или последовательно соединенные диод-биполярный транзистор с изолированным затвором с обратным быстровосстанавливающимся диодом (МТКИД, МДТКИ) — чопперы. Разработан и уже изготавливается производственной базой ВЭИ ряд силовых модулей на полевых транзисторах MOSFET и биполярных транзисторах с изолированным затвором IGBT, состоящий из:

- стойки моста с регулятором напряжения на полевых транзисторах МПТО.1РП200, МПТО.1РП201 (рис. 4.8); на IGBT-транзисторах МИТО.1РП200, МИТО.1РП201 (рис. 4.9);

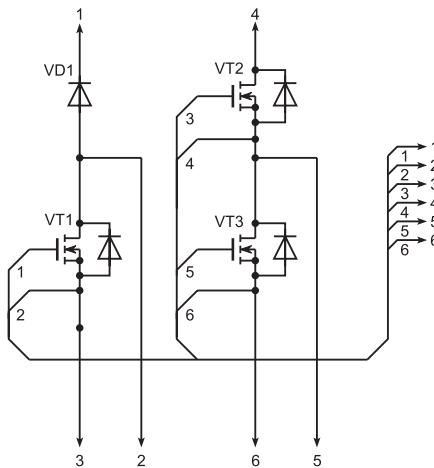


Рис. 4.8

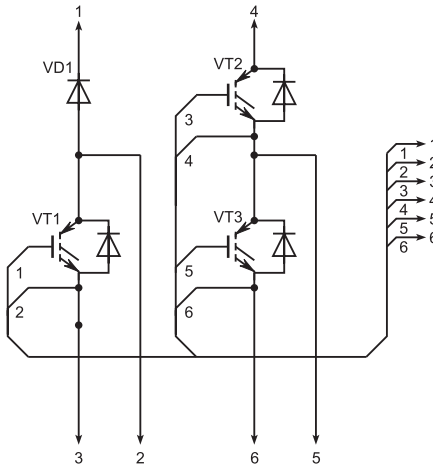


Рис. 4.9

- сетевого однофазного выпрямителя с регулятором постоянного напряжения, трехфазного инвертора и драйвера, согласующего систему управления с затворами силовых элементов схемы.

Блок-схема модуля на полевых транзисторах МРПТ1.3МРИ100 и МРПТ1.3МРИ102 показана на рис. 4.10, а на IGBT-транзисто-

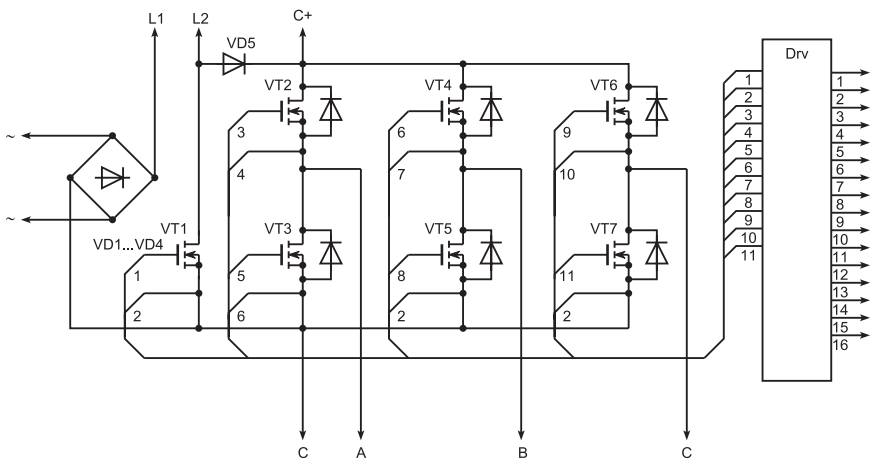


Рис. 4.10

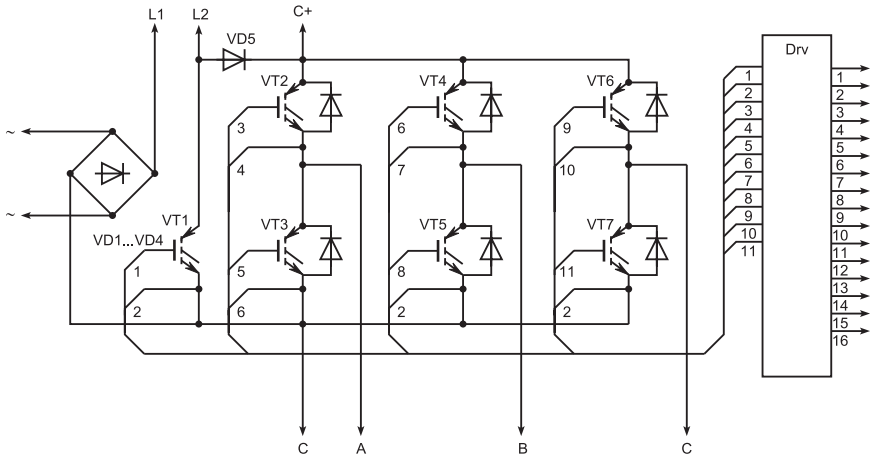


Рис. 4.11

рах — на рис. 4.11. Модули выпускаются в пластмассовых корпусах.

Основные технические характеристики силовых модулей приведены в табл. 29, 30, 31 (для модулей на силовых транзисторах и для модулей на IGBT-транзисторах), где:

$U_{ds}$  — максимально допустимое напряжение сток-исток;

$I_d$  — максимально допустимый постоянный ток стока;

$U_{об}$  — максимально допустимое постоянное обратное напряжение диода;

$U_{ce}$  — напряжение коллектор-эмиттер;

$I_c$  — максимально допустимый постоянный ток коллектора;

$I_{cp}$  — средний прямой ток диода;

$U_{gr}$  — напряжение гальванической развязки.

Отечественная промышленность только осваивает полномостовые модули, в то время как множеством зарубежных фирм выпуск их налажен еще с 1993 г., например Siemens AG (Германия), International Rectifier (США), Fuji (Япония).

Выбор силовых приборов, кроме IGBT-транзисторов, подробно описан в популярной и профессиональной технической литературе. Поэтому подробнее остановимся на описании основных параметров биполярных транзисторов с изолированным затвором.

Условное обозначение модулей включает:

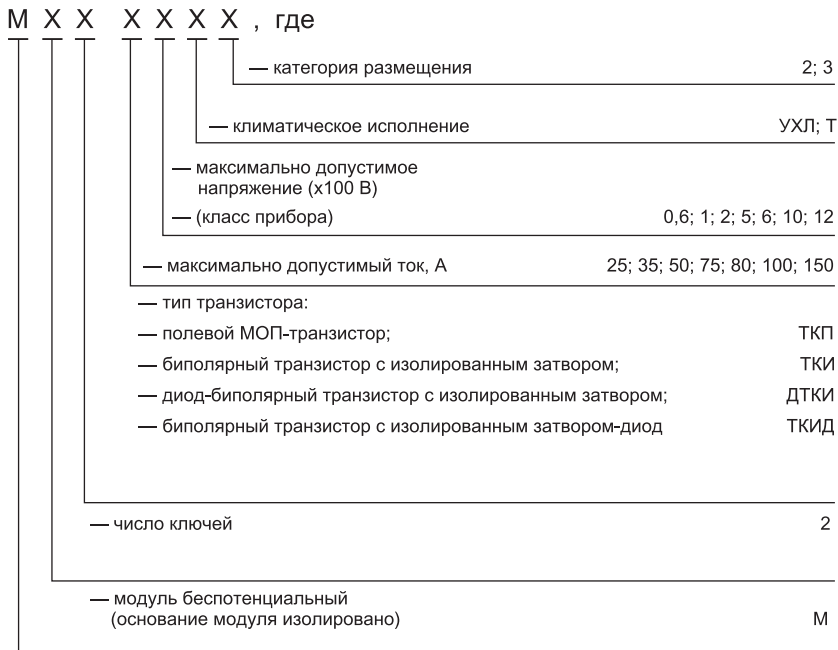


Рис. 4.12

## АБСОЛЮТНЫЕ МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ

### $I_C$ — ДЛИТЕЛЬНЫЙ ТОК КОЛЛЕКТОРА

Значения длительного тока коллектора определены для температур 25 °С и 100 °С. Эти значения основаны на предельных температурах. Они определяют максимальный прямой ток, который можно пропустить через IGBT-транзистор в корпусе модуля с соответствующей мощностью рассеивания, которая повышает температуру корпуса до максимального значения.

Значение длительного тока IGBT-транзистора при температуре корпуса  $E_C$  дается:

$$(I_C \text{ при } T_C) \times (V_{CE(ON)} \text{ при } I_C \text{ при } T_C) \times R_{thjc} = (T_{jmax} - T_C),$$

где  $R_{thjc}$  — термосопротивление корпус-переход;  $T_{jmax}$  — значение максимальной температуры перехода.

Значение  $I_C$  получено при приложении 15 В напряжения затвор-эмиттер  $V_{GE}$  (которое определяет величину  $V_{CE(ON)}$ ). В большинстве применений IGBT-транзистора никогда не возникает необходимости работать на постоянном токе, превышающем значение  $I_C$  при  $T_C = 25^\circ\text{C}$ . Это происходит вследствие того, что нет практической необходимости поддерживать температуру корпуса на  $25^\circ\text{C}$  с отводом тепла.  $I_C$  при  $T_C = 25^\circ\text{C}$  главное значение, не требующее дополнительных отметок для сравнения с другими промышленными типами, которые имеют сходные главные значения.

Значение  $I_C$  при  $T_C = 100^\circ\text{C}$  в типовом случае выше главного значения примерно на 55 %, оно в большей степени соответствует среднему нормальному рабочему току.

$I_{OM}$  — ПИКОВЫЙ ВЫХОДНОЙ ТОК.

$I_{OM}$  — абсолютный максимальный пиковый повторяющийся выходной ток модуля.

$I_{LM}$  — ПИКОВЫЙ ВЫХОДНОЙ ТОК ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ.

$I_{LM}$  — пиковый выходной ток, который можно безопасно переключать повторно в установленных условиях. Он определяет максимальный ток, ограничивающий область безопасной работы переключения. Пиковый ток коллектора IGBT-транзистора в течение включения выше  $I_{LM}$  за счет добавочного тока обратного восстановления диода. Это получается при значении выходного тока  $I_{LM}$ .

Поэтому, когда конструкция нагружается значением  $I_{LM}$  выходного тока, не требуется учитывать дополнительный ток обратного восстановления и величину тока переключения.

$I_{FM}$  — ПИКОВЫЙ ПРЯМОЙ ТОК ДИОДА.

$I_{FM}$  — максимальный пиковый повторяемый ток, который может проходить через диод. Он имеет ту же величину что и  $I_{OM}$ .

$V_{CE}$  — ДЛИТЕЛЬНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КОЛЛЕКТОР-ЭМИТТЕР.

$V_{CE}$  — максимальное напряжение, которое может подаваться на выводы эмиттера и коллектора к затворам, соединенным с эмиттером.

$V_{GE}$  — НАПРЯЖЕНИЕ ЗАТВОР-ЭМИТТЕР.

$V_{GE}$  — это максимальное напряжение любой полярности, которое можно подавать на выводы затвора и эмиттера. Пробивное напряжение затворного окисла в норме в несколько раз выше  $V_{GE}$ . Превышение  $V_{GE}$  не обязательно приводит к пробое. Однако этого



следует избегать, так оно может привести к деградации долговременной надежности.

$V_{ISOL}$  — НАПРЯЖЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ.

$V_{ISOL}$  — максимальное значение переменного напряжения (50 и 60 Гц) которое может подаваться между любым выводом и корпусом.

$P_{DMAX}$  — МОЩНОСТЬ РАССЕИВАНИЯ.

$P_{DMAX}$  — максимальная мощность, которая может быть рассеяна в каждом IGBT-транзисторе при температуре корпуса, удерживаемой на уровне 25 °С. Она основана на росте температуры переход-корпус ( $T_{JMAX} - 25$  °С) и поэтому относится к тепловому сопротивлению переход-корпус.

$$P_{DMAX} = \frac{T_{JMAX} - 25^{\circ}\text{C}}{R_{THJC}} = \frac{125^{\circ}\text{C}}{R_{THJC}}. \quad (5.1)$$

$T_J$  — ЗНАЧЕНИЕ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕХОДА.

Это верхняя и нижняя предельно допустимая рабочая температура перехода.

$T_{STG}$  — ГРАНИЧНЫЙ ДИАПАЗОН ТЕМПЕРАТУР.

Это верхний и нижний пределы допустимого диапазона температуры.

## СТАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

$BV_{CES}$  — ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ КОЛЛЕКТОР-ЭМИТЕР.

$BV_{CES}$  — минимальное напряжение, которое можно подать на переход коллектор-эмиттер при определенном токе коллектора и при затворе закороченным с эмиттером.

$BV_{CES} / T_J$  — ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПРОБИВНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Пробивное напряжение коллектор-эмиттер IGBT-транзистора уменьшается с ростом температуры перехода. Для IGBT-транзистора на 600 В температурный коэффициент пробивного напряжения в типичном случае равен примерно 0.7 В / °С.

Ток утечки коллектора растет с ростом температуры. Ток утечки коллектора, на котором определен температурный коэффициент, поэтому больше тока утечки при 25 °С. Минимальное пробивное напряжение  $BV_{CES}$  может быть ниже 550 В при  $T_J = -40$  °С.

$V_{CE(ON)}$  — НАПРЯЖЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ КОЛЛЕКТОР-ЭММИТЕР.

$V_{CE(ON)}$  — напряжение коллектор-эмиттер при определенном токе коллектора, напряжении затвор-эмиттер и температуре перехода.

$V_{CE(ON)}$  — важная критическая характеристика, так как она определяет потерю проводимости.

$V_{FM}$  — ПРЯМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ДИОДА.

$V_{FM}$  — максимальное прямое напряжение диода при определенном токе и температуре перехода.

$V_{GETH}$  — ПОРОГОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЗАТВОРА.

При напряжении затвор-эмиттер отличном от 0, ток коллектора отсутствует пока не будет достигнуто пороговое значение напряжения затвора. IGBT-транзистор «выключен», если напряжение затвор-эмиттер меньше порогового.

Таким образом, пороговое напряжение затвора является напряжением затвор-эмиттер, который подводит IGBT-транзистор к «порогу» проводимости, оно определяется как напряжение затвора, при котором начинает появляться малый ток коллектора. Указываются максимальное и минимальное пороговые значения.

$V_{GETH} / T_j$  — ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПОРОГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ.

Пороговое напряжение затвора уменьшается с ростом температуры перехода. Температурный коэффициент  $V_{GETH} / T_j$  определяет степень уменьшения порогового напряжения с температурой.

В норме  $V_{GETH} / T_j$  равен 11 мВ / °С. IGBT-транзистор с минимальным пороговым напряжением 3.0 В при 25 °С, поэтому при 150 °С будет иметь пороговое напряжение 1.63 В.

$G_{FE}$  — ПРЯМАЯ ПЕРЕХОДНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ.

«Усиление» (крутизна) IGBT-транзистора выражается в значении его переходной проводимости. Переходная проводимость является приращением изменения тока коллектора при приращении изменения напряжения затвора в определенной рабочей точке. Указываются максимальное и минимальное значения переходной проводимости.

Как отмечалось ранее, основными преимуществами IGBT являются высокие значения рабочей частоты и простые схемы управления. Ток управления мал, поэтому главный элемент цепи управления — драйвер конструктивно компактен. В модулях на базе IGBT-транзисторов схема драйвера непосредственно включа-

ется в его структуру. В последнее время стремительно растет применение интеллектуальных модулей на базе IGBT-транзисторов по технологии Smart — Power, объединяющей на одном кристалле требуемую точность биполярной технологии с преимуществом технологии КМОП по созданию логических ИМС и технологии ДМОП по созданию мощных выходных каскадов с малыми потерями на одном кристалле.

Интеллектуальные модули отличаются:

- способностью к самозащите (защита от неправильной полярности, короткого замыкания, ошибок в эксплуатации обрыв заземления или нагрузки, перенапряжение и перегрев);
- способностью к самодиагностике (передача информации об ошибках на управляющий микроконтроллер);
- самостоятельным переходом в защищенное состояние в случае аварии.

В качестве примера в табл. 32 приведены основные технические характеристики силового интеллектуального модуля IRPT2062 производства International Rectifier (Калифорния, США), а на рис. 4.13, 4.14 показаны соответственно внешний вид и функциональная схема. Модуль рассчитан на подключение электродвигателя мощностью 2.2 кВт, легко встраивается практически в любые конструктивы и имеет интерфейс, позволяющий подключать с небольшой адаптацией управляющий микроконтроллер отечественного или зарубежного производств.

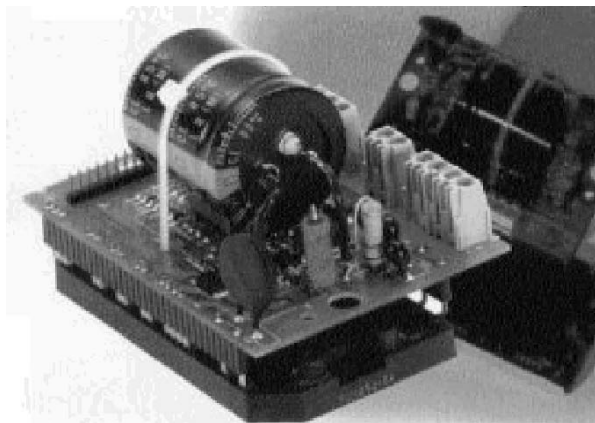


Рис. 4.13

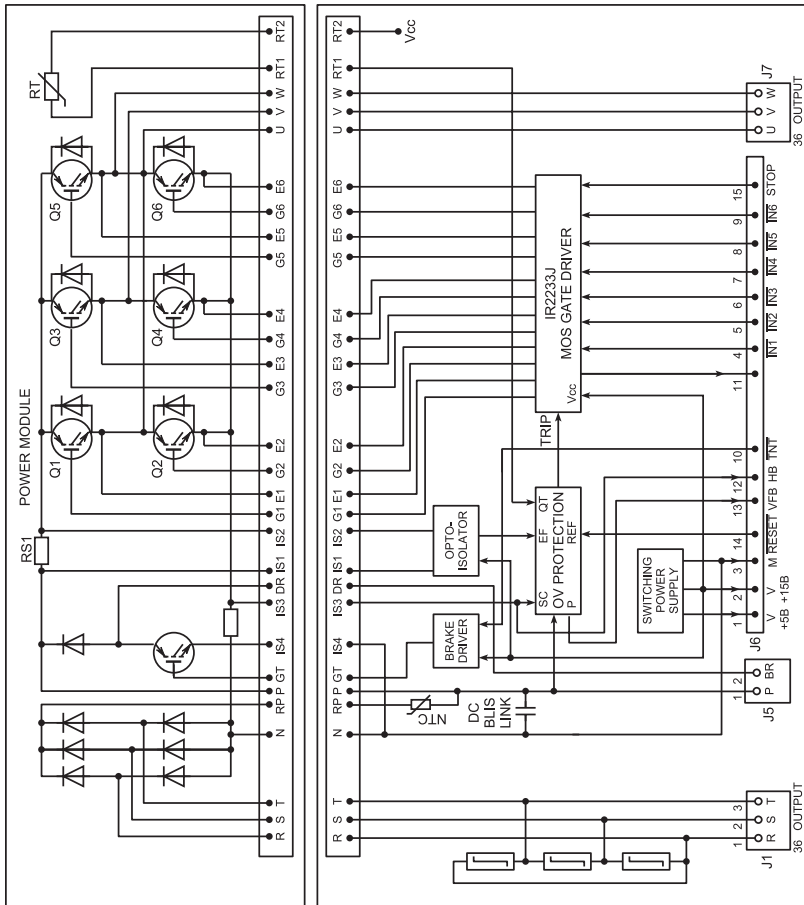


Рис. 4.14

Довольно высокая стоимость изделий силовой электроники на базе MOSFET и IGBT отчасти определила их основную сферу применения:

- электропривод переменного тока;
- системы бесперебойного питания;
- статические компенсаторы и активные фильтры;
- мощные источники питания;
- преобразователи для сварки, индукционного нагрева, ультразвуковых установок;
- ключевые источники питания;

- приводы вентильных двигателей;
- приводы индукторных двигателей;
- электронные ключи постоянного тока;
- компактные системы бесперебойного питания.

В сфере бесконтактной коммутации переменных токов, не превышающих 100 А, где требуются сравнительно небольшие затраты, применяются элементы силовой электроники на базе традиционных тиристорных структур, выполненных в виде гибридных силовых модулей. Примером могут служить тиристорные коммутаторы серий КПТ101, КПТ101.1, КПТ201, КПТ201.1, КПТ301. Коммутаторы переменного тока КПТ101 и КПТ101.1 выпускаются по ТУ19280568.002 — 96 и предназначены для работы в бесконтактной коммутирующей и регулирующей аппаратуре частотой до 500 Гц. Силовая схема коммутаторов (рис. 4.15) представляет одну из схем трехфазных КТЭ, включаемых в рассечку нулевой точки статорных цепей.

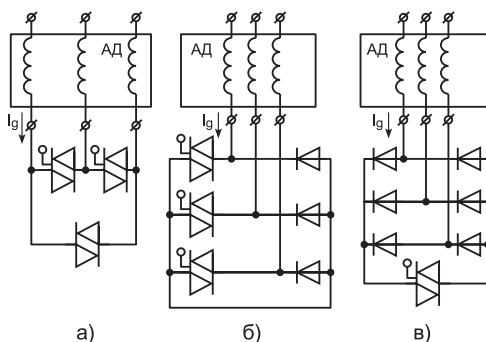


Рис. 4.15

Схема на рис. 4.15, а, состоящая из минимального числа вентилей, предъявляет следующие требования к диапазону изменения угла  $\alpha$  открытия симисторов (тиристоров):  $\varphi < \alpha < 210^\circ$ .

Среднее значение тока через тиристор и значение максимальных прямого и обратного напряжений для данной схемы равны:

$$I_{СРТ} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_g \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \sin \bar{\omega}t \cdot d\bar{\omega}t \approx 0.675 I_g, \quad (4.2)$$

$$U_{пр.макс} = U_{обр.макс} = \sqrt{2} U_{л}, \quad (4.3)$$

где  $I_g$  — действующее значение тока нагрузки;  $U_L$  — действующее значение линейного напряжения.

Для схемы 4.15, б:

$$I_{CPT} = I_g / \sqrt{6} \approx 0.41I_g, \quad (4.4)$$

$$U_{пр.макс} = U_{обр.макс} = \sqrt{2}U_L. \quad (4.5)$$

Для схемы 4.15, в:

$$I_{CPT} \approx 1.22I_g, \quad (4.6)$$

$$U_{пр.макс} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_L \approx 136U_L. \quad (4.7)$$

В случае использования схемы на рис. 4.15, в необходимо применять дополнительные меры для закрывания тиристора (симистора), т. к. он коммутирует практически постоянный ток. Схема коммутатора КПТ101(101.1) содержит в отличие от типовых схем КТЭ два силовых ключа с двухсторонней проводимостью и схему управления, следящую за фазовым углом нагрузки и вырабатывающую импульсы управления силовыми ключами в момент перехода напряжения сети через нуль при трехфазном, двухфазном и однофазном питании. Схема управления предусматривает автономное управление каждым ключом и одновременное управление силовыми ключами, что позволяет коммутировать трехфазные, двухфазные и однофазные нагрузки. Импульсы управления ключами равнополярные, что позволяет выпрямлять напряжение на нагрузке. На рис. 4.16 приведены примеры схем включения коммутатора КПТ101(101.1):

4.16.1 — при замыкании контактов включается трехфазная нагрузка;

4.16.2 — отдельное управление линейным напряжением;

4.16.3 — выпрямление линейных напряжений;

4.16.4 — сочетание схем 2 и 3;

4.16.5 — включение двухфазной нагрузки;

4.16.6 — отдельное управление фазными нагрузками;

4.16.7 — коммутация двух нагрузок от одной фазы с выпрямлением тока одной из нагрузок;

4.16.8 — коммутация двух нагрузок от одной фазы с выпрямлением тока в них;

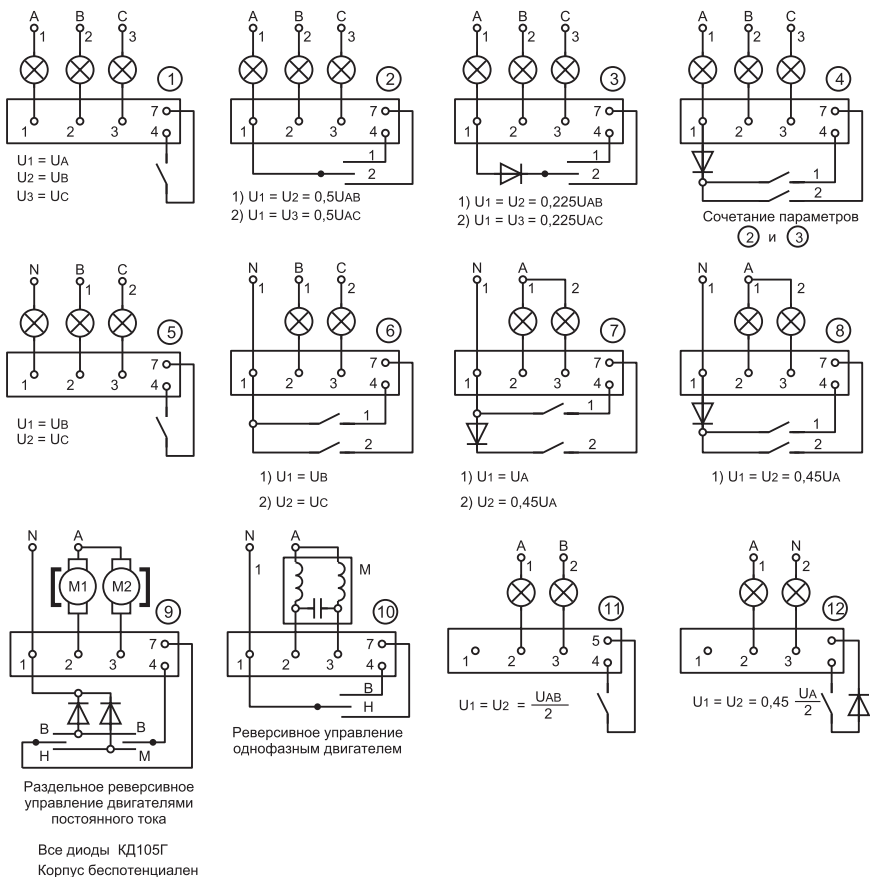


Рис. 4.16

4.16.9 — раздельное реверсивное управление двигателями постоянного тока;

4.16.10 — реверсивное управление однофазных электродвигателей;

4.16.11 — включение двух нагрузок на половину линейного напряжения;

4.16.12 — включение двух нагрузок на половину фазного напряжения с выпрямлением.

Основные параметры коммутатора:

1. Прочность изоляции — 2500 В;

2. Крутящий момент винтов крепления — 5,5 Н·М;

3. Крутящий момент винтов электросоединения — 2.3 Н·М;
4. Предельный ток — 80 А при температуре корпуса — 65 °С (для КПТ101.1 — 3 А);
5. Класс прибора — не менее 800 В;
6. Ток управления — не более 250 мА;
7. Ударный ток — 550 А, время импульса 10 мс;
8. Скорость изменения напряжения  $dU/dt$  — 25 В/мкс;
9. Скорость изменения тока  $dI/dt$  — 63 А/мкс;
10. Падение напряжения в открытом состоянии не более 1.8 В;
11. Напряжение управления не более 5 В;
12. Тепловое сопротивление переход-корпус — 0.44 °С / Вт;
13. Условия эксплуатации: от -50 °С до +125 °С;
14. Влажность — до 98 %;
15. Габариты — 92×35×20 мм.
16. Выводы КПТ101(101.1): 1 — общий; 2 — выход 1; 3 — выход 2; 4 — управление выходом 1; 7 — управление выходом 2.

Коммутаторы переменного тока КПТ 201 и КПТ201.1 выпускаются по техническим условиям ТУ19280568.003—96 и служат для коммутации, управления и защиты нагрузок, в основном электродвигателей. Нагрузки могут иметь любой фазовый угол. Коммутаторы защищают и нагрузки и себя. В номинальной поставке коммутатор КПТ201 состоит из корпуса силовых ключей и блока защиты от короткого замыкания. В коммутаторе КПТ 201.1 блок защиты встроен в корпус силовых ключей. Коммутатор содержит три силовых ключа по варианту трехфазного КТЭ (рис. 4.15, а) и схему управления, осуществляющую следующие виды защит: нулевую; тепловую; обрыв любой фазы; короткое замыкание нагрузки любой фазы; любое кратковременное короткое замыкание нагрузок между собой и на землю; перекос фаз.

Все защиты работают на отключение коммутатора, схема управления вырабатывает импульсы управления для силовых ключей в момент перехода фазных напряжений через нуль. Предусмотрено два способа включения и отключения коммутатора: от внутренних схем управления (ручной режим), от внешнего источника постоянного тока (автоматический режим). На рис. 4.17 приведены схемы включения КПТ201 (201.1). Коммутатор включается кратковременным замыканием любой из клемм 1, 2, 3 с клеммой 7. Для безыскрового включения кратковременно замыкают клеммы 1 и 6. В обоих вариантах запуска коммутатор сохраняет включенное состояние до подачи команды на отключение кнопкой SB2



либо срабатывания защит. Коммутатор отключается кратковременным замыканием клемм 4 и 7 или 6 и 7 (безыскровой вариант) либо кратковременным размыканием цепи 4-N (групповое отключение нескольких коммутаторов). При работе с тепловой защитой коммутатор отключается при увеличении термосопротивления RK (позистор), что происходит при нагреве обмоток двигателя либо при перегреве нагрузок фаз. Однако при этом сохраняется толчковый режим от кнопки SB1. Если же перегрев RK продолжается, то отключается и толчковый режим. Если тепловая защита выполнена посредством термореле SK типа «термик», то повторное включение возможно только после возврата реле.

На рис. 4.17.1 и 4.17.2 даны схемы включения коммутатора, которые обладают полным набором защит. Запуск двигателя осуществляется в следующей последовательности: подают напряжение сети на клеммы А, В, С через автоматический выключатель или предохранитель (видимый разрыв), замыкают тумблер SA, нажимают кнопку SB1 «Пуск» — электродвигатель включается. Для отключения электродвигателя нажимают кнопку SB2 «Стоп». Для схем, показанных на рис. 4.17.3 и 4.17.4: при перегреве позистора RK нагревается внешним источником тепла, а при перегреве фаз — за счет увеличения тока через позистор, пропорционального величине перегоса. Последовательно с позистором включают переменный резистор RP для регулирования температуры срабатывания и снижения температуры позистора. При увеличении переменного резистора температура срабатывания снижается. Индикаторы HL1 и HL2 горят при работе коммутатора. На рис. 4.17.5 и 4.17.6 даны схемы включения и отключения коммутаторов от источника постоянного тока. Для всех схем SB1 — кнопка включения, SB2 — кнопка отключения. На рис. 4.17.7 дана схема отключения нагрузок автоматом FA, он может быть без защит, но с независимым расцепителем HP, который должен срабатывать при прямом попадании напряжения сети на клеммы 1, 2, 3 либо перегосе фаз более 25 %. На рис. 4.17.8 «видимый разрыв» производится пускателем KM. Кнопка SB1 может быть заменена на «двухрукое» включение. Отвод тепла осуществляется через беспотенциальное основание корпуса, температура которого не должна превышать 65 °С.

Коммутаторы относятся к электрооборудованию с рабочим напряжением до 1000 В. Все клеммы коммутатора находятся под напряжением сети. Для обеспечения отвода тепла коммутатор рекомендуется устанавливать в клеммник двигателя.

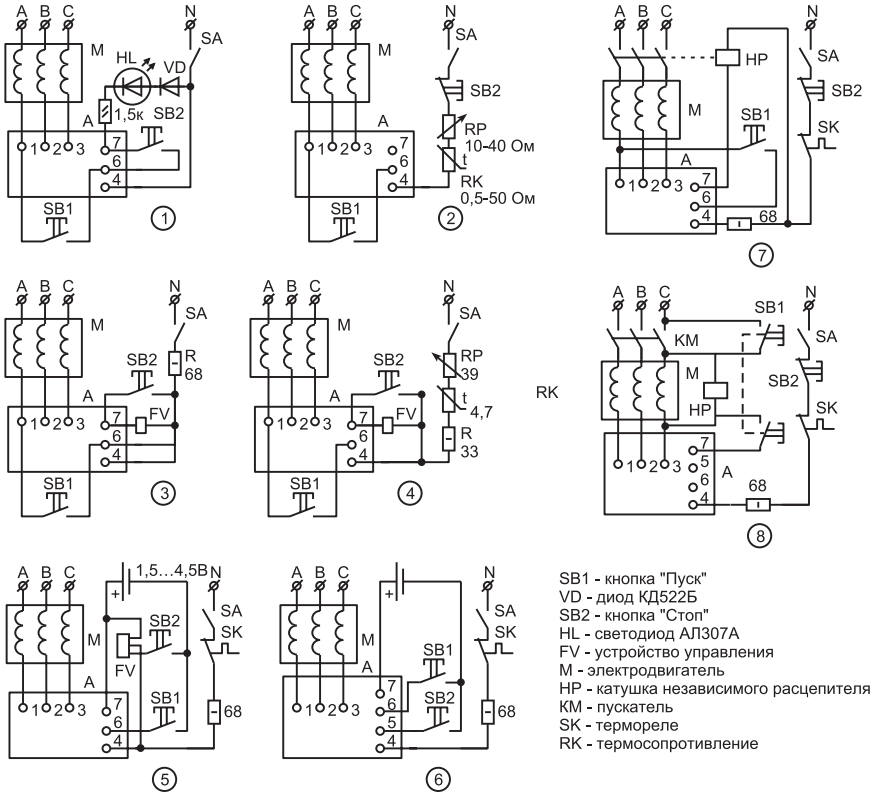


Рис. 4.17

Основные характеристики КПТ 201(201.1):

1. Прочность изоляции — 2500 В;
2. Крутящий момент винтов крепления — 5.5 Н·М;
3. Крутящий момент винтов электросоединения — 2.3 Н·М;
4. Предельный ток — 50 А при температуре корпуса — 65 °С (для КПТ201.1 — 3 А);
5. Класс прибора — не менее 800 В;
6. Ток управления — не более 250 мА;
7. Ударный ток — 350 А для КПТ201 и 100 А для КПТ201.1, время импульса 10 мс;
8. Скорость изменения напряжения  $dU/dt$  — 25 В/мкс;
9. Скорость изменения тока  $dI/dt$  — 63 А/мкс;

10. Падение напряжения в открытом состоянии не более 1.8 В;
11. Напряжение управления, не более 6 В;
12. Тепловое сопротивление переход-корпус — 0.44 °С/Вт;
13. Условия эксплуатации: от –50 °С до +125 °С;
14. Влажность — до 98 %;
15. Габариты — 92×35×20 мм (КПТ201.1 — 70×42×20);
16. Габаритные размеры блока защиты от короткого замыкания 35×15×10;
17. На схеме рис. 4.17: электроды 1, 2, 3 — силовые; 4, 5, 6, 7 — управление.

КПТ 301(301.1) является преемственным изделием к КПТ201 и отличается рядом основных эксплуатационных параметров.

К изделиям силовой электроники следует отнести целый класс новейших коммутационных аппаратов: оптоэлектронные твердотельные реле отечественного (табл. 24–26) и зарубежного (табл. 28) производства. Оптоэлектронные твердотельные реле являются приборами нового поколения и содержат сильноточные ключи с гальванической развязкой между входами управления и нагрузкой; функционально эквивалентны электромагнитным реле с нормально разомкнутыми контактами. Напряжение изоляции вход-выход и выход-теплоотвод не менее 1.5 кВ или 3.75 кВ. Ток утечки в выключенном состоянии не более 1 мА (типовой — менее 100 мкА). Входной элемент — светодиод, выходной — тиристор, симистор или полевой транзистор. Корпусы реле пластмассовые, вертикального и горизонтального монтажа на печатных платах и панелях.

Оптоэлектронные твердотельные реле способны заменить электромагнитные реле в высоконадежных коммутационных системах. Такие изделия разделяются на четыре категории по функциональному назначению и роду тока: реле переменного тока; реле постоянного тока; общего назначения и реверсивные.

### ***Реле переменного тока***

Особенности:

- коммутация нагрузок в цепях переменного тока;
- совместимость с ТТЛ/ТТЛШ, КМОП;
- низкое остаточное напряжение;  $U_{ост.} \leq 2.0$  В;
- высоковольтная монолитная схема:  $U_{из.} \geq 1500$  В;
- диапазон рабочих температур (–45...+75) °С.

Применение:

- коммутация электродвигателей переменного тока;

- коммутаторы конечных нагрузок в различных системах автоматического регулирования;
- коммутаторы в цепях переменного тока.

#### *Описание*

Твердотельные оптоэлектронные реле с симисторами на выходе служат для замены электромагнитных реле.

Прибор состоит из светодиода, оптически связанного с оптосимистором, который управляет мощным коммутирующим элементом (последним может быть симистор или два включенных встречно-параллельно тиристора).

В зависимости от исполнения оптоэлектронное реле может содержать встроенную схему контроля перехода через «ноль» (реле типа ТМ). В оптических реле типа ТС цепь контроля перехода через «ноль» отсутствует.

#### *Реле постоянного тока*

Особенности:

- коммутирование нагрузок в цепях постоянного тока;
- совместимость с ТТЛ/ТТЛШ, КМОП;
- низкое сопротивление в открытом состоянии;
- высоковольтная монолитная схема:  $U_{из.} \geq 1500 \text{ В}$ ;
- диапазон рабочих температур ( $-45...+75$ ) °С.

Применение:

- коммутация электродвигателей постоянного тока;
- импульсные источники питания;
- системы автоматического регулирования и управления;
- быстродействующие системы защиты.

#### *Описание*

Твердотельные оптоэлектронные реле с МОП-транзисторами на выходе являются альтернативой электромагнитным реле в цепях постоянного тока.

Прибор состоит из инфракрасного светодиода, который оптически связан с фототранзистором (реле типа 5П40.10П) или с фотоэлектрической матрицей диодов (реле типа 5П20.10П), которая управляет выходным элементом, представляющим собой мощный ДМОП-транзистор.

В твердотельных реле типа 5П40.10П требуется дополнительное питание по выходу для запитки фототранзистора ( $U_{пит.} \approx +9-15 \text{ В}$ ).

### ***Реле общего назначения***

Особенности:

- коммутирование нагрузок в цепях постоянного и переменного тока;
- совместимость с ТТЛ/ТТЛШ, КМОП;
- низкое сопротивление в открытом состоянии;
- высоковольтная монолитная схема:  $U_{из.} \geq 1500 \text{ В}$ ;
- диапазон рабочих температур  $(-45...+75) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Применение:

- коммутация нагрузок в цепях постоянного и переменного тока;
- работа в цепях переменного тока с резервированием постоянным током;
- импульсные источники питания;
- устройства автоматического регулирования и управления.

### ***Описание***

Твердотельные оптоэлектронные реле с МОП-транзисторами на выходе являются альтернативой электромеханическому и полупроводниковым реле на основе тиристоров.

Прибор состоит из инфракрасного светодиода, оптически связанного с матрицей фотодиодов, которые работают в фотоэлектрическом режиме и управляют выходным коммутирующим элементом. Последний представляет собой пару МОП-транзисторов, соединенных истоками.

При включении МОП-транзисторов в последовательную цепь получается линейный переключатель постоянного и переменного тока двунаправленного действия.

### ***Реверсивные реле***

Особенности:

- твердотельные оптоэлектронные реле с симисторами на выходе служат для замены электромагнитных реверсивных реле;
- прибор состоит из входных светодиодов, оптически связанных с оптосимисторами, которые управляют мощными коммутирующими элементами.

Применение:

- реле предназначены для управления асинхронными двигателями.

### ***Описание***

Реле обеспечивает включение, выключение, блокировку и реверс двигателей.

Реле имеют оптронную развязку управляющих сигналов от силовых цепей, а также вход сигнала блокировки включения реле.

Расшифровка условного обозначения отечественных реле производится в соответствии с ЕНСК.431162.001 ТУ:



### 4.3. Оценка целесообразности замены традиционной электромеханической коммутационной аппаратуры на бесконтактную

В предыдущем разделе 4.1 рассмотрены варианты построения коммутационных аппаратов низкого напряжения (до 1000 В) на основе электромеханических элементов и изделий силовой электроники, способных работать в силовых цепях постоянного и переменного тока с различными видами нагрузок. Все чаще при проектировании средств управления различным технологическим оборудованием доля бесконтактных элементов в электрических цепях постоянно возрастает и в некоторых случаях преобладает

над привычной электромеханической аппаратурой: реле, магнитными пускателями, контакторами, различного рода переключателями. При этом, по существу, проектировщику приходится рассматривать три варианта выполнения схемы коммутации нагрузки: на электромеханической аппаратуре, полностью на бесконтактных силовых элементах, либо на совмещенном решении с одновременным применением двух видов средств коммутации. Отметим основные факторы, влияющие на выбор проектировщика при рассмотрении вариантов коммутации в силовых и управляющих цепях технологической электроавтоматики:

- частота коммутации силовой или управляющей цепи;
- условия работы коммутационного аппарата (температура, влажность, запыленность);
- вид коммутируемой нагрузки (род тока, характер нагрузки);
- наличие технической возможности по улучшению условий коммутации;
- условия подключения и отключения нагрузки, особенно в случае тяжелого запуска или останова асинхронного электродвигателя;
- требования к массогабаритным характеристикам оборудования в целом;
- требования к надежности устройства;
- необходимость контроля и диагностики состояния основных компонентов электрической схемы;
- характер требований по защите нагрузки;
- установленный уровень электропотребления;
- профессиональная подготовка обслуживающего персонала;
- требования к ремонтнопригодности и безопасности при эксплуатации оборудования;
- ограничения по цене на изделие в целом.

Как отмечалось ранее, электромеханическая аппаратура наряду с бесконтактной также постоянно совершенствуется в направлении улучшения эксплуатационных параметров: число циклов коммутации, временные характеристики, надежность. Это обстоятельство, несмотря на высокие технические характеристики силовых электронных коммутаторов и изделий на их основе, заставляет проектировщика признавать ряд несомненных преимуществ, присутствующих в электромеханической аппаратуре, таких, как: наличие «сухих» контактов (полная гальваническая развязка) в силовых и вспомогательных цепях; возможность проведения частичного ре-

монта; простая диагностика силовых и управляющих цепей; ничтожное падение напряжения на замкнутых контактах; устойчивость к токам перегрузки, коротким замыканием и к воздействию перенапряжений; в ряде случаев, возможность более надежного удовлетворения требований по электробезопасности при техническом обслуживании оборудования.

В конечном итоге перед разработчиками и производителями стоит задача создания современных гибридных коммутационных аппаратов на основе оптимального сочетания имеющихся достоинств изделий силовой электроники и электромеханических устройств.

Частота коммутации в электрической цепи или количество циклов «включить/выключить» за единицу времени — определяющий фактор при выборе аппаратной базы для реализации включения (отключения) нагрузки. Например, для контактов сильноточных контакторов и пускателей существует выражение [25], устанавливающее износ массы контактного материала в зависимости от значения отключающего тока  $I_o$  и числа отключений  $N$ :

$$\Delta Q = 10^{-9} \cdot k_u \cdot N \cdot I_o^2 \text{ [кг]}, \quad (4.8)$$

где  $k_u$  — эмпирический коэффициент, выбирается в зависимости от материала контактов и значения вибрации.

То есть при определенных значениях отключаемого тока  $I_o$  и числа циклов «Включить-отключить»  $N$  возможна очень частая замена коммутационного(ых) аппарата(ов); как следствие, срок гарантийной работы  $T_g$  станет недопустимо малым в случае ввода в эксплуатацию нового изделия, либо уровень эксплуатационных расходов будет непомерно большим, если речь идет об уже работающем оборудовании:

$$\frac{Ng}{m} = T_g \leq t_p, \quad (4.9)$$

где  $m$  — частота циклов «включений-отключений» в единицу времени;  $Ng$  — допустимое число циклов коммутации при номинальной нагрузке.

Если не учитывать других вышеприведенных эксплуатационных факторов, то исходя из условий коммутации вопрос о целесообразности использования бесконтактного коммутационного аппарата должен рассматриваться в случае отсутствия возможности установки гарантийного срока на все изделие (оборудование), равного одному году. Конечно, такая установка не абсолютная, если брать во



внимание стоимость электромеханического и бесконтактного аппаратов, уровень издержек при замене, расходы на последующее эксплуатационное обслуживание. Очевиден выбор бесконтактного коммутационного аппарата, например твердотельного реле взамен электромагнитного промежуточного, даже закрытого реле в случае наличия влажности, запыленности, сочетающихся с высокой температурой (до 50—60 °С) внешней среды. Известны случаи решающего влияния этих факторов в сторону выбора именно бесконтактного коммутационного аппарата, особенно если есть хотя бы потенциальная угроза возникновения взрывоопасной среды.

В зависимости от вида коммутируемой нагрузки проектировщиком может быть выбран бесконтактный аппарат на базе уже ранее упомянутых распространенных силовых электронных приборов:

- тиристоров, оптотиристоров, симисторов, запираемых тиристоров (SCR, GTO, IGCT, GCT) или силовых модулей на их основе;
- полевых транзисторов с изолированным затвором MOSFET либо интегрированных силовых приборов на их основе;
- биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT либо IPM-модулей на базе структуры IGBT;
- новых структур с плотностями токов, приближающихся к тиристорным (IEGT, IGTT).

По мнению большинства специалистов, наиболее перспективными изделиями силовой электроники на сегодняшний день являются MOSFET, IGBT, IGCT в дискретном, модульном и интегральном исполнении для широкого диапазона мощностей. Например, в случае коммутации активно-индуктивной нагрузки в цепи постоянного тока  $I \leq 50$  А с напряжением, не превышающим 500 В, наиболее предпочтительным ключевым силовым элементом является полевой транзистор MOSFET, имеющий высокую частоту коммутации, низкие статические и динамические потери, малую мощность управления, высокую стойкость к перегрузкам. В отличие от электромагнитных элементов (реле, пускателей, контакторов) легко решается проблема связи маломощных управляющих выходов большинства микроконтроллеров и однокристалльных микроЭВМ с силовыми элементами схемы коммутации, не требуется наличия искрогасящих цепей. При коммутации активной нагрузки в цепи переменного тока промышленной частоты нередко наиболее весомыми аргументами при замене электромеханического коммутационного аппарата на бесконтактный пере-

ключатель являются частота коммутации и массогабаритные показатели проектируемого изделия. Например, схема управления нагревательными элементами (рис. 4.18, а, б), осуществляющая двухпозиционное регулирование температуры с гистерезисом  $\pm D$  относительно заданной температуры  $T_{уст}$ , может выдавать сигнал на исполнительное устройство, в качестве которого может быть магнитный пускатель либо бесконтактный ключевой элемент (тиристор, симистор или силовой модуль на их основе).

Вполне очевидно, что с уменьшением гистерезиса  $\pm D$  достигается снижение колебания температуры, но при этом увеличивается число срабатываний исполнительного устройства VS или МП за установленный период времени.

Одним из направлений совершенствования современных коммутационных аппаратов (электромеханических, бесконтактных, гибридных) является расширение возможностей для улучшения условий коммутации, в частности обеспечение эффективного токоограничения в переходных процессах. При использовании электромеханических аппаратов наиболее распространены способы,

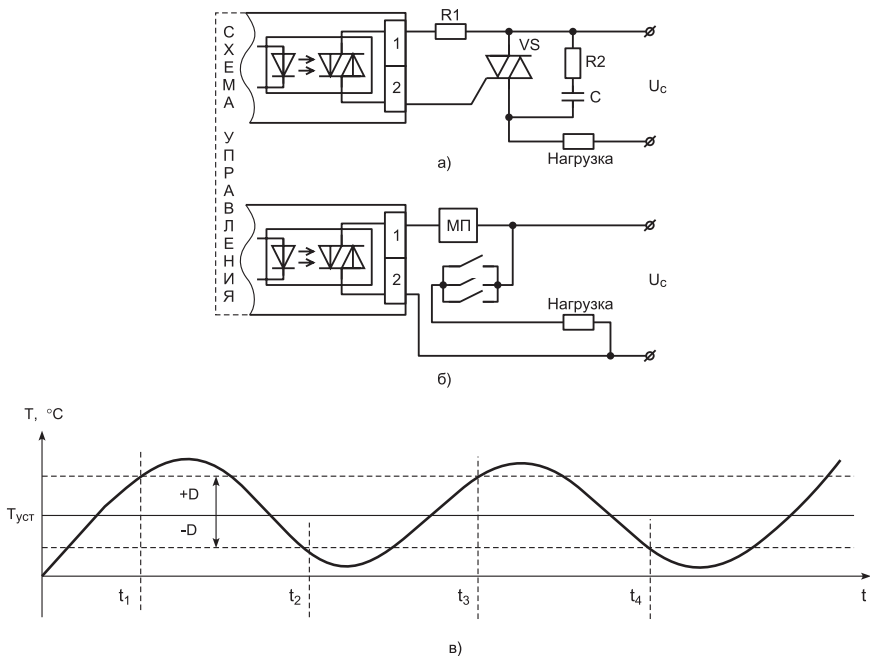


Рис. 4.18

основанные на подключении нагрузки через силовые резисторы либо реакторы с последующим их дешунтированием. В случае применения, например, симисторного коммутатора часто реализуется режим подключения нагрузки в момент перехода сетевого напряжения через ноль (рис. 4.19), что в значительной степени улучшает условия коммутации, особенно активно-индуктивных нагрузок.

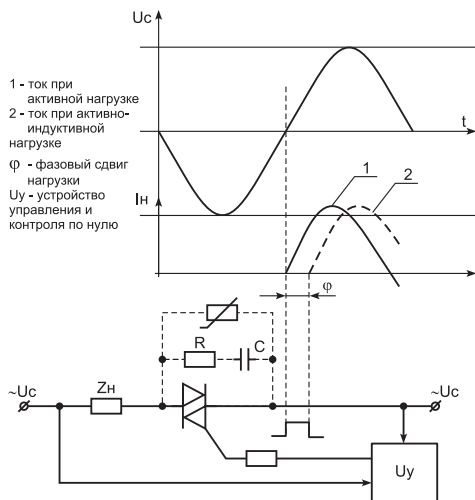


Рис. 4.19

Таким же образом может быть подключена и трехфазная активно-индуктивная нагрузка, например, асинхронный трехфазный электродвигатель подключается к силовой сети  $\sim 380$  В, 50 Гц (рис. 4.20) через симисторный силовой модуль, который может осуществлять не только контроль перехода каждой фазы питающего напряжения через ноль, но и реализовывать «мягкий» режим запуска через снижение его значения в достаточно широких пределах (параметрическое регулирование) через устройство импульсно-фазового управления (СИФУ).

При постоянном моменте на валу АД и неизменной частоте сети получение искусственных характеристик обусловлено снижением напряжения на его зажимах, а следовательно, имеются широкие возможности для ограничения пускового тока. Очевидно, что такое подключение АД может быть оправдано при наличии тяжелых условий при начальном запуске. Если начальный запуск производится при незначительном моменте на валу  $M_p \leq M_{ном}$  и

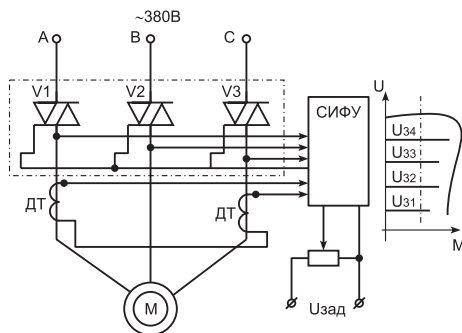


Рис. 4.20

число циклов «включить/выключить» в пределах, установленных заводом-изготовителем, то нет оснований отказываться от традиционного магнитного пускателя.

Часто при проектировании силовых схем коммутации и схем управления к ним на первом плане — требования к массогабаритным характеристикам и надежности.

На сегодняшний день практически не существует конкретных инженерных методик, позволяющих совместить порой противоречивые требования по снижению габаритов разрабатываемого устройства и повышению его надежности. Например, современные магнитные пускатели распространенной серии ПМ12 на токи от 10 до 160 А, у которых при несомненном росте их качества и надежности массогабаритные характеристики практически не изменились по сравнению с ранее применяемыми сериями ПМА, ПАЕ. Последнее обстоятельство далеко не всегда позволяет создать компактное и надежное устройство электроавтоматики, особенно если реальные токи подключаемых нагрузок «падают» между установленных заводом-изготовителем рядом номинальных токов электромеханических коммутационных аппаратов (6 А, 10 А, 16 А, 25 А, 40 А, 63 А, 80 А, 100 А, 160 А, 200 А, 250 А и т. д.)

Использование бесконтактных коммутаторов особенно мощных силовых модулей в корпусах с беспотенциальным теплоотводом АДД-А-РАК позволяет найти весьма удачные конструкторские решения, в равной степени отличающиеся компактностью и надежностью. В общем случае, как известно, понятие «надежность», помимо безотказности, включает такие свойства изделия, как долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость. Следует заметить, что количественную оценку указанных свойств дают показате-

тели надежности, отличающиеся от других показателей устройства тем, что все они детерминированные (неслучайные) характеристики случайных величин, возникающих во время эксплуатации. Из теории надежности известно, что время безотказной работы устройства в целом определяется как средняя величина между временем безотказной работы входящих в него основных элементов, определяющих в конечном итоге его «работоспособность»:

$$Tch = \frac{(t_1 + t_2 + \dots + t_i + \dots + t_n)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}.$$

То есть однозначно: отказы изделия зависят от времени его эксплуатации, а вероятность отказа ( $\lambda$ ) характеризуется интенсивностью отказов и выражается в виде зависимости  $\lambda(t)$  (рис. 4.21).

Адаптационный период  $t_A$  характеризуется «приработкой» установленных компонентов в изделии, особенно это касается электромеханической электроаппаратуры, где есть движущиеся элементы: магнитные пускатели, реле, электромагниты, концевые выключатели, электрозашелки и т. д. Период  $t_n$  — время работы отлаженной схемы, рабочий период эксплуатации, а период  $t_{отк}$  примечателен большим количеством отказов, предшествует периоду прямой замены установленной в изделии электроаппаратуры. Вполне очевидно, что при верных теплофизических расчетах и грамотной компоновке бесконтактных силовых модулей адаптационный период практически не существует и время нормальной эксплуатации наступает сразу после проведения монтажа и пуско-наладочных работ. Это важно на объектах, удаленных от ремонтной базы, либо труднодоступных для проведения текущего ремонта. Как правило, в электрических схемах, содержащих значительное число (свыше 5) элементов силовой коммутации, испо-

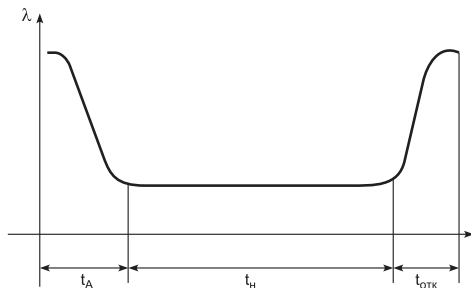


Рис. 4.21

лзуются различные схмотехнические решения, позволяющие контролировать их состояние визуально либо с помощью некоторых технических средств. Контроль состояния электромеханической электроаппаратуры прост и не вызывает никаких затруднений при его реализации, если под контролем и диагностикой понимается оперативное определение рабочего положения и работоспособности. Контроль состояния силовых элементов электроники (диодов, тиристоров, симисторов, транзисторов MOSFET, IGBT и т. д.) предполагает достаточно сложные в реализации схмотехнические решения, и их установка должна иметь очень конкретное обоснование. Исключением из этого правила может служить случай применения интеллектуальных силовых модулей (IPM-модулей), в которых, помимо функций защиты, сопряжения со средствами управления, уже реализована функция диагностики, позволяющая упрощенно смотреть на реализацию схемы контроля состояния и работоспособности. Понятно, что только очень жесткие требования со стороны заказчика по контролю и диагностике элементов схемы в совокупности с ранее рассмотренными положениями могут предопределить решение проектировщика при выборе вида элементной базы.

Все чаще в технических заданиях на разработку и проектирование технических средств управления технологическим оборудованием присутствует требование на ограничение уровня электропотребления на собственные нужды (питание системы электроавтоматики, сигнализации, вентиляции, схемы термостатирования и т. д.) и на установку в целом. Поэтому вопрос определения целесообразности использования бесконтактной коммутационной аппаратуры вместо электромеханической в ряде случаев рассматривается с позиции возможности снижения реального электропотребления. В качестве примера приведем фрагмент функциональной схемы управления электродвигателями АИР63В4 и электромагнитами МИС3100 некоторой разветвленной поточно-транспортной системы (ПТС), в которой в качестве выходных коммутационных элементов панели электроавтоматики (ПЭА) использовались электромагнитные пускатели ПМ12.010.200 в количестве 38 шт. (ПМ1–ПМ38) и промежуточные силовые реле РПЛ в количестве 32 шт. (К1–К32) (рис. 4.22, а).

На рис. 4.22, б показан этот же фрагмент функциональной схемы выходного устройства щита управления с использованием твердотельных трехфазных реле 5П36.30ТМ1-10-8 для коммутации ста-

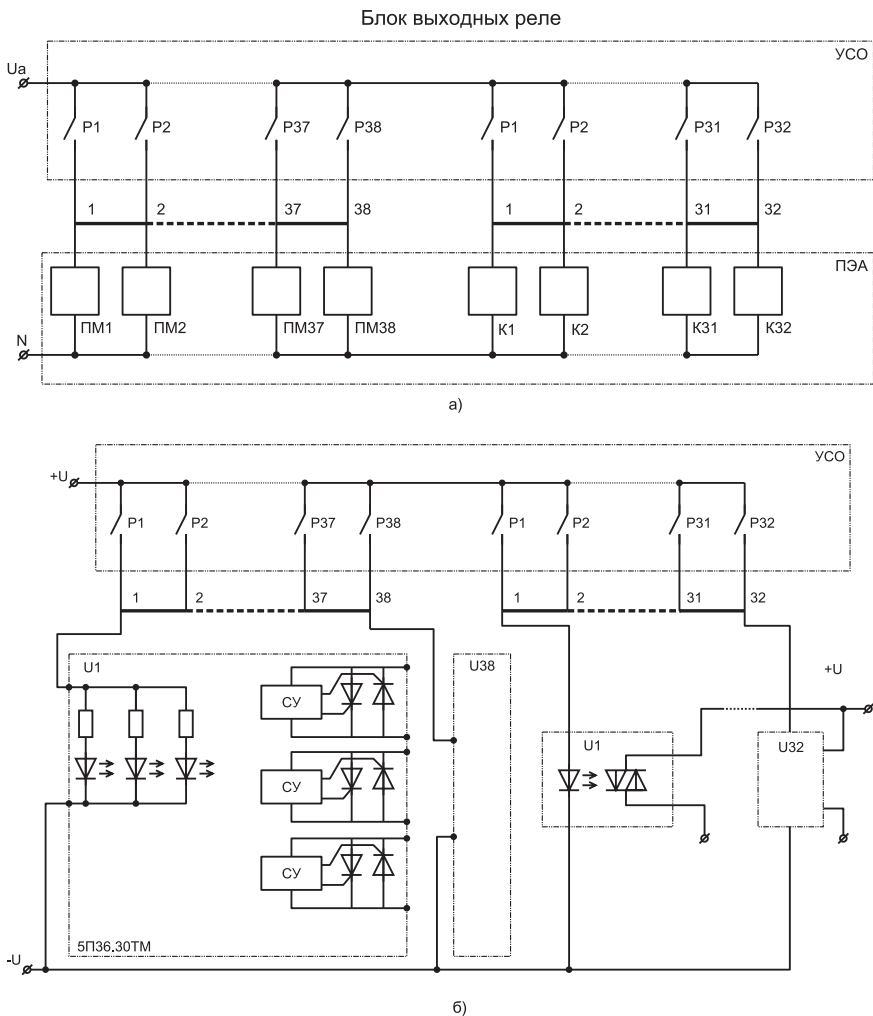


Рис. 4.22

торных обмоток АД и маломощных однофазных твердотельных реле МОС3051 с симисторами ТС112-16-12 для коммутации электромагнитов. В первом случае при некоторых циклах работы ПТС только катушки коммутационных аппаратов электроавтоматики потребляют при включении около 3 кВт мощности и в режиме удержания 0,6–0,7 Ква. При использовании бесконтактных коммутирующих аппаратов (рис. 4.22, б) мощность электропотребления

на обеспечение работы электроавтоматики в части управления коммутацией нагрузок не превысит нескольких ватт. Кроме того, при использовании бесконтактных коммутаторов с контролем перехода фазы коммутируемого напряжения через «0» несколько снизится потребление электроэнергии в пусковых режимах исполнительных АД. На фоне рассмотренных факторов, так или иначе определяющих выбор вида коммутационного аппарата, с учетом требований их ремонтнопригодности, безопасности обслуживания, ограничения в цене данная проблема, по существу, является задачей оптимизации при наличии ограничений, цель решения которой — рациональное построение средств управления технологическим оборудованием с использованием всего арсенала современных средств коммутации в цепях постоянного и переменного тока. Например, для минимизации уровня электропотребления проектируемого устройства в качестве инструмента для решения такой задачи может быть использован комплексный метод Бокса [2], послуживший основой для разработки специальной программно-математической модели оптимизации РММ «OPTIMDRIVE». Решаемая задача состоит в оптимизации выбранной функции (уровня электропотребления)  $F(A) = f(a, a, \dots, a)$ , где  $A$  определяется явными ограничениями: стоимостью, габаритно установочными размерами, наработкой на отказ, минимальным сроком эксплуатации и неявными ограничениями: степенью контроля и диагностики, требованиями к профессиональной подготовке обслуживающего персонала, ремонтнопригодности и безопасности обслуживания

$$\begin{aligned} e < a < u \text{ при } j = 1, 2, \dots, n, \\ g(A) < b \text{ при } i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (4.11)$$

где  $n$  и  $m$  число явных и неявных ограничений соответственно.

Если предположить, что точка  $A$  предварительно задана (уровень электропотребления выбран при удовлетворении всем указанным ограничениям), то для всех остальных точек, также удовлетворяющим этим ограничениям, необходимо вычислить значение целевой функции — уровня электропотребления. Программа определенным образом упорядочивает набор точек, соответствующих определенным значениям целевой функции и затем выполняет итерационную процедуру, в рамках которой производится поиск минимума целевой функции (уровня электропотребления) при наивыгоднейших сочетаниях параметров, характеризующих заданные ограничения.



## **Глава 5**

# **Специальные средства автоматизации, контроля и управления уровнем энергопотребления в промышленном электрооборудовании**

### **5.1. Программируемые коммутаторы нагрузки, технологические контроллеры и терморегуляторы**

В настоящее время предприятиями электротехнической и электронной промышленности России, СНГ, ФРГ, США, Швеции, Франции, Японии разработан целый ряд программируемых устройств, позволяющих коренным образом изменить сложившиеся подходы к проектированию и комплектованию устройств электроавтоматики. При этом достигаются: повышение надежности, снижение материалоемкости, расширение функциональных возможностей управляющих технических средств, снижение эксплуатационных затрат и улучшение эргономических свойств. В общем случае весь комплекс интеллектуальных технических средств контроля и управления технологическим оборудованием можно представить пятью группами функционально выраженных устройств:

- программируемые коммутаторы нагрузки;
- программируемые технологические контроллеры;
- программируемые терминалы;
- промышленные компьютерные системы;
- цифровые регуляторы технологических параметров.

По ряду общеизвестных причин, предприятия России, непосредственно занимающиеся производством средств управления технологическим оборудованием (особенно в условиях единичного и мелкосерийного производства), неохотно переходят на использование новейшей элементной базы. Например, унифицированные шкафы управления асинхронными электродвигателями серий РУСМ, Я 5000 производятся до сегодняшнего дня на основе использования релейно-контакторных элементов электроавтоматики, хотя существует множество вариантов их усовершенствования в

случае использования новейших элементов автоматического управления. Аналогичная ситуация в сфере производства шкафов станций управления металлорежущих станков, насосных, компрессорных и вентиляционных установок. В качестве примера, реализация традиционной системы автоматики поддержания микроклимата в закрытом помещении, содержащей два электродвигателя привода притока теплого воздуха, два электродвигателя привода вытяжной вентиляции и несколько датчиков зонного контроля температуры, помимо электронных регуляторов, требует использования около двух десятков электромагнитных пускателей и реле, не считая вспомогательных электроэлементов защиты, сигнализации и электромонтажа. При этом шкаф управления представляется довольно громоздкой конструкцией с внушительными размерами.

Исходя из сложившихся на сегодняшний день цен, стоимость такого шкафа управления колеблется в пределах от 16 до 30 тыс. руб. в зависимости от мощности электродвигателей. При этом уровень эксплуатационных затрат на обслуживание приведенного варианта шкафа управления находится в прямой зависимости от количества и надежности электромагнитных элементов, осуществляющих непосредственную коммутацию управляющих и силовых цепей подключенного оборудования.

В состав эксплуатационных расходов неизбежно включаются следующие составляющие:

- ремонт, связанный с заменой электромеханической электроаппаратуры, исчерпавшей ресурс по количеству циклов «включения/выключения»;
- значительное электропотребление втягивающих катушек электромагнитных элементов автоматики;
- затраты времени на регулярную протяжку всех болтовых соединений шкафа управления;
- при наличии большого количества электромагнитных элементов — значительные затраты на поиск неисправностей, особенно связанных с отсутствием контакта;
- большая трудоемкость при перекоммутации силовых и управляющих цепей в случае изменения в технологическом процессе;
- значительные потери при запусках приводных асинхронных электродвигателей.

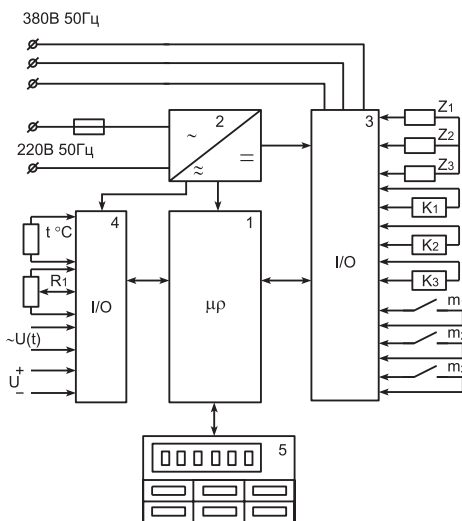
Применение интеллектуальных (программируемых) средств контроля и управления технологическим оборудованием позволя-

ет значительно снизить количество релейно-контакторных элементов электроавтоматики, упростить монтаж панелей управления и практически избавиться от некоторых статей эксплуатационных расходов.



Рис. 5.1

В основе построения современных средств управления технологическим оборудованием лежит использование интеллектуальных (программируемых) устройств в сочетании с элементами силовой электроники и релейно-контакторными электрическими аппаратами (там, где по ряду условий это необходимо). На рис. 5.1 приведен общий вид варианта универсального модуля электроавтоматики УПМК-1 (программируемого коммутатора нагрузки), на рис. 5.2 — структурная схема, табл. 39 Приложе-



- 1 - функционально-программируемый контроллер;
- 2 - источник технологических напряжений;
- 3 - блок силовой коммутации нагрузок ( $z_1 - z_3$ ;  $k_1 - k_3$ ) и контроля состояния элементов автоматики ( $m_1 - m_3$ );
- 4 - модуль измерительный (АЦП);
- 5 - панель управления и индикации.

Рис. 5.2

ния содержит основные технические характеристики устройства в базовом исполнении.

Конфигурация и набор необходимых функций достигаются за счет:

- количества и мощности силовых однофазных и трехфазных выходных ключей коммутации тока;
- количества входов для контроля состояния входных дискретных сигналов из схемы автоматике определенного числа измерительных входов АЦП;
- встроенного программируемого контроллера AT89 S51 (AT89 S52, AT89 S53).

В этом случае УПМК-1 является универсальным техническим средством промышленной автоматизации, способным выполнять следующие функции:

- непосредственную многоканальную коммутацию нагрузок силовых цепей постоянного и переменного тока по заданному алгоритму либо от внешних кнопок «Пуск» и «Стоп»;
- осуществление «мягкого» запуска асинхронных электродвигателей;
- измерение и индикацию аналоговых сигналов с датчиков технологического контроля и защиты;
- полное выполнение функций электромеханических и электронных реле времени в многоканальном режиме;
- ввод выдержек времени с индикацией задания;
- контроль состояния объектов управления;
- контроль чередования фаз трехфазного питающего напряжения;
- реализацию защит: максимальной токовой, времятоковой, от обрыва и перекоса фаз;
- внутреннюю самодиагностику.

Компактность, небольшие габариты и вес, соизмеримые с закрытым исполнением магнитного пускателя с номинальным током  $I_{ном} = 100$  А достигаются за счет применения современной элементной базы:

- бесконтактных оптоэлектронных реле (твердотельных реле);
- гибридных силовых тиристорных коммутаторов;
- силовых транзисторных модулей со структурами MOSFET и IGBT;
- оптотириستоров.

В базовом исполнении УПМК-1 собран в виде герметичного корпуса (IP 54), внутри которого размещены:

- импульсный источник питания с аккумулятором;
- плата микроконтроллера;
- плата контроля и индикации;
- блок силовой коммутации нагрузок;
- блок выходных разъемов.

Возможные сферы применения:

- устройство автоматического включения-выключения по заданной программе внешнего освещения поселков, территорий предприятий, небольших городов, не имеющих централизованных средств управления по каналам телемеханики;
- устройство технологической автоматики при использовании электропривода переменного тока с частотным регулированием.

Вполне очевидно, что УПМК-1 как техническое средство управления технологическим оборудованием позволяет:

- обеспечить режимы оптимального электропотребления за счет рациональной организации функционирования массовых потребителей электроэнергии;
- снизить затраты электроэнергии на собственные нужды;
- сократить уровень материальных затрат при построении устройств электроавтоматики;
- достичь практически неограниченного ресурса на количество циклов коммутации нагрузки;
- легко перестраивать логику работы схемы управления.

Трудно найти ту область промышленного производства и коммунального хозяйства, где не используются программируемые технологические контроллеры. В данном случае речь идет о функционально и конструктивно законченных устройствах, которые могут использоваться в структуре управления технологическим оборудованием как автономные средства автоматизации.

На сегодняшний день в России наиболее широко применяются около 60 типов микроконтроллеров зарубежного и отечественного производств, а по сути, мало чем отличающихся друг от друга. В табл. 40 Приложения приведен перечень основных параметров программируемых контроллеров, в наиболее полной мере характеризующих их возможности, а на рис. 5.3 — обобщенная структурная схема, отражающая состав и взаимодействие их основных эле-

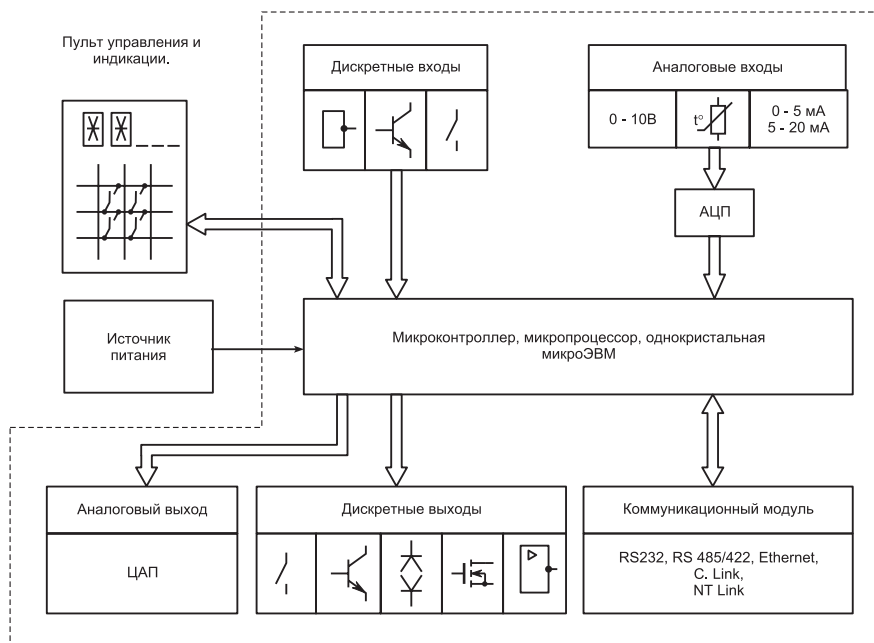


Рис. 5.3

ментов. При этом на сегодняшний день используются два типа программируемых контроллеров: одноплатные встраиваемые микроконтроллеры и логические контроллеры.

Одноплатные микроконтроллеры применяются для решения широкого круга задач в системах локальной автоматизации, как правило, не имеют источника питания и встроенной системы программирования. В этих устройствах программирование осуществляется путем установки микросхемы программируемого запоминающего устройства с заранее отлаженной программой с помощью специальных инструментальных средств разработки и отладки программного обеспечения. Кроме этого, одноплатные микроконтроллеры разрабатываются и изготавливаются единичными образцами или очень малыми сериями с определенной конфигурацией для решения конкретных задач, под конкретные приборы и средства управления. В настоящее время практически нет серийно выпускаемых одноплатных микроконтроллеров, в отличие от программируемых логических контроллеров (ПЛК), представленных на российском рынке не одним десятком моделей зарубежных и

отечественных производителей. ПЛК были созданы для замены релейно-контактных схем, собранных на дискретных компонентах: реле, счетчиках, таймерах, логических элементах. Принципиальное отличие ПЛК от таких схем в том, что все его функции реализуются программным путем так, что на одном контроллере можно реализовать схему, эквивалентную нескольким тысячам логических элементов, способную обрабатывать дискретные и аналоговые сигналы, управлять клапанами, нагревателями, шаговыми двигателями, сервоприводами, преобразователями частоты, осуществлять ПИД-регулирование. ПЛК отличаются тремя особенностями: многовариантностью методов разработки и отладки программного обеспечения, возможностью расширения аппаратных ресурсов по вводу/выводу и наличием развитой системы коммуникаций с внешними устройствами.

К наиболее распространенным методам разработки и отладки программного обеспечения следует отнести:

- программирование с клавиатуры встроенного или выносного пульта (при наличии дисплея) с использованием штатных встроенных функций. Процесс программирования сводится к программному соединению требуемых функций и заданию параметров настройки. Для выполнения всех этих операций используется система встроенных меню. Как правило, все встроенные функции хранятся в памяти ПЛК в виде двух библиотек: библиотека GF содержит набор функций, выполняющих все основные логические операции; библиотека SF объединяет специальные функции: триггеры, счетчики, таймеры, импульсные реле, компараторы, генераторы импульсов и т. д. Программирование логических контроллеров возможно на пяти языках стандарта IEC-1131.3, но все они, в конечном итоге, сводятся к программной реализации набора схем и функций, причем для тех, кто привык к релейно-контактным схемам, возможна работа с языком, собранным на их основе (Ladder Diagram). Те, кому гораздо понятней и удобней электрические схемы, могут воспользоваться языком функциональных блок-диаграмм (Functional Block Diagram). Кроме этого, возможно сочетание всех языков;
- разработку и отладку программного обеспечения, производимую на компьютере с помощью специальных пакетов программирования, производящих эмуляцию функций

ПЛК, документирование программы и загрузку программы в память логического модуля контроллера через специальное устройство. Системы программирования обычно создаются и работают в распространенных средах, таких, как Windows 95/98/2000/NT/ME/2000, Linux, MAC OS-X, используемых для разработки управляющих программ для ПЛК «SIMATIC» фирмы «SIEMENS». Например, для программирования ПЛК концерна «OMRON» используется универсальный пакет программирования CX-Programmer, позволяющий эмулировать, редактировать и отлаживать программу, и конфигурировать контроллеры с периферийным оборудованием;

- для ряда устаревших логических контроллеров, также и для одноплатных микроконтроллеров, еще применяются специальные пакеты, такие, как Микрос-1816, позволяющие получить с помощью программно-логической модели загрузочный файл программ, который с помощью программатора заносится в БИС РПЗУ, затем устанавливаемую на плату логического модуля. В этом случае программирование ведется на языке ассемблера, используемого в контроллере микропроцессора или микроЭВМ.

Рассмотренный программируемый коммутатор нагрузки, по сути, является прообразом еще более совершенных функционально аналогичных устройств — программируемых реле. В настоящее время в системы промышленной автоматизации внедряются программируемые реле только зарубежного производства, хотя уже некоторые предприятия, помимо рассмотренного УПМК-1, начинают создавать специализированные логические модули электроавтоматики.

На основе импортной и отечественной элементной базы, по сути, программируемые реле — это компактные универсальные контроллеры для реализации целого ряда задач управления технологическим оборудованием, где необходимо гибко решать проблемы автоматизации. В настоящее время на российском рынке электротехнических изделий предлагаются и широко используются в основном программируемые реле (П.Р) зарубежного производства:

- серии  $\alpha$ , фирма MITSUBISHI (Япония);
- ZEN, фирма OMPON (Япония);
- LOGO, фирма SIEMENS (Германия);
- EASY, фирма Moeller (Германия).



Прежде чем подробнее рассматривать каждое из этих изделий, отметим общие конструктивные и схемотехнические особенности, присущие всем этим устройствам:

- наличие встроенного источника питания на несколько входных напряжений переменного и постоянного тока (24VDC, 48VDC, 100÷240 VAC);
- возможность расширения количества дискретных входов/выходов;
- выполнение монтажа основного модуля и модулей расширения на DIN-рейку;
- наличие встроенной энергозависимой памяти;
- возможность программирования с использованием встроенных жидкокристаллического дисплея и кнопок программирования;
- близкие габаритные размеры, что позволяет практически без труда заменить любой из указанных четырех типов другим.

В качестве примера на рис. 5.4 показан внешний вид ПР  $\alpha$ -серии (MITSUBISHI), к основным эксплуатационным характеристикам которого следует отнести:

- число встроенных функций, максимальное — 64;
- объем памяти EEPROM — 1,5 кбайт;
- формат ЖК дисплея — 4 строки  $\times$  10 символов;
- число клавиш управления и программирования — 8;
- число аналоговых входов 0—10 VDC — 8;
- разрешающая способность аналогового входа — 8 бит;
- максимальная нагрузка релейного выхода — 8 А;
- габаритные размеры в мм — 71,2 $\times$ 90 $\times$ 55.

В зависимости от типоисполнения реле (7 типоисполнений), количество и сочетание входов/выходов может быть различным (максимальная конфигурация 12/8).

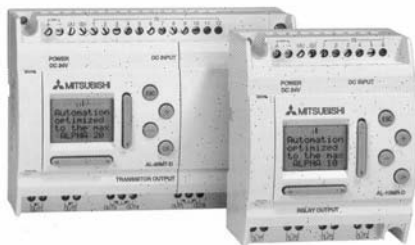


Рис. 5.4

На рис. 5.5 приведена структурная схема ПР AL-20MR — D при питании от входного напряжения постоянного тока = 24 В и включении в схему управления приводом буровой установки.

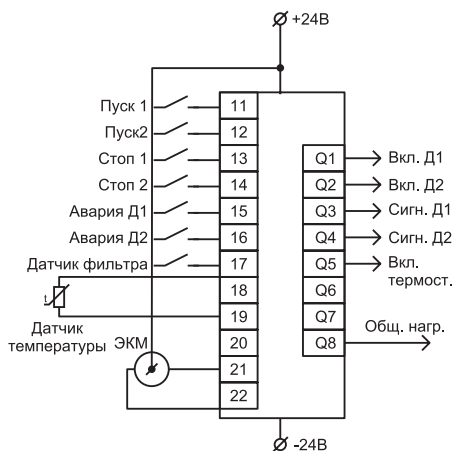


Рис. 5.5

В отличие от рассмотренного ПР, в EASY 800 значительно увеличен объем отображаемой текстовой информации (до 32 текстовых форм, каждая из которых может содержать до 64-х символов); имеется встроенный интерфейс для объединения в сеть нескольких устройств EASY (до 8); кроме того, к любому модулю EASY 800 можно подключить (по интерфейсу EASY-LINK) модуль локального расширения, что позволяет использовать в одном управляющем реле от 12 до 300 точек ввода/вывода.

Весьма отличительной особенностью ПР серии EASY является наличие стандартного аналогового выхода (0—10 VDC), что делает данное устройство приспособленным к построению комплектных частотно-регулируемых электроприводов.

Во всех моделях ПР серии EASY 800 имеется 4 аналоговых входа (0—40 VDC), количество входов/выходов определяется базовым комплектом и может достигать сочетания 12/6.

Серия ПР фирмы OMPON (ZEN) мало чем отличается от рассмотренной серии  $\alpha$ , хотя следует отметить ряд существенных особенностей:

- существование 2 видов ПР (LCD-тип с жидкокристаллическим дисплеем и LED-тип без дисплея);

- возможность аппаратного наращивания до 3 блоков расширения (до 34 точек ввода/вывода);
- наличие вариантов по входному напряжению как базового блока, так и блока расширения.

Как и предыдущее ПР, алгоритм функционирования модулей LOGO (SIEMENS) задается без использования специального дополнительного программного обеспечения непосредственно с их клавиатуры. Модули LOGO характеризуются следующими основными показателями:

- 8 дискретных входов, 4 дискретных выхода;
- 30 встроенных функций, объединенных в библиотеки, логических (GF) и специальных функций (SF);
- встроенный жидкокристаллический дисплей и клавиатура;
- интерфейс для установки модуля памяти или подключения кабеля ПР при программировании с компьютера.

Различные модели модулей оснащены транзисторными или релейными выходами. Транзисторные выходы способны коммутировать токи до 0,3 А при  $U = 24$  В постоянного тока и оснащены электронной защитой от короткого замыкания. Релейные выходы способны коммутировать токи до 10 А активной нагрузки или до 3 А при подключении индуктивной нагрузки в целях с напряжением = 12/24 В, ~24 В или  $\sim / = 115/240$  В.

Рекомендуемые области применения рассмотренных ПР следующие:

- автоматическое управление наружным и внутренним освещением;
- управление коммутаций нагрузок (АВР, АПВ и т. д.);
- управление технологическим оборудованием (насосами, точными системами, компрессорами, прессами и т. д.);
- системы отопления;
- системы управления дорожным движением;
- конвейерные системы;
- подъемно-транспортные механизмы.

Сравнительно небольшой опыт использования ПР показал их несомненное преимущество при создании нестандартных шкафов электроавтоматики, а также неплохие возможности при реализации алгоритмов оптимального электропотребления в технологическом оборудовании многих отраслей промышленности.

Программируемые логические контроллеры фирмы SIEMENS представлены несколькими семействами и являются важнейшим

звеном в структуре технических средств, объединенных единой концепцией, получившей наименование Total Integrated Automation — комплексная интегрированная автоматизация. Контроллеры отвечают требованиям международных стандартов VDE, VL, CSA и FM. Наиболее распространены и известны российским специалистам семейства SIMATIC S7-200, SIMATIC S7-300, SIMATIC S7-400, отличающиеся техническими возможностями и, соответственно, назначением.

В табл. 40 Приложения приведены некоторые обобщенные технические характеристики, в наибольшей степени отражающие возможности и конфигурацию программируемых контроллеров, что необходимо при выборе аппаратных средств на стадии разработки систем управления технологическим оборудованием.

Для реализации автоматического управления температурными режимами в системах кондиционирования воздуха и вентиляции, отопления, в технологическом и холодильном оборудовании промышленностью выпускается серия терморегуляторов. К изделиям российского производства, наиболее распространенным в технологическом оборудовании, следует отнести:

- *датчик-реле T419-M1*. Предназначен для регулирования, сигнализации и температурной защиты в подвижных и стационарных установках холодильной техники, отопления, вентиляции. Общие пределы регулирования от  $-50$  до  $+175$  °С (9 модификаций). Зона возврата, регулируемая от 1 до 10 °С. Основная погрешность —  $\pm 1$ ;  $\pm 2$  °С. Питание — 220 В, 50 Гц переменного тока; 12—24 В и 45—75 В постоянного тока. Потребляемая мощность — 3 В·А. Дистанционность — до 300 м. Габариты — 105×130×65 мм. Масса — 0,6 кг. Защита корпуса — IP44. Применяется с датчиком ТСМ 50М, который входит в комплект поставки;
- *датчик-реле T419-2М*. Предназначен для регулирования, сигнализации и температурной защиты в подвижных и стационарных установках холодильной техники, отопления, вентиляции. Общие пределы регулирования — от  $-50$  до  $+500$  °С (24 модификаций). Зона возврата, регулируемая от 1 до 10 °С. Основная погрешность —  $\pm 1$ ;  $\pm 2$  °С. Питание — 110, 220 В, 50 Гц переменного тока; 12—24 В и 45—75 В постоянного тока. Потребляемая мощность — 3 В·А. Дистанционность — до 300 м. Габариты — 105×130×65 мм. Масса — 0,55 кг. Защита

корпуса — IP44. Применяется с датчиком ТСМ 50М или ТСП 100П;

- *датчик-реле Т419-2М*. Предназначен для защиты фреономаслостойких электродвигателей, герметичных бессальниковых компрессоров от перегрева в аварийных ситуациях. Применяется в комплекте с датчиками температуры терморезисторами типа СТ-14-1а или СТ-14-1б, встроенными в обмотки электродвигателя. Порог срабатывания ТРЭ-201 определяется возрастанием сопротивления датчика температуры до 2200 Ом, что позволяет использовать его в любых других системах автоматического регулирования. Имеет фиксированные уставки 105 или 130 °С (в зависимости от типа датчика температуры). Основная погрешность  $\pm 1$  °С. Питание — 24 В постоянного тока или 220 В, 50 (60) Гц переменного тока. Потребляемая мощность — 4 В·А. Габариты — 87×114×65 мм. Масса — 0,5 кг. Защита корпуса — IP65.
- *датчик-реле Т410-М1*. Для сигнализации и защиты по температуре в системах смазки компрессоров. Имеют 12 модификаций. Уставки — фиксированные: 61, 165 °С (перегрев) и 66, 175 °С — (аварийная сигнализация). Питание 220 В, 50 (60) Гц. Потребляемая мощность — 3,5 В·А. Дистанционность — до 200 м. Габариты — 109×44×103 мм. Масса — 0,4 кг. Защита корпуса — IP20. Применяется с одним датчиком: ТСМ 50М; 100М; ТСП 100П. Заменяет Т410;
- *датчик-реле Т421*. Предназначен для промышленных стиральных машин, машин химчистки. Имеет 5 цепей управления по температуре в пределах от 20 до 120 °С. Зона возврата нерегулируемая,  $(5\pm 3)$  °С. Питание — 220 В, 50 (60) Гц. Потребляемая мощность — 5 В·А. Дистанционность — до 5 м. Габариты — 105×124×65 мм. Масса — 0,75 кг. Защита корпуса — IP44. Применяется с датчиком ТСМ 50М, который входит в комплект поставки;
- *регулятор ТРЭ106 «ТЭРМ»*. Предназначен для автоматизации холодильных установок, электронагревателей для животноводства, бытовой техники (инкубаторов, бытовых контейнеров). Комплектуется в зависимости от заказа термопреобразователями типа ТМ (с головкой под ключ — S27, M20×1,5; с головкой под кабельный ввод —  $\varnothing$  ввода 14 мм); термометром ТМ273 — для инкубаторов. Общие пределы регулирования от  $-50$  до  $+150$  °С (7 модификаций). Зона возврата регу-

лируемая от 0,5 до 10 °С. Питание — 220 В, 50 (60) Гц. Потребляемая мощность — 2,5 В·А. Дистанционность — до 50 м. Габариты: прибора — 86×43×63 мм, термометра ТМ273 — 4×8,5×0,5 мм, погружной части термопреобразователя сопротивления ТМ — 120, 320 мм. Масса — 0,26 кг. Защита корпуса — IP20;

- *регулятор серии ТМ*. Предназначен для автоматизации холодильных установок, систем вентиляции, отопления, кондиционирования воздуха. Позволяет осуществлять двухпозиционное (ТМ2, ТМ4), трехпозиционное (ТМ8, ТМ12), трехпозиционное релейно-импульсное (ТМ8, ТМ12) и пропорциональное (ТМ14) регулирование. Общие пределы регулирования от –50 до +200 °С (10 модификаций), разности температур от 0 до +20 °С (1 модификация). Зоны возврата, нечувствительности регулируемые от 0,5 до 10 °С. Питание 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность 5,5 В·А. Дистанционность — до 300 м. Габариты — 90×155×225. Масса — 1,5 кг. Защита корпуса — IP20. Применяется с датчиком ТСМ 50М;
- *регулятор ТЭ2ПЗ*. Предназначен для автоматизации систем вентиляции и кондиционирования воздуха, в т. ч. во взрывоопасных и пожароопасных помещениях. Имеет искробезопасный вход цепи датчика. Обеспечивает двухпозиционное или трехпозиционное релейно-импульсное регулирование. Общие пределы регулирования — от –40 до +120 °С (7 модификаций). Зоны возврата, нечувствительности регулируемые от 0,5 до 10 °С. Питание — 220 В, 50 Гц. Потребляемая мощность — 7 В·А. Дистанционность до 500 мм. Габариты — 110×155×235 мм. Масса — 2 кг. Защита корпуса — IP20. Применяется с датчиком ТСМ — 50М;
- *регуляторы ТРЭ105 «Термокор» и ТРЭ105И «Термокор»*. Предназначены для автоматизации систем кондиционирования воздуха, отопления, вентиляции, холодильной техники. Выполнены на микропроцессорной базе. Обеспечивают в зависимости от модификации и выбранного режима позиционное (2- или 3-позиционное) или пропорционально-интегральное регулирование, цифровую индикацию текущей температуры, отклонение температуры от заданной, цифровое задание параметров. Высота цифр 14 мм. ТРЭ105И «Термокор» имеет искробезопасный вход цепи датчика. Общие пределы регулирования от –199,9 до +200 °С (4 модифика-

ции). Зоны возврата, нечувствительности регулируемые от 0,4 до 10 °С. Питание — 220 В, 50 (60) Гц. Потребляемая мощность — 5 В·А. Дистанционность — 300 м. Габариты 72×158×202 мм. Масса — 1,5 кг. Защита корпуса — IP20. Применяются с датчиком ТСМ 50М или ТСП 100П;

- *регуляторы ТРЭ105-03 «Термокор» и ТРЭ105-05 «Термокор».* Предназначены для автоматического управления температурным режимом в системах кондиционирования воздуха и вентиляции, оборудования для пекарен малой мощности, а также в других системах технологического и холодильного оборудования. Имеют цифровую индикацию текущей температуры и параметров задания. Высота цифр — 14 мм. Входной сигнал приборов — электродвижущая сила (ЭДС) термопары в соответствии с номинальной статической характеристикой преобразования К по ГОСТ Р50431—92. ТРЭ105-03 обеспечивает трехпозиционный или двухпозиционный режимы регулирования; ТРЭ105-05 — двухпозиционный, двухступенчатый. Пределы регулирования — от 0 до 1000 °С. Зоны возврата, нечувствительности регулируемые, от 6 до 100 °С. Питание — 220 В, 50 (60) Гц. Потребляемая мощность — не более 5 В·А. Габариты — 72×158×206. Масса не более 1,5 кг. Защита корпуса — IP20. В качестве датчика применяется термопара ТХА;
- *регулятор ТРЭ105-04 «Термокор».* Предназначен для управления температурным режимом в системах кондиционирования воздуха, отопления и вентиляции, в системах микроклимата и других промышленных установках и в системах технологического и холодильного оборудования. Обеспечивают двухпозиционное или трехпозиционное регулирование, цифровую индикацию текущей температуры и параметров задания. Высота цифр — 14 мм. Входной сигнал приборов — токовый 4—20 мА. В качестве датчика используется преобразователь температуры ПТ-СТ с выходом 4—20 мА, соответствующим температуре от 0 до 1000 °С. Зоны возврата, нечувствительности регулируемые от 6 до 100 °С. Питание — 220 В, 50 (60) Гц. Потребляемая мощность — не более 5 В·А. Габариты: прибора — 72×158×200 мм; головки датчика — 90×50×45 мм. Длина защитной арматуры датчика: наружной части — 120, 160 мм; погружной части — 160, 250, 320, 50, 1000, 2000 мм. Масса: прибора не более 1,5 кг; датчика не более 0,6 кг. Защита корпуса: прибора — IP20, датчика — IP65.

Из зарубежных изделий наибольшей популярностью при сравнительной цене с аналогичными отечественными терморегуляторами пользуются изделия фирмы OMRON. Регуляторы OMRON поддерживают три режима управления: Включить/Выключить, П, или ПИД-управление. Терморегулятор ESC2 — самая простая модель с потенциометрическим датчиком — отличается надежностью и невысокой ценой. ESC5 имеет цифровую индикацию, параметры регулятора задаются в цифровом виде при помощи меню. Кроме того, регулятор располагает дополнительным релейным выходом, который можно запрограммировать на выдачу предупреждения об отклонении процесса от заданной точки либо достижении абсолютного значения температуры. Регуляторы процесса ESCK, ESEK, ESAK имеют модульную конструкцию и широкий набор дискретных и аналоговых регуляторов, поддерживают два варианта самонастройки: в первом изменяется значение выходной величины и контролируется реакция системы на это воздействие, на основании полученной ошибки рассчитываются значения PID-параметров. Второй вариант заключается в том, что регулятор «следит» за изменениями в системе и постоянно настраивает параметры в процессе работы, не внося дополнительных возмущений. Среди множества дополнительных функций следует отметить возможность связи с контроллером или компьютером по последовательному интерфейсу, плавный переход с ручного режима на автоматический, ограничение скорости изменения задания, определение обрыва линии обратной связи, возможность калибровки масштабирования входов.

## **5.2. Технические средства коммерческого учета потребления электроэнергии**

Весь комплекс технических средств и приборов учета потребления электроэнергии, применяемых в настоящее время в электроэнергетике России, можно поделить на несколько категорий:

- традиционные индукционные счетчики учета электроэнергии — трехфазные и однофазные;
- многофункциональные микропроцессорные счетчики электроэнергии;
- комплексы аппаратных и программных средств для автоматизированных систем контроля и управления энергопотреблением (АСКУЭ).



В табл. 46 приведены основные технические характеристики наиболее распространенных типов однофазных счетчиков. Структура и функциональные возможности индукционных однофазных счетчиков практически не изменялись на протяжении 15–20 лет, лишь некоторым образом улучшилось дизайнерское оформление за счет применения новых материалов. Наряду с индукционными электросчетчиками для учета электропотребления в однофазных двухпроводных сетях применяются более современные аппараты с расширенными функциями, например ЭЧР-1АМВ-Н1 и СЭТ1 (табл. 46). Счетчик ЭЧР-1АМВ-Н1 является программируемым устройством, функционирующим в соответствии с программой и данными, считываемыми с электронной кредитной карты. Счетчик обеспечивает:

- установку заданного количества зон суточных и сезонных тарифов;
- установку максимальной величины действующего тарифа и тарифных коэффициентов суточных и сезонных тарифов;
- учет по каждой из зон суточных и сезонных тарифов;
- отпуск потребителю электроэнергии в размерах оплаченного и кредитованного количества и в соответствии с суточными и сезонными тарифами;
- предупреждение потребителя о необходимости очередной платы за электроэнергию, фиксирования абонентом этого факта и разрешения пользования кредитом;
- отключение потребителя от питающей сети при израсходовании оплаченной электроэнергии.

Помимо этого, счетчик имеет гальванически изолированный от питающей сети интерфейс ввода/вывода информации типа ИРПС, используемый для программирования и дистанционного контроля работы счетчика органами Госэнергонадзора.

Однофазный счетчик СЭТ1, кроме функции учета активной энергии в однофазных двухпроводных сетях переменного тока, может использоваться в качестве телеметрического датчика мощности в составе информационно-измерительных систем автоматического учета энергопотребления. Счетчик изготавливается в двух исполнениях:

- СЭТ1-1 — однотарифный;
- СЭТ1-2 — двухтарифный для отдельного учета энергии по двум временным тарифам.

Рассмотренные счетчики (ЭЧР-1АМВ-Н1 и СЭТ1) выполнены на современной отечественной элементной базе с использованием высоких технологий конверсионных предприятий.

На сегодняшний день освоен и выпускается серийно электронный однофазный счетчик серии СОЭ-5, имеющий три модификации: однотарифный, двухтарифный с внешним переключением тарифов для работы в составе АСКУЭ, двухтарифный с внутренним тарификатором. К основным особенностям счетчика следует отнести:

- диапазон эксплуатационной температуры ( $-32$ — $+55$ ) °С;
- наличие энергозависимой памяти;
- инвариантное исполнение в низком корпусе, дающее возможность установки в еврощитах.

Структура и функциональные возможности современных трехфазных счетчиков отражают тенденции совершенствования и развития технических средств автоматизированного контроля электропотребления. В табл. № 41, 42, 48, 49, 50 Приложения приведены основные технические характеристики и функциональные возможности наиболее распространенных типов трехфазных электросчетчиков, включая суперсовременные технические средства учета — многофункциональные микропроцессорные. Наиболее распространенные вплоть до конца 90-х гг. счетчики электрические трехфазные индукционные типов: СА3 — И670М, СА3У-670М, СА4-И672М, СА4-И678, СА4У-И678, СР4-И679, СР4У-И679, изготавливаются по ГОСТ 6570—96 и ТУ25.01.172—75, ТУ25.01.392—75, предназначены для учета активной и реактивной энергии переменного тока номинальной частотой 50 Гц (по особому заказу — 60 Гц), для работы в закрытом помещении в диапазоне температур от 0 до 40 °С и относительной влажности воздуха не более 80 % при температуре 25 °С. В табл. № 41 и 45 Приложения приведены основные технические характеристики данной серии электросчетчиков, тип, подключение, номинальный и максимальный токи для активных и реактивных счетчиков, соответственно. Счетчики серии СА45 отличают изящные конструкторские идеи, современный дизайн, оригинальные материалы, простота и удобство регулировки, высокие стабильность и точность во времени, надежность и долговечность, большой межповерочный период (8 лет). Эти приборы предназначены для организации локального учета по однотарифной системе без возможности привязки к централизованной автоматизированной системе. Трехфазные электросчетчики серии СЭТ3, СЭТ4 собраны в основном на электронных компонентах, имеют телеметрический выход для подключения к информационно-измерительным системам учета электропотребления, реализуют

учет по двум временным тарифам. Кроме этого оборудован специальный поверочный выход и управляющий вход переключения тарифа сигналом постоянного тока (СЭТ4).

Происходящая в настоящее время реструктуризация электроэнергетики России, появление новых границ балансовой принадлежности побуждают производителей к выпуску новых интеллектуальных, высокоточных приборов учета. Например, трехфазные счетчики СТС-5605, разработанные электротехнической компанией ЕМН (Германия), выпускаются по лицензии в России и представляют собой цифровые комбинированные приборы, сочетающие функции микропроцессорного счетчика и измерители показателей качества электроэнергии. При этом данные, хранящиеся в памяти счетчика, могут быть выведены на жидкокристаллический дисплей либо на персональный компьютер через стандартные интерфейсы RS232 или RS485. Новейшие электронные трехфазные счетчики серии СТЭ-560 выпускаются в корпусе известных индукционных счетчиков серии СА 45, что позволяет без переделок учетно-распределительных щитов производить их замену на счетчики СТЭ-560, которые предназначены для измерения и учета активной (реактивной) электроэнергии в трех- и четырехпроводных цепях переменного тока с возможностью хранения и отображения измеряемых величин в энергозависимой памяти и жидкокристаллическом индикаторе. Счетчики имеют одно- или двухтарифное исполнение с внешним и внутренним тарификаторами, могут работать в составе АСКУЭ через телеметрический выход.

Альфа — многотарифный микропроцессорный трехфазный счетчик, предназначен для учета активной и реактивной энергии в цепях переменного тока, а также для использования в составе автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) для передачи измеренных параметров на диспетчерский

пункт по контролю, учету и распределению электрической энергии. На рис. 5.6 показан внешний вид счетчика Альфа и комплект оборудования для подключения к сети. На рис. 5.7 приведена структурная схема счетчика Альфа, а в табл. 5.0 — основ-



Рис. 5.6

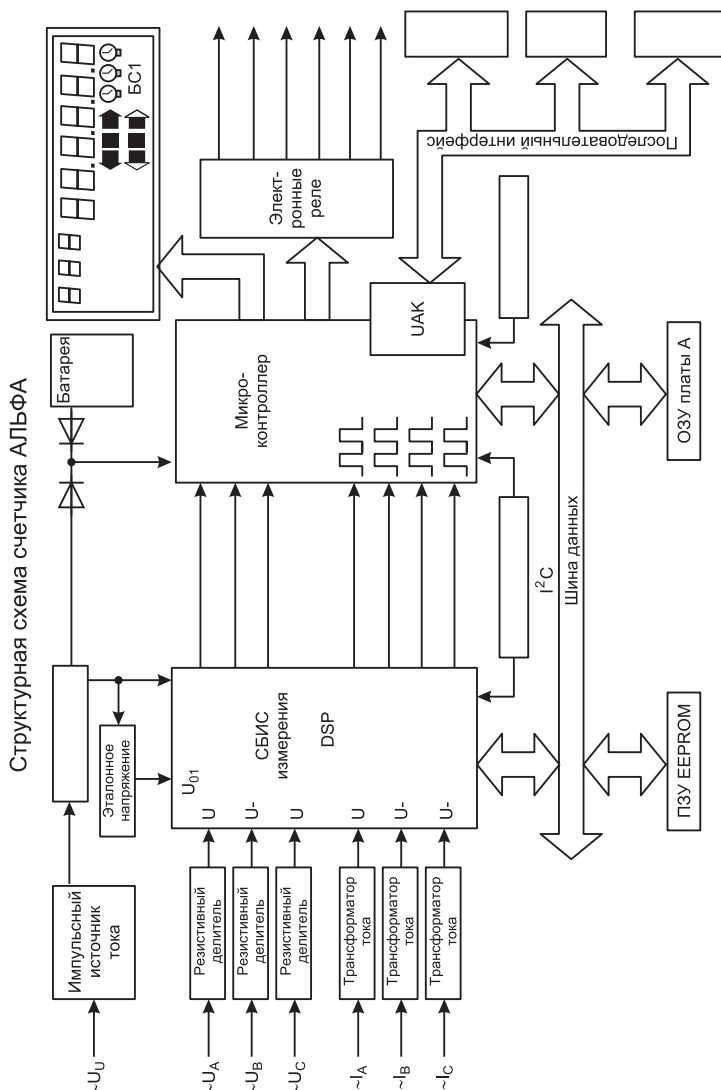


Рис. 5.7

ные технические характеристики. К основным функциям прибора следует отнести:

- непосредственный учет электроэнергии;
- обработку и передачу данных;

- организацию непрерывного времени календаря;
- хранение информации в неразрушаемой памяти ПЗУ (EEP-ROM);
- сохранение данных при перерывах в подаче питания;
- индикацию величин измеряемых параметров, направления потока энергии, окончания интервала усреднения при измерении мощности, данных, не используемых в коммерческих расчетах (количество сбросов показаний, дата последнего считывания, дата перепрограммирования, время и количество перерывов в подаче питания).

### **5.3. Однофазные и трехфазные регуляторы мощности**

При решении целого ряда практических задач в области электромашиностроения, в электротехническом оборудовании и в бытовой технике вопросы реализации регулирования напряжения являются едва ли не самыми первостепенными, так как от уровня напряжения зависят: мощность светового потока многих осветительных устройств, количество тепла электрообогревателей, частота вращения электродвигателей, силовые характеристики электромагнитов и т. д. Кроме того, при создании средств и методов, позволяющих оптимизировать электропотребление технологического оборудования, необходимы технические средства плавного или дискретного регулирования уровня напряжения на нагрузке или потребляемой мощности.

На сегодняшний день основными элементами силовой электроники, на базе которых строятся регулирующие устройства в цепях низкого напряжения (до 1000 В) промышленной частоты, являются тиристорные и симисторные структуры: одиночные тиристоры и симисторы (SCR), интегральные модули (SMD) без и со схемой адаптации для подключения к выходам микроконтроллеров, тиристорные и симисторные модули с оптоэлектронной развязкой, интегральные и интеллектуальные IPM-модули на базе новейших тиристорно-симисторных структур с полевым управлением (MCT).

Выходное устройство одной фазы регулятора в общем случае представляется симистором либо двумя тиристорами, включенными

ми встречно-параллельно (рис. 5.8, *a*), коммутирующими активно-индуктивную нагрузку (R-L).

На рис. 5.8, *б* показана временная диаграмма коммутации активно-индуктивной нагрузки, подключенной к однофазному источнику синусоидального напряжения.

При регулировании мощности активной нагрузки (что встречается при использовании таких регуляторов практически в 80 % случаев) фазовый угол  $\alpha = 0$ . Приведенная временная диаграмма иллюстрирует случай, когда значение угла регулирования  $\alpha$  больше фазового угла нагрузки:  $\alpha > \varphi$ .

В этом случае неизбежно возникновение в цепи нагрузки свободной (апериодической) составляющей тока  $i''$ :

$$i = i' + i'', \quad (5.1)$$

где  $i'$  — вынужденная составляющая.

При этом:

$$i' = \frac{U_m}{Z_n} \cdot \sin(\omega t - \varphi); \quad (5.2)$$

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + (\omega L_n)^2}; \quad (5.3)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L_n}{R_n}; \quad (5.4)$$

$$i'' = A \cdot e^{-\frac{t}{T}}; \quad T = \frac{L_n}{R_n}; \quad (5.5)$$

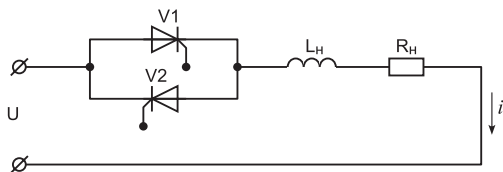
$$i'' = A \cdot e^{-\frac{\omega t - \alpha}{Tg\varphi}}, \quad (5.6)$$

где  $A$  — постоянная интегрирования, определяемая начальными условиями.

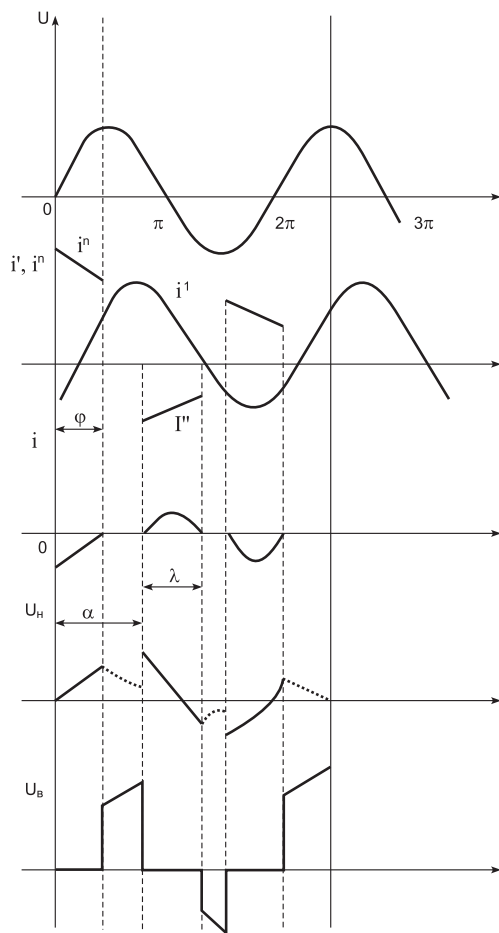
При подключении к регулятору мощности активной нагрузки свободная составляющая тока  $i$  отсутствует и длительность  $\lambda$  участка проводимости при  $\alpha = 0$  равна  $\pi$  (половина периода), через нагрузку протекает синусоидальный ток.

При увеличении угла управления  $\alpha$  длительность проводимости каждого вентиля ( $\lambda^1 = \pi - \alpha$ ) и в нагрузке протекает несинусоидальный ток.

В общем случае в процессе регулирования как в случае активно-индуктивной, так и активной нагрузки в силовой цепи проте-



а)



б)

Рис. 5.8

кает прерывистый ток, гармонический состав которого зависит от значений  $\alpha$  и  $\varphi$ . Это обстоятельство в значительной степени определяет неудовлетворительную совместимость устройств, имеющих фазовое управление с питающей сетью, что является определенным недостатком использования таких систем регулирования мощности. Тем не менее существует комплекс отработанных технических решений, позволяющих значительно снизить неблагоприятное влияние регуляторов мощности на питающую сеть, но это отдельный вопрос.

Гармонический состав токов и напряжений при  $\alpha \neq 0$  (режим прерывистого тока) определяется, как известно, путем разложения в ряд Фурье [28] несинусоидальной периодической функции  $f(x)$ :

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin kx = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(kx + \Psi_k), \end{aligned} \quad (5.7)$$

где:  $k$  — порядковый номер гармоники ( $k = 1, 2, 3, 4, \dots \infty$ ).

Для всех входящих периодических функций аргумент  $X$  в функции времени определяется, как

$$X = \omega t = 2\pi \frac{t}{T} = 2\pi f t, \quad (5.8)$$

где  $T$  и  $f$  — период и частота функции.

Коэффициенты  $a_k$  и  $b_k$  (коэффициенты Фурье), величины  $A_k$  и  $\operatorname{tg} \varphi$  определяются:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots \infty); \quad (5.9)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots \infty);$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{a_k}{b_k}. \quad (5.10)$$

Наличие или отсутствие в выражении  $f(x)$  постоянной составляющей  $a_0/2$ , четных и нечетных гармоник, синусоидальных и косинусоидальных составляющих зависит от рода симметрии функции  $f(x)$ .



Независимо от конкретной реализации однофазного или трехфазного регулятора мощности обязательными функциональными элементами (рис. 5.9) общей схемы являются: силовой элемент (СЭ), фазорегулятор (ФР), устройство регулирования (УР), блоки защиты (БЗ) со стороны сетевого питания и нагрузки.

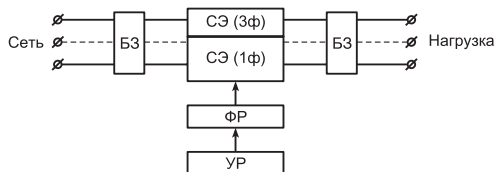


Рис. 5.9

Предприятиями электротехнической промышленности России производится большой ряд компонентов для построения регуляторов мощности с фазовым управлением и законченных устройств на той же элементной базе.

Например, модули регулятора мощности для однофазной нагрузки серии МРМ, выполненные по технологии твердотельных оптоэлектронных реле, имеют оптронную развязку управляющих и силовых цепей, а также беспотенциальные радиаторы.

На рис. 5.10 приведена основная схема включения при питании однофазной активно-индуктивной нагрузки с фазовой характеристикой управления.

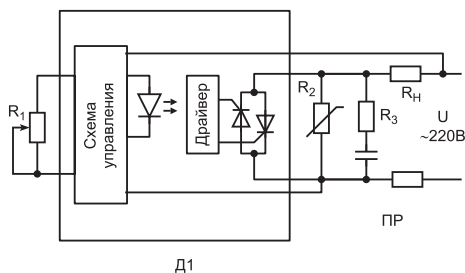


Рис. 5.10

Фазовая характеристика управления (рис. 5.11) показывает зависимость угла управления  $\varphi_0$  (кривая 1) и действующего значения напряжения  $U_H$  (кривая 2) от величины (положения) регулировоч-

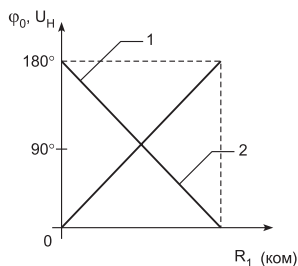


Рис. 5.11

ного резистора  $R_1$ . Очевидно, что такой регулятор мощности по причине несинусоидальности напряжения на нагрузке может использоваться в основном для регулирования мощности нагревательных элементов либо в схеме однофазного выпрямителя небольшой мощности с регулируемым выходным напряжением, например для питания якорной обмотки электродвигателя постоянного тока (рис. 5.12).

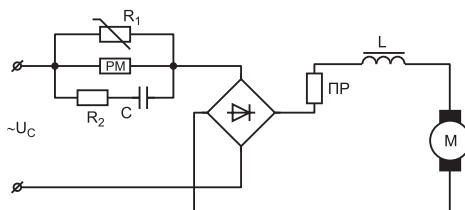


Рис. 5.12

Как видно из схем включения регулятора мощности (рис. 5.10, 5.11), для защиты от перенапряжения силового элемента регулятора мощности используются RC-цепи и варисторы, а для защиты от тока короткого замыкания в цепи нагрузки применяются быстродействующие предохранители, ток плавкой вставки которых выбирается исходя из значений максимально допустимого тока силового элемента, его перегрузочной способности и мощности нагрузки.

В качестве элемента управления используется широко распространенная микросхема КР1182ПМ1А, электрическая схема включения и основные характеристики которой представлены на рис. 5.13.

- напряжение питания 80—276 В;
- ток нагрузки до 1,2 А;

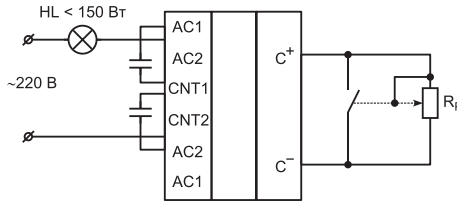


Рис. 5.13

- мощность нагрузки до 150 Вт;
- частота сетевого напряжения 40...70 Гц;
- ток потребления не более 2 мА;
- диапазон рабочих температур  $-40^{\circ} \dots +70^{\circ}$ .

Не менее распространенным функциональным аналогом является микросхема фазового регулятора мощности PR 1000-1 (рис. 5.14).

Технические характеристики:

- номинальное напряжение сети 220 В, 50 Гц;
- максимальная мощность нагрузки 1000 Вт;
- минимальная мощность нагрузки 100 Вт;
- диапазон регулирования угла проводимости  $0 \dots 150^{\circ}$ ;
- максимальная рабочая температура корпуса  $100^{\circ} \text{C}$ .

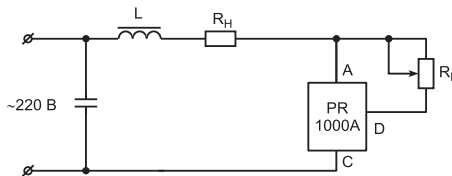


Рис. 5.14

С помощью PR 1000-1 можно регулировать:

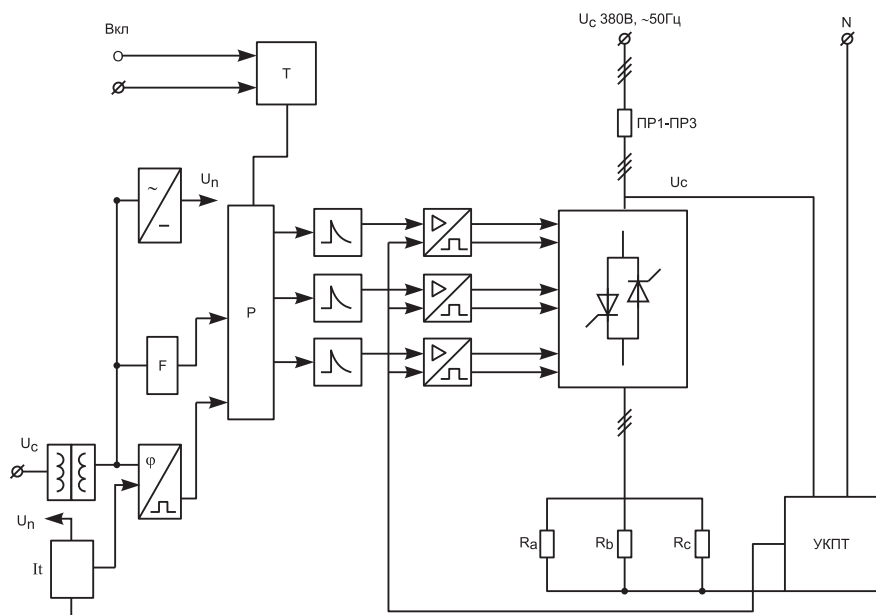
- яркость осветительных ламп накаливания;
- частоту вращения однофазных коллекторных электродвигателей переменного тока;
- мощность электронагревательных приборов.

Исходя из структурной схемы регулятора мощности (рис. 5.2) состав функциональных элементов для трехфазной схемы не отличается от рассмотренных однофазных, а также практически идентичен структуре упоминающихся ранее устройств «мягкого» пуска асинхронных электродвигателей, позволяющих в широких преде-

лах менять значение фазного (линейного) напряжения, подаваемого на их обмотки в момент запуска. Это позволяет при соответствующем подборе мощности устройства «мягкого» пуска использовать его для регулирования мощности любой трехфазной нагрузки, например нагревательных элементов, мощных осветительных ламп, включенных по трехфазной схеме, хотя это экономически невыгодно в связи со значительной функциональной избыточностью этих устройств, а следовательно, и большой стоимостью.

На рис. 5.15 приведена обобщающая функциональная схема трехфазного регулятора мощности, где отличительными упрощающими особенностями являются:

- отсутствие системы автоматического устранения асимметрии выходных фазных напряжений;
- отсутствие всей гаммы защит, необходимых для обеспечения контроля за аварийными режимами, свойственными асинхронному электродвигателю (контроль обрыва и чередования



**Рис. 5.15.**  $U_n$  — источник стабилизированного напряжения;  $P$  — распределитель импульсов;  $F$  — формирователь чередования фаз; УКПТ — устройство контроля перегорания ТЭНов;  $T$  — триггер управления состоянием;  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$  — элементы нагрузок фаз; ПР1 — ПР3 — быстродействующие предохранители.

фаз, ограничения тока в переходных и статических режимах и т. д.);

- отсутствие командоконтроллера для реализации необходимой зависимости изменений выходного напряжения от времени, при пуске и торможении;
- обеспечение надежной защиты от токов короткого замыкания за счет быстродействующих предохранителей;
- наличие эффективного контроля за возникновением асимметрии трехфазного напряжения из-за аварийной разгрузки отдельной фазы, например перегоранием ТЭНов.

Как видно из приведенной функциональной схемы, регулятор напряжения представляется трехфазным симисторным (тиристорным) коммутатором со схемой управления, обеспечивающей включение/отключение нагрузки от сети и регулирование напряжения на нагрузке за счет импульсно-фазового управления.

В настоящее время выпускается ряд устройств, выполняющих функции трехфазного регулятора напряжения для различных применений. Например, регуляторы серии РНТТ, позволяющие устанавливать напряжение (ток) на заданном уровне в диапазоне от 0 до 100 % от номинального значения, преобразователи полупроводниковые переменного тока серии ППТТ, предназначенные для комплектования электрооборудования сетей освещения промышленных предприятий с лампами накаливания, разрядными лампами высокого давления (ДРЛ, ДРИ, ДНАТ) с индуктивным балластом, разрядными лампами низкого давления (люминесцентными) с индуктивно-емкостным балластом и с дуговыми ксеноновыми трубчатыми лампами (ДКСТТ) в электроустановках с глухозаземленной нейтралью с целью поддержания заданной установки эффективного фазного напряжения. В отличие от РНТТ, в устройствах серии ППТТ диапазон регулирования не велик и составляет не более  $\pm 15\%$  от номинального значения напряжения сети.

Тиристорные регуляторы температуры серий БТРТ1 и ШТРТ2 в основном используются для питания нагревательных элементов и поддержания заданной температуры при работе с измерительными преобразователями. В табл. 57 Приложения приведены основные технические характеристики, а на рис. 5.16 — функциональная схема.

Двухконтурная система регулирования обеспечивает плавное регулирование температуры за счет соответствующего изменения напряжения на  $R_n$ . Во многих случаях вместо датчиков ТС (ТП)



коэффициента мощности, уровня потерь в питающей сети и КПД. В конечном итоге для повышения энергетической эффективности оборудования необходимо реализовывать такие технические решения, которые позволили бы достичь формы потребляемого тока, близкой к синусоидальной. В инженерной практике возможны два направления работы, приближающие к достижению этой цели:

- применение специальных способов управления преобразовательными установками;
- использование статических компенсаторов неактивных составляющих мощности.

Специальные способы управления реализуются в основном в выпрямителях, собранных на базе полностью управляемых приборов: запираемых тиристоров, биполярных и JGBT-транзисторов, однооперационных тиристоров с устройствами искусственной коммутации и полевых (MOSFET) транзисторов. Например, широтно-импульсное регулирование выпрямленного напряжения может значительно улучшить энергетические показатели благодаря снижению содержания высших гармонических составляющих в сетевом токе и уменьшению фазового сдвига первой гармоники тока относительно напряжения сети. Кроме этого, если использовать при управлении выпрямителем режим с опережающим фазовым углом, то за счет возврата реактивной мощности в сеть можно полностью или частично компенсировать потребление реактивной мощности другими потребителями электроэнергии. К специальным методам управления относится фазовый способ управления с образованием короткозамкнутого контура.

Второе направление весьма перспективно и предусматривает использование статических компенсаторов неактивных составляющих мощности на базе полупроводниковых преобразователей, которые обладают высоким быстродействием и могут реализовать управляющее воздействие с требуемой точностью. На рис. 5.17 приведена упрощенная эквивалентная схема, поясняющая прин-

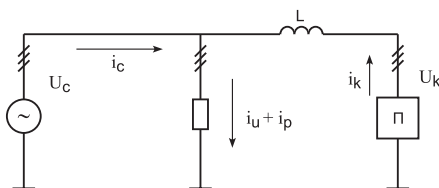


Рис. 5.17

цип генерирования тока компенсации в питающую сеть и содержащая источник компенсационного тока  $i_k$  с последовательно включенным реактивным элементом  $L$ , источник трехфазного напряжения сети  $U_c$  и сопротивление нагрузки  $Z_n$ .

Мгновенное напряжение на выходе источника компенсационного тока определяется:

$$U_k(t) = L \frac{di_k}{dt} + U_c(t). \quad (5.11)$$

Условием полной компенсации является:

$$i_k(t) = -i_p(t), \quad (5.12)$$

где  $i_p$  — компенсируемая (пассивная) составляющая тока нагрузки.

Следует заметить, что под кажущейся простотой реализации такого способа скрывается достаточно сложная система управления процессом компенсации, так как необходимо производить в реальном времени вычисление значения и спектра выходного напряжения компенсации  $U_k(t)$  на основе анализа гармонического состава кривой сетевого тока. Результаты испытаний показывают, что данный способ практически целесообразен, работоспособен и позволяет довести форму кривой сетевого тока почти до синусоидальной. Для широкого практического использования данного технического решения необходимо проведение опытно-конструкторской работы по созданию серии специализированных малоинерционных преобразователей с ШИМ — управлением на современной элементной базе.



# Глава 6

## Энергосберегающие технологии в коммунальной сфере

### 6.1. Современные электрообогревательные приборы и системы

В условиях постоянного роста затрат на коммунальные услуги обеспечение качественного и недорогого обогрева помещений — задача чрезмерно актуальная. Такая задача в настоящее время успешно решается за счет применения в строительстве новейших материалов и конструкций с высокими теплоизоляционными характеристиками, с одной стороны, и внедрение современных систем отопления на базе нагревательных проводов, с другой стороны. Известно, что традиционная система водяного отопления создает конвекционные потоки воздуха с далеко не лучшим распределением температур в помещении, при котором все тепло «уходит» вверх — температура повышается в направлении от пола к потолку (рис. 6.1). Поэтому даже при высокой температуре батарей водяного отопления появляется ощущение холодного пола. При использовании технологии подогрева полов с помощью нагревательных проводов при значительно меньших затратах энергии на один квадратный метр площади достигается оптимальное распределение температур по высоте — температура снижается по мере удаления от пола (рис. 6.2). Конструкция подогреваемого пола предусматривает укладку нагревательного кабеля (рис. 6.3) в бетон или песочно-цементную стяжку. Нагревательный кабель собирается в нагревательные секции, которые укладываются на обогреваемую поверхность равномерно с постоянным шагом (рис. 6.4).

Система традиционного водяного отопления создает конвекционные потоки воздуха и нелучшее распределение температур в помещении. ВСЕ ТЕПЛО УХОДИТ ВВЕРХ.

Помимо нагревательных секций, система отопления обычно содержит датчик температуры, устанавливаемый между нагревате-

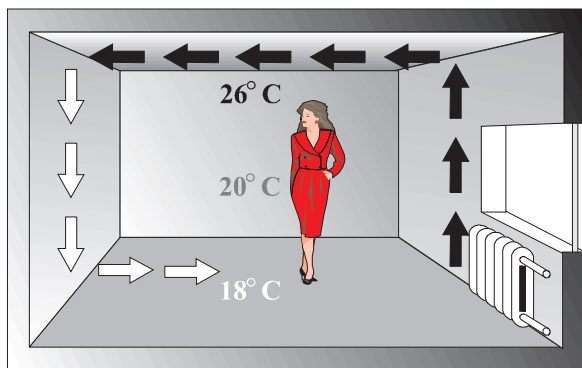


Рис. 6.1

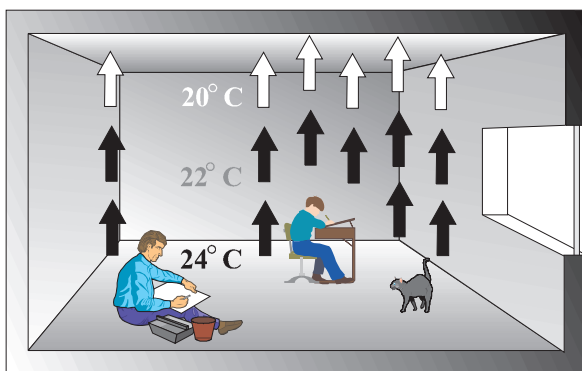


Рис. 6.2

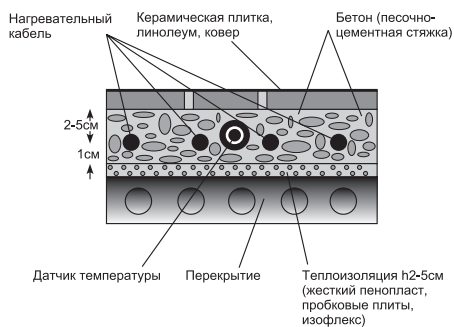


Рис. 6.3. Конструкция подогреваемого пола

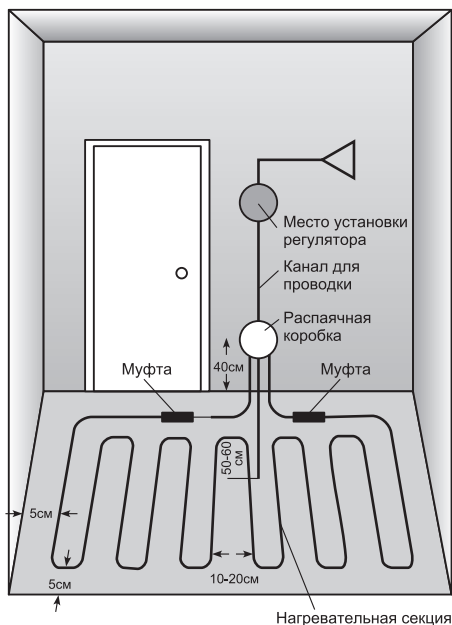


Рис. 6.4. Схема укладки нагревательной секции и датчика температуры

льным кабелем, регулятор температуры и распаечные коробки, если укладывается несколько секций. Установленная мощность нагревательных секций зависит от величины обогреваемой площади, при этом реальная потребляемая мощность системы меньше установленной (до 70 % зимой и до 10 % в межсезонье). Ориентировочные соотношения площади и установленной мощности иллюстрирует график усредненной зависимости установленной мощности от обогреваемой площади (рис. 6.5).

Для отопления помещений, удаленных от источников центрального теплоснабжения, используется несколько современных серий электродкотлов с очень высоким КПД и большим диапазоном регулирования мощности, что позволяет снижать расход электроэнергии по сравнению с многочисленными электрообогревательными системами прямого действия. Работа электродкотлов может производиться в автоматическом режиме с принудительной циркуляцией воды и с обеспечением защит от перегрева воды, перегрузки по току нагревательных элементов и короткого замыкания.

Подогреваемые полы — это оптимальное распределение температур по высоте. ВАШИ НОГИ ВСЕГДА В ТЕПЛЕ.

Площадь, м <sup>2</sup>	Мощность, кВт
1.50–2.00	0.19
3.00–4.00	0.33
4.50–6.00	0.59
6.50–8.50	0.80
8.00–10.0	0.90
10.5–13.5	1.20
12.0–16.0	1.40
15.5–20.0	1.80
18.0–22.0	2.00
21.0–26.0	2.40
23.0–29.0	2.80
28.0–35.0	3.30

Рис. 6.5

Рассмотренные системы относятся к стационарным системам электрообогрева, монтаж которых производится при строительстве и реконструкции отапливаемых помещений. В практике эксплуатации временных систем дополнительного отопления используются электротепловентиляторы и электрокалориферные установки, общей характеристикой которых является принудительный прогон воздуха с помощью вентилятора через электронагреватели — воздушные ТЭНы. Это довольно высокопроизводительные и экономичные системы электрообогрева, например в электротепловентиляторе ЭТВ-9 (СФО-20) при мощности электродвигателя 80 Вт (180 Вт), потребляемой мощности 9 кВт (5/10/15/20), максимальном перепаде температуры 93 °С (100 °С) производительность по воздуху составляет 750 м<sup>3</sup>/ч (1100 м<sup>3</sup>/ч). Электрокалориферные установки СФО-33, СФО-66, СФО-99 как электроотопительные системы большой производительности используются в основном для временного или дополнительного обогрева в производственных, складских и торговых помещениях большого объема.

Техническое усовершенствование современных электрообогревательных приборов и систем осуществляется за счет использования более эффективных электронагревательных элементов и систем управления ими по пути снижения электропотребления и мас-

согабаритных параметров. Тем не менее в большинстве случаев электрообогревательные приборы и системы отопления, кроме новой технологии на основе нагревательных проводов и кабелей, не позволяют в должной мере экономить электроэнергию. При их использовании возможна лишь оптимизация электропотребления за счет автоматизации режима работы в зависимости от изменения температуры окружающей среды с помощью терморегуляторов, регуляторов напряжения, устройств контроля времени нагрева и т. д.

Технологии, основанные на применении нагревательных проводов и кабелей, позволяют значительно снизить расход электроэнергии на обогрев эквивалентного объема помещения по сравнению с традиционными средствами электроотопления за счет уникальной возможности изменения характера и интенсивности конвекционного потока воздуха.

Достижение наибольшей эффективности электроотопления происходит в основном за счет правильно выбранного типа нагревательного провода или кабеля для каждого конкретного случая. Поэтому необходимо знать основные характеристики и параметры нагревательных проводов и кабелей.

Нагрев провода и кабеля предназначен для работы в электронагревательных изделиях и системах, бытовых приборах, для подогрева элементов бытовых холодильников, для обогрева зданий, тротуаров, трубопроводов, технологического оборудования и других объектов, а также в электронагревательных модулях для обогрева почвы и воздуха, полов и стен различных объектов и сооружений агропромышленного, нефтегазового и строительного комплексов. Нагревательные провода и кабели классифицируются по нескольким группам, в зависимости от материала токопроводящих жил и материала изоляции. Выпуск нагревательных проводов и кабелей производится на основе отраслевых технических условий. К наиболее применяемым материалам токопроводящих жил относятся: медь, сталь, никель, нихром, специальные сплавы с высоким сопротивлением, различные виды волокнистого графитированного шнура, специальным образом навитые спирали из проволоки на изоляционный термоустойчивый стержень. Широко распространены материалы изоляции: ПВХ-пластикат, облученный полиэтилен, кремнийорганическая резина, асбест, фторопласт, минеральная изоляция. Приведем номенклатуру и технические характеристики проводов и кабелей, наиболее часто используемых при монтаже современных электронагревательных систем.

*Провод гибкий нагревательный ПНКМ изготавливается в соответствии с ТУ 16.К80-05—89, с жилой из медной проволоки, навитой на гибкий сердечник из кремнийорганической резины с основой из скрученных полиэфирных нитей, с изоляцией из кремнийорганической резины.*

Основные технические характеристики:

- число жил — 1;
- наружный диаметр провода, мм —  $2.0 \pm 0.3$ ;
- диаметр сердечника, мм —  $1.1 \pm 0.1$ ;
- расчетная масса 1 км провода, кг — 5.7;
- строительная длина провода, м — 3;
- электрическое сопротивление 1 м токопроводящей жилы, Ом —  $4.3 \pm 0.43$ ;
- электрическое сопротивление изоляции 1 м провода, МОм — не менее 500;
- количество допустимых циклов изгиба вокруг ролика диаметром, равным 2-кратному номинальному диаметру провода, — 10;
- максимальная температура, °С — 180;
- срок службы — 5 лет;
- рабочее напряжение, В — 24;
- частота, Гц — 50;

Область применения: медицинская техника.

*Провод кислотостойкий ПФК, ТУ 16-705.064—78 с углеродистой жилой типа ЖУ, с изоляцией из пленок фторопласта.*

Основные технические характеристики:

- число жил — 1;
- максимальный наружный диаметр, мм — 2.3;
- расчетная масса 1 км провода, кг — 8.8;
- строительная длина, м — не менее 10;
- электрическое сопротивление изоляции 1 м провода, МОм — не менее 105;
- электрическое сопротивление изоляции 1 м провода в растворе  $H_2SO_4$  при  $t = 100$  °С, МОм — не менее 103;
- диапазон рабочих температур в растворе  $H_2SO_4$ , °С —50 — +100;
- диапазон рабочих температур в водной среде, °С —60 — + 250;
- рабочее напряжение в водной среде, В — до 220 В переменного и постоянного тока.

Провод стоек к вибрационным, ударным и линейным нагрузкам, также к акустическим шумам.

Область применения: фиксированный монтаж в нагревательных элементах химических производств.

*Провод особо гибкий ПОГ ТУ 16-705.148—80, с медной жилой высокой гибкости с резиновой изоляцией. Основные технические характеристики:*

- число жил — 1;
- ряд номинальных сечений, мм — 0.5; 0.75; 1.0; 1.5;
- номинальный наружный диаметр, мм — 2.1; 2.4; 2.5; 2.8;
- строительная длина 1 км провода, кг — 9.47; 12.6; 15.4; 20.4;
- строительная длина провода, м — не менее 20;
- количество циклов изгиба на угол  $\pm 180^\circ$  вокруг ролика диаметром, равным 10 диаметрам провода, — не менее 5000;
- длительно допустимая температура на жиле,  $^\circ\text{C}$  — не более 65;
- усилие при растяжении, Н — не более 40;
- диапазон рабочих температур,  $^\circ\text{C}$  —15 — +40;
- рабочее напряжение, В — не более 27;

Область применения: соединение систем нагревателей, в водоплазном обмундировании.

*Провод ПХ-НХ, ТУ 16-505.453—73, с нихромовой жилой с фторопластовой изоляцией. Основные технические характеристики:*

- число жил — 1;
- наружный диаметр, мм — 1.0; 1.1; 1.2; 1.3; 1.4; 1.55; 1.6; 1.8;
- сопротивление жилы 1 км провода, Ом — не более 39700; 17000; 9900; 6200; 5900; 3700; 2400; 2200;
- расчетная масса 1 км провода, кг — 1.4; 2; 2.7; 3.5; 4.1; 5.8; 6.7; 8.5;
- строительная длина, м — не менее 10;
- диапазон рабочих температур,  $^\circ\text{C}$  —60 — +250;
- рабочее напряжение, В — не более 250 постоянного и переменного тока;

Область применения: предназначен для нагрева агрессивных жидкостей, а также для работы в условиях погружения в агрессивную жидкость.

*Провод ПФ-Н выпускается по тем же ТУ, что ПХ-НХ (ТУ 16-505.453—73), с никелевой жилой с фторопластовой изоляцией.*

Основные технические характеристики:

- число жил — 1;

- наружный диаметр, мм — 1.3; 1.4; 1.5;
- сопротивление жилы 1 км провода, Ом — не более 550; 370; 300;
- расчетная масса 1 км провода, кг — не более 3.6; 4.6; 5.7;
- строительная длина, м — не менее 10,
- диапазон рабочих температур, °С —60 — +250;
- рабочее напряжение, В — не более 250 постоянного и переменного тока;

Область применения: для приборного и межприборного монтажа электрических устройств.

*Провода ПШС, ПШУС, ПШУСЛ, ПШУСФН, ПШСУ выпускаются по ТУ 16-505.519—73 с неметаллической токопроводящей жилой.*

ПШС — с токопроводящей жилой из шнура волокнистого графитированного с изоляцией из кремнийорганической резины.

ПШСУ — то же, но с более прочной токопроводящей жилой.

ПШУС — то же для бытовых приборов.

ПШУСЛ — то же, с оболочкой из лавсанового волокна.

ПШУСФН — то же, с оболочкой из фенилового волокна.

Строительная длина проводов, м — не менее 10.

Электрическое сопротивление изоляции и провода, МОм — не менее 500.

В табл. 51 приведены основные технические характеристики нагревательных проводов.

Область применения: предназначены для эксплуатации в электронагревательных системах при напряжении до 250 В постоянно или переменного тока частотой 50 Гц.

*Провода нагревательные ПНКХ и ПНВХ выпускаются по ТУ 16-705.067—78.*

ПНКХ — с токопроводящей жилой из нихромовой проволоки, навитой на гибкий сердечник из кремнийорганической резины с кремнийорганической изоляцией.

ПНВХ — то же, но с изоляцией из поливинилхлоридного пластика. Основные технические характеристики приведены в табл. 52.

Строительная длина проводов, м — не менее 15. Провода имеют сплошную расцветку следующих цветов: красный, белый, черный, синий, желтый. Электрическое сопротивление изоляции 1 м провода не менее 40 МОм при относительной влажности воздуха до 100 % в температуре до 35 °С — не менее 20 МОм. Провода



этих типов выдерживают не менее 10 циклов изгиба вокруг ролика диаметром, равным двукратному диаметру провода. Для ПНКХ с изоляцией из резины К-69 температура окружающей среды — 180 °С, с изоляцией из резины К-673 — 200 °С. Для провода ПНВХ температура окружающей среды не должна превышать 105 °С. Допустимое напряжение до 250 В переменного тока частотой до 40 Гц. Предназначены для подогрева элементов бытовых холодильников.

*Провода нагревательные повышенной надежности, изготавливаются в соответствии с ТУ 16-705.268—83.*

ПНВСВ — провод с однопроволочной стальной жилой, с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, с экраном из стальных проволок или алюминиевой фольгой, с оболочкой из поливинилхлоридного пластиката.

ПНПСП — то же, с изоляцией и оболочкой из полиэтилена.

ПНРСВ — то же, с изоляцией из резины и оболочкой из поливинилхлоридного пластиката.

ПНРСП — то же, с оболочкой из полиэтилена.

Основные технические характеристики приведены в табл. 53. Строительная длина провода не менее 155 м, электрическое сопротивление изоляции 1 км провода не менее 10 МОм, при  $t = 80\text{ °C}$  — не менее 0.5 МОм. Провод выдерживает не менее 10 изгибов на угол 180° при радиусе изгиба, равном пяти диаметрам провода при температуре до  $-10\text{ °C}$ . Провод устойчив к длительному воздействию воды и минеральных удобрений. Общее время работы провода под токовой нагрузкой — не более 20000 ч. при температуре поверхности оболочки 80 °С. Провод предназначен для использования в условиях неподвижного монтажа в электронагревательных модулях для обогрева почвы и воздуха в рассадных культивационных сооружениях полов, площадок и стен в животноводческих помещениях для молодняка и подобных им объектов сельскохозяйственного производства. Рассчитан на напряжение до 380 В переменного тока частотой 50 Гц.

*Кабели нагревательные с радиационно-модифицированной полимерной изоляцией, выпускаются в соответствии с ТУ 16-705.4284 86 (табл. 54 Приложения).*

КНС — с токопроводящей жилой из стальной оцинкованной проволоки, с изоляцией из радиационно-модифицированного по-

лиэтилена с металлическим заземляющим экраном, в оболочке из поливинилхлоридного пластика

КНН — то же, только с жилой из специального сплава с высоким удельным сопротивлением. Основные технические характеристики приведены в табл. 54.

Строительная длина кабеля КНС не менее 60 м, КНН — 40 м. Электрическое сопротивление жилы 1 м кабеля составляет:

- стальной оцинкованной жилы  $d = 0.56$  мм не более 0.54 Ом;
- жилы из специального сплава  $d = 0.63$  мм не более 3.27 Ом;
- жилы из специального сплава  $d = 0.8$  мм не более 2.03 Ом.

Электрическое сопротивление изоляции 1 км кабеля не менее 100 МОм при температуре 100 °С — 1 мОм. Кабель устойчив к 5-ти двойным изгибам на угол  $(180+90)^\circ$  при диаметре изгиба не менее 10 наружных диаметров кабеля при температуре не ниже минус 15 °С. Кабели не способствуют распространению горения, масло- и бензостойки, могут эксплуатироваться при температуре окружающей среды до -40 °С и относительной влажности до 100 % при температуре до +25 °С. Длительно допустимая температура нагрева жил — 100 °С. Допускается прокладка по кирпичу, бетону, открыто и скрыто под слоем цементной стяжки, под плитами, покрытием дорожек, тротуаров, в стальных трубах. Основное назначение указанных марок кабеля — для обогрева при фиксированном монтаже при напряжении до 380 В переменного тока частотой 50 Гц.

*Кабели нагревательные с кремнийорганической или поливинилхлоридной изоляцией выпускаются в соответствии с ТУ 16-705.141—80 (табл. 55 Приложения).*

КНРПВ-М — кабель нагревательный со стальной жилой, с изоляцией из кремнийорганической резины, с лентой из фторопласта, с наружной оболочкой из теплостойкого поливинилхлоридного пластика. Допустимая температура эксплуатации — 100 °С. Применяется при фиксированной прокладке для обогрева полов жилых помещений, дорог и переходов.

КНРПЭВ-М — кабели нагревательные со стальной жилой, с изоляцией из кремнийорганической резины, с лентой из фторопласта, с оплеткой из проволоки, с наружной оболочкой из теплостойкого поливинилхлоридного пластика. Допустимая температура эксплуатации — не более 100 °С. Область применения такая же, как для КНРПВ-М, только в условиях, где требуется заземление оплетки, а также в пожаро- и взрывоопасных зонах.

КНВПВТ — кабели нагревательные со стальной жилой, с изоляцией из теплостойкого пластиката, с лентой из фторопласта, с наружной оболочкой из теплостойкого пластиката. Допустимая температура эксплуатации — до 90 °С. Используется в условиях неподвижной прокладки для обогрева лестничных сходов, дорог, полов животноводческих помещений.

КНВПЭВТ — кабели нагревательные со стальной жилой, с изоляцией из теплостойкого пластиката с лентой из фторопласта, с оплеткой или обмоткой проволоками, с наружной оболочкой из теплостойкого поливинилхлоридного пластиката. Область применения та же, только в условиях, требующих по технике безопасности заземления оплетки или обмотки. Допустимая температура эксплуатации — 90 °С.

КНВВ — кабели нагревательные со стальной жилой, с изоляцией оболочкой из поливинилхлоридного пластиката. Допустимая температура эксплуатации не более 70 °С. Область применения: в условиях неподвижной прокладки для подогрева воды в водоводах, коллекторах и резервуарах.

КНВЭВ — кабели нагревательные со стальной жилой, с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, с оплеткой или обмоткой проволоками, с наружной оболочкой из поливинилхлоридного пластиката. Допустимая температура эксплуатации 70 °С. Используется там, где по требованиям техники безопасности необходимо заземление оплетки или обмотки.

КНМКП — кабели нагревательные с медной жилой, с изоляцией из кремнийорганической резины, в оболочке из полиэтилена или пропилена.

К общим техническим характеристикам вышеприведенных нагревательных кабелей следует отнести:

- строительная длина одножильного —  $105 \pm 3$  м;
- строительная длина двухжильного —  $55 \pm 5$  м;
- строительная длина для кабеля с медной жилой —  $500 \pm 50$  м.

Электрическое сопротивление 1 м токопроводящих жил, не более:

- из стальных проволок —  $0.5 \pm 10$  % Ом;
- из медных проволок —  $0.012 \pm 10$  % Ом.

Электрическое сопротивление изоляции жил 1 м кабелей — не менее 100 МОм.

Кабели выдерживают 10 изгибов по радиусу, равному не менее 5 наружных диаметров кабеля при температуре не ниже ми-

нус  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Общее время работы кабелей под токовой нагрузкой — не более 30 % суммарного времени эксплуатации. Кабели предназначены для эксплуатации при температуре окружающей среды от  $-50$  до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности воздуха до 100 % при температуре до  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Изделия устойчивы к воздействию воды и 20 % водного раствора поваренной соли. Прокладка кабеля производится при температуре не ниже  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Прокладка кабелей возможна по кирпичу, бетону, под слоем цементной стяжки (открыто и скрыто), под плитами, покрытиями дорожек, в стальных трубах. Кабели должны эксплуатироваться при условиях фиксированного монтажа, при расстоянии друг от друга не менее 25 мм. При этом длительно допустимая температура на поверхности оболочки кабеля не должна превышать  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; для кабеля марки КНМКП —  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 6.2. Средства и методы рационального энергопотребления в светотехнике

Около 10 % потребляемой электрической энергии расходуется на освещение, причем почти 80 % получаемой световой энергии генерируется разрядными источниками света, например люминесцентными лампами типов ЛД (ЛБ), ртутными лампами низкого и высокого давлений. Эти лампы функционируют вместе с пускорегулирующей аппаратурой (ПРА), которая для питающей сети составляет комплексную нагрузку с реактивной составляющей тока, обеспечивающую нормальную работу газоразрядной лампы. При этом питающая сеть загружается значительным реактивным током. Например, светильник ЛПО 1.40-20С с индуктивным балластом (рис. 6.6) при  $L_B = 1,24\text{ Гн}$ ,  $R_B \approx 38\text{ Ом}$ ,  $U_{сети} = 220\text{ В}$  нагружает однофазную сеть током с действующим значением  $I_d \approx 0,45\text{ А}$ .

$U_B^I$  — реактивная составляющая напряжения на балласте;

$U_B^{II}$  — активная составляющая напряжения на балласте.

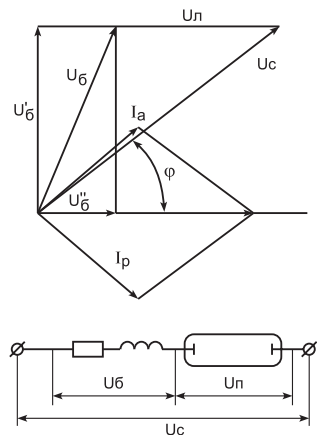


Рис. 6.6

Исходя из векторной диаграммы и схемы замещения (рис. 6.6):

$$\begin{aligned} U_B &= IZ_B = I\sqrt{R_B^2 + X_B^2} = 0.45\sqrt{R_B^2 + (\omega L)^2} = \\ &= 0.45\sqrt{38^2 + (314 \cdot 1.24)^2} \approx 138 \text{ В}; \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$U_L = \sqrt{U_C^2 + U_B^2} = \sqrt{220^2 - 172^2} \approx 138 \text{ В};$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_B}{U_L} \approx 50^\circ;$$

$$I_A = I \cdot \cos \varphi = 0.45 \cos 50^\circ \approx 0.28 \text{ А};$$

$$I_A = I \cdot \sin \varphi = 0.45 \sin 50^\circ \approx 0.34 \text{ А}.$$

Можно представить, что какое-нибудь административное здание, освещенное несколькими сотнями светильников, в каждом из которых минимум две лампы ЛБ-40, потребляет реактивный ток, составляющий по меньшей мере больше сотни ампер. Поэтому для снижения потерь радикальным методом является включение компенсаторов реактивной мощности, как, например, конденсаторных батарей, подключаемых параллельно нагрузке каждой фазы, непосредственно у вводно-распределительного устройства здания. Кроме этого, заводами-изготовителями ведется планомерная работа по совершенствованию ПРА (понижается составляющая  $U_B$ ), при сохранении необходимого всплеска напряжения на лампе в момент запуска. В настоящее время Воронежским заводом полупроводниковых приборов (АООТ «ВЗПП») идет интенсивное освоение и выпуск электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА) мощностью 1×11 Вт, 1×13 Вт. Он поставляет их в комплекте со светильниками ФПО 01-11-001 и с источником света СКЛЭ-13ТБ. Для люминесцентных ламп мощностью 18 Вт, 20 Вт, 36 Вт, 40 Вт разработаны ЭПРА следующих типов: 1×18 Вт, 2×18 Вт, 1×20 Вт, 2×20 Вт, 1×36 Вт, 1×40 Вт, 2×36 Вт, 2×40 Вт. Для натриевых ламп высокого давления типа ДНАТ и ртутных ламп типа ДРЛ разработаны ЭПРА: 1×50 Вт, 1×70 Вт, 1×100 Вт, 1×250 Вт. К сожалению, в связи с пока низким потребительским спросом на ЭПРА и, соответственно, небольшими объемами выпуска этих изделий цена их еще достаточно высока. В странах Западной Европы практически все люминесцентные светильники оборудуются электронными дросселями. В России наибольшее распространение по ряду обстоятельств получили электронные дроссели австрийского производ-

ства, отличающиеся высокими энергетическими показателями, компактностью и надежностью при эксплуатации.

Немалые возможности в плане экономии электроэнергии реализуются устройствами автоматического управления освещением улиц, мест общественного пользования, индивидуальных рабочих мест. Среди множества разработанных и освоенных в производстве отечественных приборов такого назначения фотореле для управления электроосвещением ФР-1М, ФР-94-3, ФР-7. Основные технические характеристики приведены в табл. 56 Приложения, на рис. 6.7 — габаритные и установочные размеры и схема подключения. Данные реле совершенно идентичны по габаритам, основным техническим характеристикам и условиям эксплуатации, кроме значения порога срабатывания в пределах освещенности.

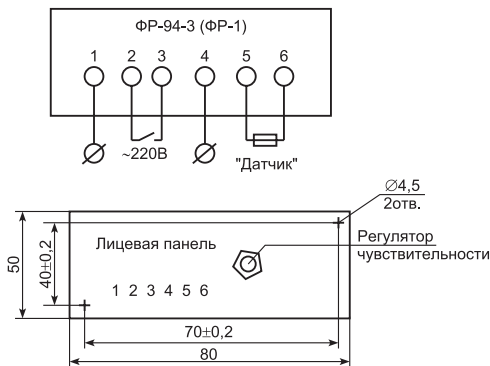


Рис. 6.7

Приборы поставляются совместно с фотодатчиком, который при установке выносится наружу таким образом, чтобы исключалось попадание прямых солнечных лучей на чувствительный элемент датчика.

Использование в светотехнике высокоэффективных источников света является весомым вкладом в обеспечение экономии электроэнергии. За последние годы отечественными и зарубежными производителями разработано и освоено в производстве множество современных энергосберегающих источников света. В табл. 58 Приложения приведены сравнительные параметры ламп широкого применения: уровень световой отдачи в ЛМ на один Вт потребляемой мощности и средний срок службы в часах при определении целесообразности применения того или иного

типа лампы. Кроме указанных параметров, необходимо руководствоваться стоимостью и, как следствие, сроком окупаемости устанавливаемого светотехнического оборудования. На сегодняшний день на рынке светотехнической продукции уже популярны компактные люминесцентные лампы, мощностью 5, 7, 9, 11 Вт различного исполнения с более высокой световой отдачей по сравнению с лампами накаливания 40—150 Вт.

Наряду с компактными лампами выпускаются многоканальные (4- и 6-канальные) компактные люминесцентные лампы мощностью 1, 15, 20, 23 Вт со встроенными электромагнитными ПРА. Благодаря многоканальной конструкции габариты ламп соизмеримы с габаритами ламп накаливания и по световой отдаче, и по сроку службы отличаются от последних в 5—8 раз, что, несомненно, обеспечивает экономию электроэнергии от их внедрения порядка 180 кВт/ч в год в расчете на одну лампу.

Помимо этого, за рубежом массово выпускаются линейные люминесцентные лампы в узких трубках диаметром 16 мм мощностью 35—54 Вт, маломощных 2—5 Вт в трубках сверхмалого диаметра 2—3 мм для использования в устройствах визуального отображения.

Несмотря на пока высокую стоимость электронных балластов для питания люминесцентных осветительных ламп, перспектива их применения очевидна. Начальные затраты на приобретение достаточно быстро компенсируются их высокой экономичностью, которая заключается:

- в уменьшении на 15—20 % потребления электроэнергии при сохранении светового потока за счет повышения светоотдачи лампы на повышенной рабочей частоте (от 20 до 100 кГц) и более высокого КПД относительно традиционной пуско-регулирующей аппаратуры;
- в снижении эксплуатационных расходов, связанных с заменой ламп и стартеров;
- в возможности дополнительной оптимизации электропотребления при работе в комплексных системах управления светом;
- в высоком качестве потребляемой электроэнергии (коэффициент мощности близок к единице благодаря потреблению почти синусоидального тока с нулевым фазовым сдвигом).

В настоящее время все большее применение находят металлогалогенные лампы малой мощности. Основные их достоинства: малые габариты, возможность различного исполнения ламп (софитное, биностовское во внешней колбе и др.), хорошие цветопе-

редающие свойства, большой срок службы, способность работать в условиях питания постоянным током. Последнее обстоятельство позволяет устранить много недостатков, возникающих при питании переменным напряжением.

Перспективным направлением в создании энергоэкономичных световых приборов является разработка и изготовление безэлектродных разрядных ламп на основе СВЧ-разряда, имеющих уровень параметров, особенно в части электропотребления, недостижимый для традиционных газоразрядных ламп. Например, световая отдача СВЧ-ламп составляет 120—140 лм/Вт, а срок службы 60—100 тыс. часов. Образцы таких ламп уже созданы отечественным предприятием ОАО «ЛИСМА-ВНИИС» мощностью 1000 и 3000 Вт.

### **6.3. Автоматизированные системы контроля и управления уровнем энергопотребления (АСКУЭ)**

Характерной особенностью настоящей структуры управления электроэнергетикой в современных условиях является создание и функционирование федерального оптового и розничного рынков электроэнергии. Существенно важным элементом инфраструктуры рынка сбыта электроэнергии является необходимость организации автоматизированного учета потребляемой электроэнергии и управление ее отпускном на базе комплекса технических средств, объединенных в автоматизированную систему коммерческого учета электроэнергии с функциями управления уровнем электропотребления (АСКУЭ). Госстандартом РФ утвержден тип средств измерений «Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии АСКУЭ-С» с включением в него основных применяемых в России средств (с учетом импортных), прошедших испытания на соответствие требований действующих в России стандартов, а также разработан ряд документов, касающихся вопросов метрологического обеспечения АСКУЭ.

В соответствии с нормативными документами, в частности — «Основные показатели и требования, учитываемые при оснащении и выборе программно-технических средств АСКУЭ», АСКУЭ, как иерархическая, интегрированная система, включает следующие уровни:

- АСКУЭ энергообъектов АО-энерго;
- АСКУЭ федеральных электростанций и подстанций;



- АСКУЭ АО-энерго (региональных);
- АСКУЭ ОЭС (объединенных электрических сетей);
- АСКУЭ МЭС (местных электрических сетей);
- АСКУЭ субъектов (промышленные предприятия, значимые потребители и т. д.).

Построение АСКУЭ на крупных объектах с большим количеством точек учета реализуется с помощью устройств сбора и передачи информации (УСПД), на которые собирается информация от счетчиков электроэнергии. В качестве УСПД используются комплектные устройства как отечественного, так и зарубежного производства: METS-МС и MEGADATA (Венгрия), FCL (Швейцария), ток-с, политариф-А, Сикон, Энергия, Поток, Пчела и т. д. Кроме этого, внедряются специализированные системы известных фирм АББ-ВЭИ «Метроника» и «Энелеко».

В настоящее время наибольший интерес представляет АСКУЭ субъектов: промышленных предприятий, жилищных комплексов, отдельных поселков, где управление и контроль потребления электроэнергии становятся предметом все большего внимания как со стороны ее производителей, так и со стороны потребителей.

Для примера рассмотрим подробнее АСКУЭ «Политариф-А», созданной на базе счетчиков, имеющих электросетевые модемы (ЭМС) для передачи данных по проводам силовой сети 0,4 кВ. Такая среда для передачи информации (распределенные силовые линии питания низкого, среднего и высокого напряжения) все активнее осваивается в настоящее время при построении систем контроля и сбора информации ввиду очевидных преимуществ перед другими методами передачи информационных потоков:

- минимальные капиталовложения, так как не требуется прокладки проводных линий связи;
- быстрота настройки коммуникационной сети передачи информации;
- практически неограниченное число вариантов конфигурации коммуникационной сети.

Как видно из типовой структурной схемы «Политариф-А» (рис. 6.8), основными элементами системы являются:

- счетчики трехфазные ЦЭ 2727М и однофазные ЦЭ2726 с встроенным ЭМС;
- устройства считывания и передачи данных УСПД с встроенными ЭМС различных модификаций. Наиболее распространены УПД-600 с множеством вариантов исполнений и при-

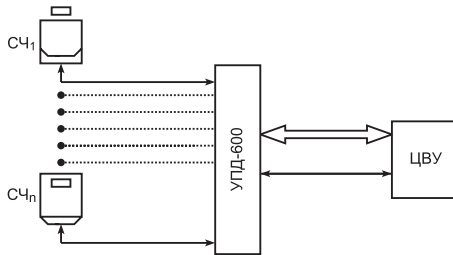


Рис. 6.8

меняются в зависимости от характера сосредоточения объектов измерений, соответственно, счетчиков;

- центральное вычислительное устройство (ЦВУ).

Счетчики ЦЭ 2727М и ЦЭ 2726М имеют цифровой выход, обеспечивают передачу информации через встроенные ЭМС на УПД-600. Передача по ЭМС осуществляется в диапазоне частот в соответствии со стандартом CENELEC EN 50065-1, коммуникационный канал полудуплексного типа со скоростью передачи по силовым линиям 220/380 В 600/1200 бад. Высокое качество передачи обеспечивается применением ESK — модуляции частоты несущей, при этом дальность передачи без промежуточной ретрансляции по скрытым (кабельным) силовым линиям достигает — 500 м, по воздушным (открытым) линиям — 2000 м, что наиболее приемлемо при использовании «Политарифа-А» в условиях концентрированного расположения потребителей электроэнергии. Информационное взаимодействие между счетчиками и УПД-600 осуществляется по протоколу «запрос-ответ», что позволяет постепенно отойти от преобладающего в настоящее время принципа «самообслуживания», особенно в сфере бытового электропотребления. Счетчики ЦЭ2727М и ЦЭ2726М, как первичное звено рассматриваемой АСКУЭ, внесены в Госреестр средств измерений Российской Федерации под №№ 19249—00, 17226—98, технические параметры и метрологические характеристики соответствуют требованиям ГОСТ Р 30206—94. Данная серия электросчетчиков построена на базе специализированных микроконтроллеров, обеспечивающих измерение потребляемой электроэнергии с нарастающим итогом. Наличие энергозависимой (фискальной) памяти позволяет долговременно хранить данные по потребляемой активной энергии и о запрограммированных параметрах (при исчезновении сетевого питания до 10 лет), а также вести «журнал событий».

Электросчетчики оснащены календарем и часами с точностью хода не хуже  $\pm 1$  с в сутки с возможностью коррекции, защитой от несанкционированного доступа и автоматической диагностикой работоспособности, что очень важно в условиях ужесточения принципов коммерческого учета электроэнергии.

Устройство считывания и передачи информации (УСПД) в рассматриваемом случае УПД-600 в составе АСКУЭ призвано выполнять следующие функции:

- удаленное считывание информации по интерфейсу ЭСМ со счетчиков электроэнергии;
- промежуточное хранение информации;
- передача информации по различным каналам связи по запросу ЦВУ;
- корректировка значений внутренних параметров счетчиков по инициативе ЦВУ;
- осуществление мониторинга состояния силовых сетей и счетчиков с фиксированием сбойных и нештатных ситуаций;
- передача команд управления нагрузкой на приборы учета и исполнительные коммутационные аппараты, установленные в силовой цепи.

УСПД располагает защитой от несанкционированного доступа как к аппаратной части, так и к программному обеспечению. Применительно к УПД-600 возможно подключение до 500 счетчиков с ЭСМ.

В общем случае к несомненным достоинствам «Политарифа-А» следует отнести:

- максимальную простоту схемы организации автоматизированного учета;
- наличие унифицированного протокола обмена;
- отсутствие необходимости дополнительного помещения для размещения оборудования основных узлов системы (только подстанция и квартира);
- высокую ремонтпригодность в связи с модульным принципом построения системы;
- отсутствие необходимости посещать жилые помещения для достоверного съема информации;
- возможность совмещения информационной системы учета воды, тепла при наличии автономного ЭСМ.

# **Глава 7**

## **Определение экономической эффективности разработки и применения технических решений по оптимизации энергопотребления в массовых электроустановках низкого напряжения**

К настоящему времени в России разработано и апробировано множество методик оценки эффективности применяемых технических решений, направленных на оптимизацию и снижение электропотребления в различных отраслях хозяйства. Вместе с тем оценка экономической эффективности в зависимости от конкретного оборудования может отражать возникновение побочных положительных факторов, например таких, как снижение потребления воды, потерь тепла, увеличение срока амортизации оборудования, уменьшение затрат на ремонт и эксплуатационное обслуживание.

Складывающаяся ситуация в промышленном производстве, жилищно-коммунальном хозяйстве постепенно укрепляет почву для четкого осознания необходимости заниматься разработкой и внедрением энергосберегающих технологий, особенно в энергоемких областях промышленности.

По опыту работы с предприятиями самым существенным и объективным обстоятельством, препятствующим проведению таких работ, является отсутствие у них «свободных» денег, особенно в регионах, удаленных от Москвы. Кроме того, очевидно, что большинство работ энергосберегающего направления, к сожалению, не являются малозатратными из-за достаточно высоких цен на комплектующие и оборудование. Значительную лепту вносит фактор слабой осведомленности руководителей и главных специалистов по данной проблематике и, как следствие, недоиспользование возможностей своего производства в деле достижения более высокой экономической эффективности.

Структура затрат на проведение опытно-конструкторских и внедренческих работ включает:

- проведение исследовательской работы в объеме, зависящем от вида и значимости технологического оборудования, и с целью поиска приемлемых технических возможностей для снижения потребления электрической энергии;
- определение и закупку необходимого оборудования и комплектующих;
- разработку и внедрение технических решений;
- обработку и анализ результатов испытаний или опытной эксплуатации;
- оформление технической документации;
- при необходимости, проведение аттестации технических средств с целью дальнейшего их производства.

Определение экономической эффективности технических решений по экономии электроэнергии рассмотрим на примере методики расчета экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода (ЧРП), разработанной в Московском энергетическом институте и утвержденной Министерством топлива и энергетики в 1997 г. и касающейся применения ЧРП в насосных станциях и центральных тепловых пунктах жилищно-коммунального хозяйства.

В соответствии с указанной методикой определение экономического эффекта производится на основе следующих измерений и расчетов.

1. Снимаются непосредственно на оборудовании насосной станции паспортные данные насоса и электродвигателя:

- номинальный напор насоса —  $H_{ном}$ , м.вод.ст.;
- номинальная производительность  $Q_{ном}$ , м<sup>3</sup>/час;
- КПД насоса номинальный —  $f\dot{A}_{ном.н}$ ;
- номинальная мощность электродвигателя —  $P_{ном}$ , кВт;
- КПД электродвигателя номинальный —  $f\dot{A}_{ном.д}$ .

2. В период максимального водопотребления (8—10 ч или 18—20 ч) измеряется действующий напор на входе насоса ( $H_{вх}$ ), на выходе насоса ( $H_{вых}$ ), на выходе в магистраль ( $H_{вых.дрос.}$ ). Замеры осуществляются с помощью штатных манометров, установленных в системе; в течение двух часов делается несколько измерений с последующим вычислением среднего значения этих трех параметров.

3. Измеряется средний часовой расход воды в течение суток ( $Q_{cp}$ , м<sup>3</sup>/час) по разнице показаний расходомера в начале  $Q_1$  и в конце  $Q_2$  контрольных суток:

$$Q_{cp} = \frac{Q_2 - Q_1}{24}. \quad (7.1)$$

4. Вычисляется минимально необходимый общий напор ( $H_{необх}$ ):

$$N_{необх} = CN + D, \quad (7.2)$$

где:  $N$  — число этажей самого высокого дома в районе, подключенном к данному насосу;  $C$  — коэффициент, принимающий значения 3 для стандартных домов, 3,5 — для домов повышенной комфортности; слагаемое  $D$  берется равным 10 для одиночных домов, 15 — для группы отдельно стоящих домов.

Кроме этого, необходимый напор должен быть скорректирован исходя из географической разности высот местности, так как это может соответствовать перепадам 15—20 м. Наиболее точным является определение разности высот между местом расположения насоса и самой высокой точкой приемника воды, подключенного к данной магистрали.

5. Определяется требуемый напор ( $H_{треб}$ ), обеспечиваемый регулируемым насосом:

$$H_{треб} = H_{необх} - H_{вх}. \quad (7.3)$$

В случае существенного изменения напора в подводящей магистрали (на входе насоса) значение  $H_{вх}$  следует брать минимальным.

$$H_{вх} = H_{вх \min}. \quad (7.4)$$

6. Рассчитывается требуемая мощность ЧРП для обеспечения  $H_{треб}$ :

$$P_{ПЧ} = (1,1 - 1,2) \frac{H_{треб} \times Q_{cp}}{367 \times \eta_n \times \eta_{ном.д}}. \quad (7.5)$$

КПД насоса  $\eta_n = k\eta_{ном.н}$ , где коэффициент  $k$  определяется по кривой (рис. 7.1) для расхода  $Q_{cp}$ , измеренного ранее и отнесенного к  $Q_{ном}$ .

7. Оценка годовой экономии электроэнергии ( $Ц_{ЭК}$ ) осуществляется по выражению:

$$Ц_{ЭК} = \Delta \mathcal{E}_{год} \times C_{\mathcal{E}} = \frac{(H_{ввх} - H_{необх}) \times Q_{cp}}{367 \times \eta_n \times \eta_{ном.д}} \times t_{год} \times C_{\mathcal{E}} \text{ (руб./год)}, \quad (7.6)$$

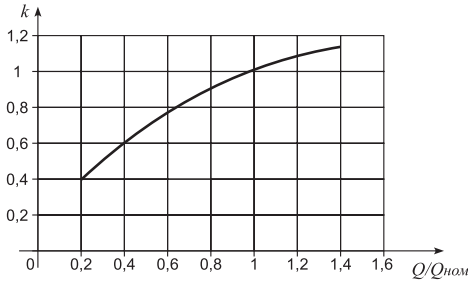


Рис. 7.1

где:  $\Delta \mathcal{E}_{год}$  — электроэнергия, сэкономленная за год, кВт/час;  $t_{год}$  — число часов работы оборудования в год;  $C_{\mathcal{E}}$  — цена 1 кВт/час электроэнергии.

8. Цена годовой экономии воды ( $\Pi_{\mathcal{E}B}$ ) за счет сокращения потерь:

$$\begin{aligned} \Pi_{\mathcal{E}B} &= \Delta B_{год} \times C_B = \\ &= 0,07 \frac{H_{вых.дросс} - H_{необх}}{10} \times Q_{cp} \times t_{год} \times C_B \text{ (руб./год)}, \end{aligned} \quad (7.7)$$

где:  $\Delta B_{год}$  — вода, сэкономленная за год, м<sup>3</sup>;  $C_B$  — стоимость 1 м<sup>3</sup> воды.

9. В случае передачи горячей воды потери тепла связаны с увеличением потерь горячей воды при повышенном напоре. Для типовых расчетов годовая экономия тепла  $\Pi_{\mathcal{E}T}$  за счет сокращения потерь горячей воды при наличии ЦТП или котельных, расход горячей воды принимается в размере 0,4 от общего расхода воды, подаваемой насосной станцией:

$$\Pi_{\mathcal{E}T} = \Delta \theta C_T = \Delta t \times 0,4 \times \Delta B_{год} \times 10^{-3} \times C_T \text{ (руб./год)}, \quad (7.8)$$

где:  $\Delta \theta$  — количество сэкономленного за год тепла, Гкал;  $\Delta t$  — расчетный перепад температуры перегрева горячей воды при нормативе 60 °С;  $C_T$  — стоимость одной гектокалории тепла для данного региона.

10. Ориентировочный срок окупаемости  $T_{ок}$  устанавливаемого частотно-регулируемого электропривода составит:

$$T_{ок} = \frac{\Pi_{Пч}}{\Pi_{\mathcal{E}K} + \Pi_{\mathcal{E}B} + \Pi_{\mathcal{E}T}}, \quad (7.9)$$

где:  $\Pi_{Пч}$  — стоимость преобразователя частоты с учетом проектно-конструкторских работ и монтажа.

Следует отметить, что возможно уменьшение срока окупаемости, если учесть снижение затрат на техническое обслуживание и увеличение срока амортизации оборудования.

## Список литературы

1. *Адкинс Б.* Общая теория электрических машин. М.: ГЭИ. 1960.
2. *Ильинский Н. Ф.* Энергосбережение в центробежных машинах средствами электропривода. Вестник МЭИ, 1995. № 1.
3. *Флоренцев С. Н., Ковалев Ф. И.* Современная элементная база силовой электроники // Электротехника, 1996. № 4.
4. *Розанов Ю. К., Флоренцев С. Н.* Электропривод и силовая электроника // Электротехника, 1997. № 11.
5. *Родин В. И.* Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро. М.: Энергоиздат, 1990.
6. *Изосимов Д. Б.* Новые подходы к синтезу цифрового управления в электроприводах переменного тока // Приводная техника. 11997, № 4, 5.
7. *Abbondanti A.* Method of flux control in induction motors driven by variable frequency, variable voltage supplies. Proc. IEEE IAS Int. Semicond. Power Conv. Conf., 177, 1977.
8. *Blaschke F.* Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR — Regelung von Asynchronmaschinen. Siemens — Zeitschrift, 1971, 45, 757.
9. *Blaschke F.* The principle of field orientation as applied to the new TRANSVECTOR closed-loop control system for rotating field machines. Siemens Rev., 1972, 217.
10. *Nabae A. et al.* An approach to flux control of induction motors operated with variable-frequency power supply. A. Nabae, K. Otrzuka, H. Uchida and R. Kurosawa. IEEE Trans. Ind. Appl. 1980. P. 342.
11. *Ермолин Н. П.* Электрические машины // М.: Высшая школа. 1975.
12. *Ильинский Н. Ф., Юньков М. Г.* Автоматизированный электропривод // М.: Энергоатомиздат. 1990.
13. *Луговой А. В.* К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника, 1999. № 5.
14. *Никитин В. М.* Управление моментом асинхронного двигателя в регулируемом электроприводе // Электротехника. 1996. № 12.



15. *Кочетков В. Д., Дацковский Л. Х. и др.* Системы регулирования электроприводов переменного тока с микропроцессорным управлением. Выпуск 26. М. 1989.
16. *Паздеев А. Д.* Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах.
17. *Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А.* Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1987.
18. Электронная техника в автоматике: Сб. статей/Под ред. Ю. И. Конева, М.: Радио и связь. 1985.
19. *Bose B. K.* Adjustable speed AC drives — a technology status review // Proc. IEEE, 1982. P.116.
20. *Садовский Л. А., Виноградов В. Л., Максимов А. А., Темирев А. П.* Развитие регулируемого электропривода с новыми типами машин переменного тока // Приводная техника, 2001, № 2.
21. *Мошинский Ю. А., Петров А. П.* Анализ схем включений трехфазных асинхронных двигателей при питании от однофазной сети // Электротехника. 1999, № 9.
22. *Мошинский Ю. А., Петров А. П.* Математические модели трехфазных асинхронных двигателей, включенных в однофазную сеть // Электричество. 2000, № 2.
23. *Сазонов В. Г., Метельков В. П.* Оптимизация параметров электроприводов механизмов циклического действия. Автоматизированный электропривод. М.: Энергоатомиздат, 1990.
24. *Исаев И. Н., Сазонов В. Г.* Электропривод механизмов циклического действия. М.: Энергоатомиздат, 1994.
25. Электротехнический справочник. Т. 3, М.: Энергоатомиздат. 1986.
26. *Банди Б.* Методы оптимизации. Вводный курс / Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1986.
27. Силовые полупроводниковые приборы. Пер. с англ. / Под редакцией В. В. Токарева. Первые издания. Воронеж, 1995.
28. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники в 2-х томах. М.: Высшая школа, 1978.

# Приложение

Таблица 1. Значения КПД электродвигателей серий 5А, АИ, АЗ0, 4АМ

Р, кВт	КПД, %, при числе полюсов															
	2р = 2				2р = 4				2р = 6				2р = 8			
	5А	АИ	АЗ0	4АМ	5А	АИ	АЗ0	4АМ	5А	АИ	АЗ0	4АМ	5А	АИ	АЗ0	4АМ
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61	61	-	-
0,37	-	-	-	-	-	-	-	65	65	70	-	61	61	-	-	-
0,55	-	-	-	-	72	71	74,4	-	68,5	68,5	71	-	64	64	-	-
0,75	79	78,5	78,2	-	75	75	76,2	-	71	70	72,1	67	75	75	-	-
1,1	80	79,5	80	73	75	75	79	76	74,5	74	74,2	68	77	77	-	-
1,5	81	81	81	82	78	78	80,3	78	76	76	76,5	-	76	76	-	-
2,2	83	83	83	83	81	81	81	-	81	81	80	-	76,5	76,5	-	76,5
3	84,5	84,5	82,5	-	82	82	81,5	-	81,5	81,5	-	81	79	79	-	79
4	87	87	84	-	85	85	84	-	82,5	82,5	-	82	83	83	-	83
5,5	88	88	85	83,5	86	86	-	85,5	85	85	-	85	83,5	83,5	-	83
7,5	88,5	88	-	85	87,5	87,5	-	87,5	86	85,5	-	85,5	87	87	-	-
11	89	88	-	88	89	88,5	-	87,5	88	88	-	-	87,5	87,5	-	-
15	90,5	90	-	-	90	90	-	-	88	88	-	-	89	89	-	-



**Таблица 2. Привязка рядов мощности и высоты оси вращения для АД основного исполнения серии 5А**

H, мм		Мощность, кВт, при числе полюсов						DN, мм
		2	4	6	8	10	12	
71	MA	0.75	0.55	0.37	—	—	—	116
	MB	1.1	0.75	0.55	0.25	—	—	
80	MA	1.5	1.1	0.75	0.37	—	—	131
	MB	2.2	1.5	1.1	0.55	—	—	
90	L	3	2.2	1.5	0.75 1.11	—	—	149
100	S	4	3	—	—	—	—	168
	L	5.5	4	2.2	1.5	—	—	
112	M	7.5	5.5	3	2.2	—	—	191
				4	3			
132	S	—	7.5	5.5	4	—	—	225
	M	11	11	7.5	5.5	—	—	
160	S	15	15	11	7.5	—	—	260
	M	18.5	18.5	15	11	—	—	
180	S	22	22	—	—	—	—	295
	M	30	30	18.5	15	—	—	
200	M	37	37	22	18.5	—	—	327
	L	45	45	30	22	—	—	
225	M	55	55	37	30	—	—	368
250	S	75	75	45	37	22	—	437
	M	90	90	55	45	30	—	
280	S	110	110	75	55	37	—	490
	M	132	132	90	75	45	—	
315	S	160	160	110	90	55	45	530
	M	200	200-	132	110	75	55	
355	S	250	250	160	132	90	75	590
	M	315	315	200	160	110	90	

**Таблица 3. Привязка рядов мощностей и высоты оси вращения АД основного исполнения серии 5АН**

H, мм	Мощность, кВт, при числе полюсов						DН, мм
	2	4	6	8	10	12	
200 M L	55	45	30	22	–	–	327
	75	55	37	30	–	–	
225 M	90	75	45	37	–	–	368
250 S M	110	90	55	45	–	–	430
	132	110	75	55	–	–	
280 S M	160	132	90	75	45	–	530
	200	160	110	90	55	–	
315 S M	–	200	132	110	75	55	590
	250	250	160	132	90	75	

**Таблица 4. Основные энергетические характеристики электродвигателей серии 5А (А)**

Высо- та оси враще- ния	n = 3000 об/мин			n = 1500 об/мин			n = 1000 об/мин			n = 750 об/мин		
	Мощ- ность, кВт	КПД, %	cos φ	Мощ- ность, кВт	КПД, %	cos φ	Мощ- ность, кВт	КПД, %	cos φ	Мощ- ность, кВт	КПД, %	cos φ
71	0.75	74	0.83	0.55	72	0.8	0.37	64	0.72	0.25	56	0.65
71	1.1	77	0.86	0.75	75	0.75	0.55	67	0.7	0.37	59	0.59
80	1.5	79	0.87	1.1	77	0.8	0.75	71	0.7	0.55	69	0.62
80	2.2	82	0.87	1.5	78.5	0.8	1.1	72	0.72	0.75	67	0.6
90	3.0	82	0.86	2.2	78	0.82	1.5	72	0.71	1.1	72	0.68
100	4.0	83	0.84	3.0	78	0.8	2.2	78	0.76	1.5	75	0.71

Продолжение табл. 4

Высота оси вращения	n = 3000 об/мин			n = 1500 об/мин			n = 1000 об/мин			n = 750 об/мин		
	Мощность, кВт	КПД, %	cos φ	Мощность, кВт	КПД, %	cos φ	Мощность, кВт	КПД, %	cos φ	Мощность, кВт	КПД, %	cos φ
100	5.5	84	0.86	4.0	83	0.78	3.0	83	0.79	2.2	75	0.75
112	7.5	87	0.89	5.5	87	0.85	4.0	84	0.8	3.0	78	0.73
132	11.0	87	0.88	7.5	88	0.83	5.5	83	0.82	4.0	79	0.76
160	15.0	88	0.86	11.0	87	0.88	7.5	84.5	0.77	5.5	80	0.76
160	18.5	90	0.88	15.0	89	0.87	11.0	87	0.82	7.5	86	0.73
180	22.0	90.5	0.89	18.5	90	0.89	15.0	89	0.82	11.0	87	0.75
180	30.0	92	0.89	22	91	0.88	18.5	89	0.86	15.0	86.5	0.76
200	37	91.5	0.88	30	91	0.89	22.0	87	0.84	18.5	88	0.8
200	45	92	0.9	37	92	0.87	30	89.5	0.86	22	88.5	0.77
225	55	93.5	0.9	45	92	0.87	37	91	0.89	30	90	0.8
250	75	94	0.89	55	92.5	0.87	45	92	0.87	37	91	0.8
250	90	94	0.9	75	93	0.82	55	92.5	0.88	45	91.5	0.77
280	110	93	0.91	90	93	0.87	75	93.5	0.87	55	92.5	0.8
280	132	93	0.91	110	93	0.91	90	94	0.88	75	93.3	0.81
315	160	95.8	0.92	132	93	0.91	110	94	0.88	90	93.5	0.81
315	200	96.1	0.93	160	95	0.87	132	95	0.88	110	94.5	0.81

Таблица 5. Основные технические характеристики асинхронных электродвигателей для параметрического регулирования

Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт	Тип	Масса IM B3, кг	Частота вращения, об/мин	КПД, %	Коеф. мощности cos φ	Ток при 380 В, А	Ипуск, Inom	Мпуск, Mном	Мощность на валу, кВт
80	1.5	A80A2PД	18	2790 2050 1500	78	0.79	3.7 4.3 4.1	6.1	5.0	0.7 0.3
80	2.2	A80B2PД	20	2770 2050 1500	78	0.79	5.4 5.7 5.6	6.0	4.8	1.85 0.3
112	4.0	RA112M2PД	51	2865 2100 1500	84	0.88	8.0 0.7	7.0	3.1	
160	5.5	4AMH160SA2PД	115	2700 2100 1500 900	75.0	0.81		4.0	3.0	4.7 1.6 0.4
160	7.5	4AMH160SB2PД	115	2550 2100 1500 900	73.0	0.77	20 21 17 14	4.0	2.8	4.7 1.6 0.4



Продолжение табл. 5

Высота оси вращения, мм	Мощность, кВт	Тип	Масса ИМ ВЗ, кг	Частота вращения, об/мин	КПД, %	Коэф. мощности cos φ	Ток при 380 В, А	Ипуск, Ином	Ипуск, Ином	Мощность на валу, кВт
160	11	4АМН160МН2РД	140	2850	83	0.78	25	5.2	4.2	5.4
				2100			36			1.8
				1500			30			0.5
				900			24			
180	15	4АМН160МА2РД	150	2820	80.0	0.73	40	5.5	4.4	8.5
				2100			46			3.8
				1500			44			1.7
				900			43			
180	18.5	4АМН180SH2РД	185	2810	84	0.77	43	6.5	5.0	5.8
				2100			38			2.0
				1500			34			0.55
				900			26			
180	22	4АМН180S2РД	195	2865	80	0.69	60	5.5	4.7	7.9
				2100			58			3.3
				1500			53			1.5
				900			51			
180	22	4АМН180S4РД		2820	85	0.70	56	5.6	4.2	13.5
				1350			46			10.5
				1230			49			

Таблица 6. Сравнительные характеристики электродвигателей серий АД и 4АМС

Тип электро-двигателя	Режим работы	P2, кВт	п, об/мин	КПД, %	cos φ	Мп/Мн	Мм/Мн	Ip/In	ΔTt °C/c
АД90L2	ПВ100%	3.0	2835	84	0.88	3.0	3.1	7.0	11.9
	ПВ 40%	3.5				2.6	2.7	6.0	11.9
4АМС90L2	ПВ 40%	3.5	2825	80	0.86	2.0	2.2	6.0	12.4
	ПВ100%	1.5	930	75	0.72	2.4	2.6	4.5	7.1
АД90L6	ПВ 40%	1.7				2.1	2.3	4.0	7.1
	ПВ 40%	1.7	940	71	0.72	1.9	1.9	6.0	11.0

Таблица 7а. Общие характеристики преобразователей частоты

№ п/п	Параметры основных характеристик	GE	SIEMENS	FUJI	ABB
1	Диапазон напряжения питания (В)	200–230 50/60 Гц; 380–460 50/60 Гц	230 В AC; 380–575 В AC; 50/60 Гц	200–230 50/60 Гц; 380–400 50/60 Гц; 380–460 50/60 Гц	380–500 50/60 Гц
		0.4–22 0.75–315 0.75–315 0.75–315	0.25 – 3 0.25 – 37 0.25 – 37 0.25 – 37	0.4 – 22 0.75 – 220 0.75 – 220 0.75 – 220	37/46–200/250 2.2/3–45/55 3/4 – 75 45/55–250/315
2	Мощность двигателя (кВт)	3-фазный/220 В	0.25 – 3	0.4 – 22	
		3-фазный/380 В	0.25 – 37	0.75 – 220	
		3-фазный/440 В	0.25 – 37	0.75 – 220	
	3-фазный/460 В	0.25 – 37	0.75 – 220		45/55–250/315
	3-фазный/500 В		0.25–38		45/55–250/315

Продолжение табл. 7а

№ п/п	Параметры основных характеристик	GE	SIEMENS	FLUI	ABB	
3	Ступенчатое изменение скорости для вентиляторов/насосов (переменный вращающий момент)	Да	Да	Да	Да	
4	Запас по перегрузке	150% 60 с	150% 60 с	150% 60 с	150% 60 с	
5	Блокировка мощности через					
	Транзистор	IGBT	IGBT	IGBT	IGBT	
	Управление	PWM	PWM	PWM	PWM	
	Вектор потока	Нет	Да	Нет	Нет	
6	Несущая частота модуляции, кГц	3–12	2,4–26	2–6/10/15	3	
7	Выходная частота, Гц	0.1 – 440	1 – 650	0.2 – 400	0 – 250	
8	Разрешение по частоте	0.02	0.01			
9	Клавиатура и дисплей	Дисплей	4 цифры, 7 сегм.	4 цифры, 7 сегм. (Гр-й д)	20 символов	
		Состояние светодиодов	8	4		
		Клавиши	8	7	7	
10	Условия эксплуатации	Температура	0–50 °С	–10–40 °С	0–40 °С	
		Влажность	90%	20–90%	96%	95%
		Высота, м	1000	1000	1000	1000
	Вибрация	3 м/с <sup>2</sup>		5.8 м/с <sup>2</sup>		

Таблица 76

№ п/п	Параметры основных характеристик		TELEMES	AT-01	АРДН (Универсал)	НПАСНИ J100	Emotron «Vectorflux»	
1	Диапазон напряжения питания (В)	3-фазный/220 В	380–460В 50/60Гц	380В 50Гц	380В 50/60Гц	220–240 В 200–220 В 380–460 В 50/60 Гц	380 В 50/60 Гц	
2			Мощность двигателя (кВт)	2.2/3–220/250	15–320	1.5–30	0.2–5.5	
				2.2/3–220/250			1.5–75	
				2.2/3–220/250			1.5–75	
				2.2/3–220/250			1.5–75	
3		3-фазный/500 В						
3	Ступенчатое изменение скорости для вентиляторов/насосов (переменный вращающий момент)	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да	
4	Запас по перегрузке		150% 60 с	1.2н 120 с			150% 60с	
5	Блокировка мощно-сти через	Транзистор	IGBT	IGBT	IGBT	IGBT	IGBT	
		Управление	PWM	PWM	PWM	PWM	PWM	
		Вектор потока	Да	Нет	Да	Да	Да	Да
6	Несущая частота модуляции, кГц	2–10	3.9	8		2–10	до 25	
7	Выходная частота, Гц	0.1–400/200	1–100	1.5–100		0–100	до 2000 Гц	
8	Разрешение по частоте		0.1	1		0.01	0.01	

Продолжение табл. 7б

9	Клавиатура и дисплей	Дисплей	Дисплей на жидких кристаллах	4 цифр, 7 сегм.	Стрелочн. индикатор FM	Дисплей на жидких кристаллах	
		Состояние светодиодов	3	9	8		
10	Условия эксплуатации	Клавиши	20	12	6	10	
		Температура	0–40 °С	1–40 °С	0–40 °С	–10–+50 °С	0–45 °С
		Влажность	93%	< 90%	65% при 20 °С	20–90%	20–90%
		Высота, м	1000	1000	1000	1000	3000
		Вибрация					

Таблица 8а. Возможности управления отображением информации преобразователей частоты

№ п/п	Параметры основных характеристик						
	GE	OMRON	SIEMENS	FUJI	ABB		
1	Выходная частота	Гц	Да	Да	Да	Да	Да
		%	Да	Нет	Да		
		Произвольная шкала	Да	Да	Да	Да	Да
2	Установка частоты	Гц	Да	Да	Да	Да	
		%	Да	Нет	Да		
		Произвольная шкала	Да	Нет	Нет		

Продолжение табл. 8а

№ п/п	Параметры основных характеристик		GE	OMRON	SIEMENS	FUJI	ABB	
	A						Да	Да
3	Ток двигателя	%	Да	Да	Да	Да	Да	Да
		%	Да		Да			
4	Перегрузка	сек	Нет		Нет			
		С	Да		Нет		Да	Да
5	Температура радиатора		Да		Нет	Нет	Да	Да
6	Напряжение пост. тока	В	Да	Да	Нет	Да	Да	Да
7	Выходное напряжение переменного тока	В	Да	Да	Нет	Да	Да	Да
8	Мощность двигателя			Нет	Да	Нет		Да
9	Вращающий момент двигателя		Да		Да	Да	Да	Да
10	Рассеиваемая мощность, кВт		Нет		Нет	Нет	Да	Да
11	Состояние ввода/вывода		Да	Да	Нет	Да		
12	Буфер последней неисправности			Да	Нет	Нет	Да	
13	Автоматический режим	Номер шага	Да		Нет	Нет		
		Время	Да		Нет	Нет		
14	Воспроизведение реальной скорости		Вариант		Нет	Вариант ?		

Таблица 86

№ п/п	Параметры основных характеристик		TELEMES	AT-01	АРДН Универсал	НИТАСНІ J100	Emotron «Vscroftilus»
1	Выходная частота	Гц	Да	Да	Да	Да	Да
		%	Да		Да	Да	Да
		Произвольная шкала	Да				
2	Установка частоты	Гц	Да	Да	Да	Да	Да
		%	Да		Да	Да	Да
		Произвольная шкала	Да				
3	Ток двигателя	A	Да	Да	Нет	Да	Да
		%	%	Да	Нет	Нет	
4	Перегрузка	%		Нет	Нет		Да
		сек		Нет	Нет		
5	Температура радиатора	C	Да	Нет	Нет		
6	Напряжение пост. тока	B	Да	Да	Нет	Да	Да
7	Выходное напряжение переменного тока	B	Да	Нет	Нет	Да	Да
8	Мощность двигателя			Нет	Нет		
9	Вращающий момент двигателя			Нет	Нет		Да
10	Рассеиваемая мощность, кВт			Да	Нет	Да	Да
11	Состояние ввода/вывода		Да	Нет	Нет	Да	Да
12	Буфер последней неистправности		Да	Нет	Нет		
13	Ав-й режим	Номер шага		Нет	Нет		
		Время		Нет	Нет		
14	Воспроизведение реальной скорости			Нет	Нет		

Таблица 9а. Возможности управления вводом-выводом в преобразователях частоты

№ п/п	Параметры основных характеристик	GE	OMRON	SIEMENS	FUJI	ABB
1	Клавიაтурой/дисплеем	Да	Вариант	Да	Да	
		Нет		Нет	Нет	
	Аналоговый сигнал	Да	Да	Да	Да	Да
		Да	Вариант	Нет	Вариант 0,4–22 кВт	
	Установка частоты	Да	Да	Да	Да	Да
Установкой параллельных цифровых сигналов	Да (вариант)		Нет	Нет		
2	Потенциометром	10 В питания	15 В питания	Да	10 В питания	10В
	Командой UP/DOWN	Да		Нет	Нет	
3	Аналоговые входы	3		2	2	
		2 прогр.	1 прогр.	1 прогр.	1	2 прогр.
4	Цифровые входы	3+5 прогр.	4+4 прогр.	5 прогр.	6+5 прогр.	6 прогр.
		1R+(1R+1T) прогр.	1R+2T прогр.	2 прогр.	2R+5T	3R прогр.
5	Выход источника питания +24 В	Да (вариант)	Да (вариант)	–	?	Да
		Да (вариант)	Да (вариант)	Да	?	Да
7	Последовательный интерфейс	Другие		Profibus	?	



Таблица 96

№ п/п	Параметры основных характеристик		TELEMES	AT-01	АРДН (Универсал)	НИТАСНІ J100	Emotron «Vectorflux»
1	Установка частоты	Клавиатурой / дисплеем	Да	Да	Да	Да	Да
		Аналоговым сигналом	0–5 В	Нет	Нет	Нет	Нет
	0–10 В		Да	Нет	Да	Да	Да
	±10 В		Вариант	Нет	Нет	Нет	Нет
Установка параллельных цифровых сигналов	0.4–20 мА	Да	Нет	Да	Да	Да	Да
	Потенциометром	Установкой параллельных цифровых сигналов		Нет	Нет	Да	Да
		10В	Да	Да	Да	Да	Да
2	Аналоговые входы	Командой UP/DOWN	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
		2	2	1	3	1	3
3	Аналоговые выходы	2 прогр.	2 прогр.	Нет	1	1	3
4		4 прогр.	4 прогр.	2 прогр.	4 прогр.	6 прогр.	4
5	Цифровые выходы	2R+2T	2R+2T	3 прогр.	6 прогр.	1	3
6		Выход источника питания +24 В	Да	Да	Нет	Нет	Нет
7	Последовательный интерфейс	RS232		Да	Нет	Нет	Нет
		RS422/485	Да (вариант)	Нет	Нет	Нет	Да
		Другие	UNI-TE Modbus...	Нет	Нет	Нет	Нет

Таблица 10а. Средства защиты электродвигателей в преобразователях частоты

№ п/п	Параметры основных характеристик	GE	OMRON	SIEMENS	FUJI	ABB
1	Ограничитель тока	50–300%	30–200%	до 250%	Да	0.5–2In
2	Ограничитель напряжения	Да		Да	Да	
3	Ошибка процессора	Да		–	Да	
4	Выход из строя преобразователя	Нет	Да	Нет	Да	
5	Перегрузка по току	300%	200%	Да	Да	3.57In
6	Перегрев	Да	Да	Да	Да	Да
7	Перегрузка	Да	Да	Да	Да	Да
8	Короткое замыкание выхода	Да		Да	Да	
9	Неисправность заземления	Вариант	Да	Нет	Да	
10	Ошибка ввода/вывода	Да		Да		
11	Сбой преарядки	Нет		Нет		
12	Застопоренный ротор	Нет		Нет	Да	Да
13	Ошибка DBR	Нет	Да	Нет		

Таблица 106

№ п/п	Параметры основных характеристик	TELEMES	AT-01	АРДН (Универсал)	НПАСНІ J100	Emotron «Vestrolux»
1	Ограничитель тока		Да	Да	Да	Да
2	Ограничитель напряжения		Да	Да	Да	Да
3	Ошибка процессора				Да	Да
4	Выход из строя предохранителя		Нет	Нет	Нет	Нет
5	Перегрузка по току		Да	Да	Да	Да
6	Перегрев	Да	Нет	Да	Да	Да
7	Перегрузка	Да	Нет	Да	Да	Да
8	Короткое замыкание выхода	Да	Да	Да	Да	Да
9	Неисправность заземления	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
10	Ошибка ввода/вывода		Да	Да	Да	Да
11	Сбой предзарядки	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
12	Застопоренный ротор		Да	Да	Да	Да
13	Ошибка DBR	Да	Нет	Нет	Нет	Нет



Таблица 12. Соотношение мощности и габаритных размеров преобразователей частоты SILCOVERT TS

Тип	Мощность двигателя, кВт	Входной ток, А	Входное напряжение, В	Габариты, мм (Ш×В×Г)
SVTS 003	1.5	3.8	переменное трехфазное от 380 – 15% до 460 + 10% 47 – 63 Гц или постоянное от 510 – 15% до 650 + 10%	200×335×172
SVTS 004	2.2	5.6		200×335×172
SVTS 006	4.0	9.5		200×335×172
SVTS 008	5.5	12		200×335×172
SVTS 011	7.5	16		200×335×172
SVTS 015	9.2	21		200×335×172
SVTS 022	15	32		200×335×172
SVTS 028	18.5	40		240×614×308
SVTS 033	22	48		240×614×308
SVTS 042	30	61		240×773×308
SVTS 052	37	76		240×773×308
SVTS 062	45	90		240×773×308
SVTS 076	55	110		240×954×358

Таблица 13. Основные параметры преобразователей частоты фирмы «OMRON»

Основные параметры	Тип преобразователя частоты						
	3G3LV	3G3PV	3G3NV	3G3FV	3G3MV	3G3RV	
Диапазон мощностей, кВт	0,1...4	0,1...300	4...300	4...300	0,1...7,5	3G3RV	0,4...300
Входное напряжение, В	3ф, 380–460 1л 3ф, 220	3ф, 380–460 1л 3ф, 220	3ф, 380–460 1л 3ф, 220	3ф, 380–460 1л 3ф, 220	3ф, 380–460 1л 3ф, 220	3ф, 380–460 1л 3ф, 220	3ф, 380–460 1л 3ф, 220
Выходная частота, Гц	0,1...400	0,1...120	0,1...400	0,1...400	0,1...400	0,1...400	0,1...400
Время разгона/торможения, с	0...999	0...999	0...3600	0...3600	0...999	0...999	0...999
Число фиксированных заданий частот	8	–	–	–	16	–	–
Число аналоговых программируемых входов задания скорости	1	2	1	1	2	2	2
Число импульсных входов задания скорости	–	–	–	–	1	1	1
Число дискретных входов	5	7	6	7	7	7	7
Число дискретных выходов	1	3	2	4	3	3	3
Число аналоговых выходов	1	2	1	2	1	2	2
Управление по шине ModBUS	RS-485 422	RS-485 422	RS-485 422	RS232 485 422	RS-485 422	RS-485 422	RS-485 422
Модель управления	U/F	U/F	U/F	U/F/Vk	U/F/Vk	U/F/Vk	U/F/Vk
ПИД-регулятор	–	–	+	+	+	+	+
Число параметров настройки	48	64	108	178	178	178	178
Функции энергосбережения	–	–	+	+	+	+	+

Таблица 14а. Реализуемые функции в преобразователях частоты

№ п/п	Параметры основных характеристик		GE	OMRON	SIEMENS	FUJI	ABB	
	Ручное	Автоматическое					Да	Да
1	Усилие вращающего момента	Ручное	Да, до 20%		Да	Да	Да	Да
		Автоматическое	Да, до 20%	Да	Да	Да	Да	Да
2	Квадратичность (вентиляторы, насосы)		Да		Да	Да		
3	Компенсация сдвига фазы		Да, до 5%	0–99%	Да	Да	Да	Да
4	Динамическое частотное торможение		Вариант	Да	Вариант	Да		
5	Автозапуск		Да		Да	Да	Да	Да
6	Ступенчатая настройка частоты		Да	Да	Да			
7	Повторный запуск		до 10	до 10	Нет	Да		
8	Блокировка функций		Да	Да	Да	Да	Да	Да
			Параметры	Да	Да	Да	Да	Да
			Клавиатура	Да	Да			
	Обратный ход	Да	Да	–	Да			

Таблица 146

№ п/п	Параметры основных характеристик		ТЕЛЕМЕС	АТ-01	АРДН (Универсал)	НІТАСНІ J100	Emotron «Vectorflux»
	Усилie вращающего момента	Ручное Автоматическое					
1		Ручное	Да	Нет	Да	Да	Да
2		Автоматическое	Да	Да	Да	Да	Да
3		Квадратичность (вентильторы, насосы)	Да	Да	Да	Да	Да
4		Компенсация сдвига фазы	Да	Да	Да	Да	Да
5		Динамическое частотное торможение	Да	Да	Да	Да	Да
6		Автозапуск		Нет	Да	Да	Да
7		Степенчатая настройка частоты		Да	Да	Да	Да
8		Повторный запуск		Нет	Да	Да	Да
	Блокировка функций	Параметры		Да	Да	Да	Да
		Клавиатура		Да	Да	Да	Да
		Обратный ход		Да	Да	Да	Да



Таблица 15а. Основные технические характеристики преобразователя частоты серий АП-100 и ПЧ-30

Модель	Мощность двигателя (M=const), кВт	Номинальный ток, А	Выходное напряжение, В	Выходная частота, Гц	Входное напряжение, В
АП-120-0.4К	0.4	3			
АП-120-0.75К	0.75	5			
АП-120-1.5К	1.5	8	3 × 0 ... 220 В		200–230 В 50 Гц ± 5%
АП-120-2.2К	2.2	11			
АП-120-3.7К	3.7	17			
АП-140-0.75К	0.75	2.5			
АП-140-1.5К	1.5	4			
АП-140-2.2К	2.2	6			
АП-140-3.7К	3.7	9			
АП-140-5.5К	5.5	14		0–400 Гц	3 × 380 В 50 Гц ± 5%
АП-140-7.5К	7.5	18			
АП-140-11К	11	24	3 × 0 ... 380 В		
АП-140-15К	15	30			
АП-140-18.5К	18.5	39			
АП-140-22К	22	45			
АП-140-30К	30	61			
АП-140-37К	37	73			
АП-140-45К	45	87			
АП-140-55К	55	110			

Таблица 15б

Параметры основных характеристик преобразователя частоты ПЧ-30	Значение параметра
Номинальный ток нагрузки	63 А
Питание	3-х фаз. 380 В
Диапазон регулирования частоты	5–60 Гц
Диапазон регулирования скорости	1+ 10
Номинальная мощность электродвигателя	32 кВт
Полная мощность инвертора	46 кВт
Габаритные размеры	560×370×338 мм
Масса, не более	40 кг

Таблица 16. Перечень параметров для задания пользовательской характеристики «Напряжение-частота»

№	Наименование параметра	Дискретность задания	Диапазон задания	Заводская установка
1	Максимальная выходная частота	0,1 Гц	от 50 до 400 Гц	60 Гц
2	Максимальное напряжение	0,1 В	от 0,1 до 700 В	250 В
3	Частота максимального напряжения	0,1 Гц	от 0 до 400 Гц	60 Гц
4	Средняя выходная частота	0,1 Гц	от 0 до 400 Гц	3 Гц
5	Среднее напряжение выходной частоты	0,1 В	от 0 до 400 В	15 В
6	Минимальная выходная частота	0,1 Гц	от 0,1 до 10 Гц	1,5 Гц
7	Минимальное напряжение выходной частоты	0,1 В	от 0 до 100 В	20 В

Таблица 17. Технические характеристики инверторов серии 3G3NV

Серия	3G3NV A	3G3NV B
Максимальная мощность двигателя, кВт	3.7, 4.0, 5.5, 7.5, 11, 15	18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 110, 160, 185, 220, 300
Максимальное выходное напряжение	3-фазное, 380/400/415/440/460 В (пропорционально входному напряжению)	
Номинальная выходная частота	возможно программирование до 400 Гц	
Номинальное входное напряжение и частота	3-фазное, 380/400/415/440/460 В 50 Гц/60 Гц	
Допустимые колебания напряжения	$\pm 10\%$ – 15%	
Допустимые колебания частоты	$\pm 5\%$	
Метод управления	Синусоидальный ШИМ	
Диапазон изменения частоты	от 0.1 до 400 Гц	
Точность частоты	Цифровое задание: 0.01%, +14°F до +104°F, -10°C до +40°C Аналоговое задание: 0.1%, 77°F±18°F, 25°C±10°C	
Частотное разрешение	Цифровое задание: 0.1 Гц Аналоговое задание: 0.06 Гц/60 Гц	
Разрешение выходной частоты	0.01 Гц	
Перегрузочная способность	150% от номинального выходного тока в течение 1 минуты	120% от номинального выходного тока в течение 1 минуты
Сигнал задания частоты	от 0 до 10В (20 кОм), от 4 до 20 мА (250 Ом) 0±10 В	
Время разгона и торможения	0.1 до 3600 с (время разгона и торможения задаются раздельно)	
Тормозной момент	Приблизительно 20%(приблизительно 125% с тор- мозным резистором)	Приблизительно 20%
Число стандартных U/I характеристик	Доступно 15 стандартных характеристик напряжение – частота, 1 ручная пользовательская установка с ограничением напряжения, 1 ручная пользовательская установка без ограничения напряжения	

Продолжение табл. 87

Серия	3G3NV A	3G3NV B
Защита перегрузки двигателя	Электротермическое реле перегрузки	
Мгновенный выброс тока	Двигатель останавливается по инерции при токовом превышении 200% от номинального	Двигатель останавливается по инерции при токовом превышении 180% от номинального
Перегрузка	Двигатель останавливается по инерции за 1 минуту при токе 150% от номинального	Двигатель останавливается по инерции за 1 минуту при токе 120% от номинального
Перенапряжение	Двигатель останавливается по инерции, если напряжение на выходе выпрямителя достигает 820 В	
Нехватка напряжения	Двигатель останавливается по инерции, если напряжение на выходе выпрямителя опускается до 380 В и ниже	
Кратковременная потеря питания	Мгновенная остановка при кратковременной потере питания на 15 мс и более	
Радиатор перегрелся	Защита термистором	
Предотвращение отпорокидывания	Предотвращения отпорокидывания при разгоне и торможении и при работе с постоянной скоростью	
Потеря контакта земли	Обеспечивается электрической схемой	
Индикация заряда емкостей	Индикатор заряда емкостей остается горящим до тех пор пока напряжение не упадет ниже 50 В	
Размещение	В помещении, закрытом от коррозирующих газов и грязи	
Окружающая температура	-10 °С до +40 °С (закрытый настенный тип) -10 °С до +45 °С (открытый классический тип)	
Влажность	90% мм рт. ст. (без конденсата)	
Температура хранения	-20 °С до +60 °С	
Расположение	Внутри помещения (защищено от коррозирующих газов и пыли)	
Высота	1000 метров над уровнем моря и ниже	
Вибрация	9.81 м/с <sup>2</sup> (1G) менее чем 20 Гц, до 1.96 м/с <sup>2</sup> (0.2 G) от 20 до 50 Гц	

Таблица 18. Технические характеристики инверторов серии 3G3FV

Серия	3G3FV
Максимальная мощность двигателя, кВт	0.55, 1.1, 1.5, 2.2, 3.7, 4.0, 5.5, 7.5, 11, 15, 18.5, 22, 30, 37, 45, 55, 75, 110, 160, 185, 220, 300
Максимальное выходное напряжение	3-фазное, 380/400/415/440/460 В (пропорционально входному напряжению)
Номинальная выходная частота	возможно программирование до 400 Гц
Номинальное входное напряжение и частота	3-фазное, 380/400/415/440/460 В 50 Гц/60 Гц
Допустимые колебания напряжения	±10% – 15%
Допустимые колебания частоты	±5%
Метод управления	Синусоидальный ШИМ
Пусковой момент	150%/1 Гц (150% / 0 r/min совместимо с PG)
Диапазон регулирования скорости	1:100 (1:1000 совместимо с PG)
Точность регулирования скорости	±0.2% (0.02% совместимо с PG)
Чувствительность скорости	5 Гц (30 Гц совместимо с PG)
Предел момента	Доступен (задается параметром)
Точность момента	±5%
Чувствительность момента	20 Гц (40 Гц совместимо с PG)
Диапазон изменения частоты	от 0.1 до 400 Гц
Точность частоты	Цифровое задание: 0.01%, –10 °С до +40 °С Аналоговое задание: 0.1%, 25±10°С
Частотное разрешение	Цифровое задание: 0.1 Гц Аналоговое задание: 0.06 Гц/60 Гц
Разрешение выходной частоты	0.01 Гц
Перегрузочная способность	150% от номинального выходного тока в течение 1 минуты
Сигнал задания частоты	от 0 до 10 В (20 кОм), от 4 до 20 мА (250 Ом) 0±10 В

Серия	3G3FV
Время разгона и торможения	0.1 до 6000 с (время разгона и торможения задаются раздельно)
Тормозной момент	Приблизительно 20%
Защита перегрузки двигателя	Электротермическое реле перегрузки
Мгновенный выброс тока	Двигатель останавливается по инерции при токовом превышении 200% от номинального
Защита при перегорании предохранителя	Двигатель останавливается по инерции при перегорании предохранителя
Перегрузка	Двигатель останавливается по инерции за 1 минуту при токе 150% от номинального
Перенапряжение	Двигатель останавливается по инерции, если напряжение на выходе выпрямителя достигает 820 В
Нехватка напряжения	Двигатель останавливается по инерции, если напряжение на выходе выпрямителя опускается до 380 В и ниже
Кратковременная потеря питания	Мгновенная остановка при кратковременной потере питания на 15мс и более.
Радиатор перегрелся	Защита термистором
Предотвращение опрокидывания	Предотвращение опрокидывания при разгоне и торможении и при работе с постоянной скоростью
Потеря контакта земли	Обеспечивается электрической схемой
Индикация заряда емкостей	Индикатор заряда емкостей остается горящим до тех пор, пока напряжение не упадет ниже 50В
Размещение	В помещении, закрытом от коррозирующих газов и грязи
Окружающая температура	-10 °С до +40 °С (закрытый настенный тип) -10 °С до +45 °С (открытый классический тип)
Влажность	90% мм рт. ст. (без конденсата)
Температура хранения	-20 °С до +60 °С
Расположение	Внутри помещения (защищено от коррозирующих газов и пыли)
Высота	1000 метров над уровнем моря и ниже
Вибрация	9.81 м/с <sup>2</sup> (1G) менее чем 20 Гц, до 1.96 м/с <sup>2</sup> (0.2 G) от 20 до 50 Гц

Таблица 19. Сравнительные характеристики электромеханического и электронного ключа

	Вид сравнительной характеристики	«Идеальный» ключ	Электронный ключ	Электромеханический ключ
1	Быстродействие, мс	$t = 0$	$t < 1$	$t > 10$
2	Ресурс работы, число циклов	$n = \infty$	$n = \infty$	$n \leq 10^6$
3	Наличие дугового процесса	нет	нет	нет
4	Возникновение перенапряжений и сверхтоков	нет	есть	почти нет
5	Тепловые потери на ключе	отсутствуют	есть	почти отсутствуют
6	Остаточное напряжение на ключе, В	$\Delta U = 0$	$\Delta U \leq 3$	$\Delta U \approx 0$
7	Гальваническая развязка между цепями	$R_{\text{изоляция}} = \infty$	$R_{\text{изоляция}} < 10^9$	$R_{\text{изоляция}} \rightarrow \infty$
8	Затраты на включение и удержание во включенном состоянии	$P = 0$	$P \leq 1$	$P > 10$

Таблица 20. Таблица сравнительных характеристик наиболее распространенных видов приборов силовой электроники

Вид прибора	Предельное коммутируемое напряжение $U_{\text{км}}$ , В	Предельный коммутируемый ток $I_{\text{км}}$ , А	Прямое падение напряжения $\eta_m$ , В	Частота коммутации $f_k$ , Гц	Диапазон рабочей температуры	Ток утечки не более, мА	Вид управления
Тиристор	1000	5000	$< 1.9$	$< 400$	$-40 \div +125$	3	ток
Симистор	800	40	$< 1.4$	$< 400$	$-40 \div +115$	1	ток
Запираемый тиристор	4500	3000	$< 4.0$	$< 2000$	$-40 \div +125$	30	ток
МОП-транзистор	800	50	$< 3.2$	$< 100000$	$-55 \div +150$	0.3	напряжение
БТИЗ (IGBT)	3500	1200	$< 3.0$	$< 50000$	$-20 \div +150$	1	напряжение
Тиристор запираемый с МОП управлением	100	50	$< 1.5$	$< 25000$	$-55 \div +150$	1	напряжение

**Таблица 21. Значения мощностей, потребляемых катушками пускателей новой серии ПМ12**

Номинальный ток аппарата	Мощность катушки переменного тока		Время срабатывания, мс
	Включение, В*А	Удержание, В*А	
ПМ 12-004	23 ± 4	5,5 ± 1	15 ± 5
ПМ 12-010	40 ± 5	7 ± 1,1	17
ПМ 12-016	68 ± 8	8 ± 1,8	17 ± 7
ПМ 12-025	87 ± 13	7,6 ± 1,4	22 ± 5
ПМ 12-040	100 ± 15	9,5 ± 2	17 ± 7
ПМ 12-063	200 ± 35	20 ± 4	22 ± 6
ПМ 12-080	220	24 ± 5	35 ± 10
ПМ 12-100	300	30 ± 6	20 ± 8
ПМ 12-160	515	42 ± 8	25 ± 5

**Таблица 22. Основные характеристики бесконтактных пускателей серии ПБТ**

Тип пускателя	И <sub>н</sub> , А	Ударный ток к.з., А	Габариты L×B×H, мм	Масса, кг
ПБТ 16/380-11000-0 УХЛ4	16	1350	245×200×365	10
ПБТ 16/380-11010-0 УХЛ4	16	1350	245×200×365	10.5
ПБТ 25/380-11000-0 УХЛ4	25	1600	245×200×365	11.5
ПБТ 25/380-11010-0 УХЛ4	25	1600	245×200×365	12
ПБТ 31.5/380-11000-0 УХЛ4	31.5	1600	245×220×365	11.5
ПБТ 31.5/380-11010-0 УХЛ4	31.5	1600	245×220×365	12
ПБТ 50/380-11000-0 УХЛ4	50	1600	245×290×405	14
ПБТ 50/380-11010-0 УХЛ4	50	1600	245×290×405	14.5
ПБТ 63/380-11000-0 УХЛ4	63	3200	260×290×440	18
ПБТ 63/380-11010-0 УХЛ4	63	3200	260×290×440	19
ПБТ 100/380-11100-0 УХЛ4	100	5500	260×290×440	20
ПБТ 100/380-11110-0 УХЛ4	100	5500	260×290×440	21
ПБТ 160/380-11100-0 УХЛ4	160	5500	260×290×440	20
ПБТ 160/380-11110-0 УХЛ4	160	5500	260×290×440	21
ПБТ 200/380-11100-0 УХЛ4	200	5500	260×290×440	20



Продолжение табл. 22

Тип пускателя	И <sub>н</sub> , А	Ударный ток к.з., А	Габариты L×B×H, мм	Масса, кг
ПБТ 250/380-11100-0 УХЛ4	250	5500	350×290×595	32
ПБТ 250/380-11110-0 УХЛ4	250	5500	350×290×595	34
ПБТ 320/380-11100-0 УХЛ4	320	5500	350×290×595	32
ПБТ 320/380-11110-0 УХЛ4	320	5500	350×290×595	34
ПБТ 400/380-11100-0 УХЛ4	400	8000	456×290×595	42
ПБТ 400/380-11110-0 УХЛ4	400	8000	456×290×595	44
ПБТ 500/380-11100-0 УХЛ4	500	11000	456×290×595	45
ПБТ 500/380-11110-0 УХЛ4	500	11000	456×290×595	47
ПБТ 16/380-120X0-0 УХЛ4	16	1350	245×200×365	10.5
ПБТ 25/380-120X0-0 УХЛ4	25	1600	245×200×365	12
ПБТ 31.5/380-120X0-0 УХЛ4	31.5	1600	245×200×365	12
ПБТ 50/380-120X0-0 УХЛ4	50	1600	245×220×365	14
ПБТ 63/380-120X0-0 УХЛ4	63	3200	350×305×500	26
ПБТ 100/380-121X0-0 УХЛ4	100	5500	350×305×515	28
ПБТ 160/380-121X0-0 УХЛ4	160	4500	350×305×515	28
ПБТ 200/380-121X0-0 УХЛ4	200	5500	350×305×515	28
ПБТ 250/380-121X0-0 УХЛ4	250	4500	350×305×595	36
ПБТ 320/380-121X0-0 УХЛ4	320	5500	350×305×595	36
ПБТ 400/380-121X0-0 УХЛ4	400	8000	456×310×595	44
ПБТ 500/380-121X0-0 УХЛ4	500	11000	456×310×595	47

Таблица 23. Параметры перегрузочной способности пускателей ПБТ

Режим	Нагрузка от номинального тока, %	Продолжительность нагрузки, с
1	100	Длительно
2	150	120
3	175	60
4	200	15
6	225	10



Таблица 26. Реле твердотельное переменного тока 5П19ТМ. Электрические параметры

Тип реле	Функциональное назначение	Напряжение коммутации, (В)	Ток коммутации, (А)	Ток коммутации импульс, (А)	Входное напряжение, (В)	Напряжение начального включения, (не более), (В)	Остаточное напряжение во включенном состоянии, (не более), (В)	Сопротивление во включенном состоянии, (Ом) более,	Время срабатывания, (мс)	Габаритные размеры, (мм)
5П19ТС(1)-1-4	Реле переменного тока	~280	1.0	30	1.1-2.8	-	1.85	-	10	35×38×12
5П19ТС-1-6		~420	1.0							
5П19ТС-1-8		~560	1.0							
5П19ТС-3-4		~280	3.0							
5П19ТС-3-6		~420	3.0							
5П19ТС-3-8		~560	3.0							
5П19ТМ-1-4	Реле переменного тока со схемой контроля перехода фазы питающего напряжения через 0	~280	1.0	30	3-5	-	1.85	-	f=50 Гц	38.5×33.5×18
5П19ТМ-1-6		~420	1.0							
5П19ТМ-1-8		~560	1.0							
5П19ТМ-3-4		~280	3.0							
5П19ТМ-3-6		~420	3.0							
5П19ТМ-3-8		~560	3.0							
5П19ТМ-10-4	Реле переменного тока со схемой контроля перехода фазы питающего напряжения через 0	~280	10.0	110	4-8	50	1.85	-	-	38.5×33.5×18
5П19ТМ-10-6		~420	10.0							
5П19ТМ-10-8		~560	10.0							
5П19ТМ-20-4		~280	20.0							
5П19ТМ-20-6		~420	20.0							
5П19ТМ-20-8		~560	20.0							

Продолжение табл. 26

Тип реле	Функциональное назначение	Напряжение коммутации, (В)	Ток коммутации, (А)	Ток коммутации импульс, (А)	Входное напряжение, (В)	Напряжение начального включения, (не более), (В)	Остаточное напряжение во включенном состоянии, (не более), (В)	Сопротивление во включенном состоянии, (не более), (Ом)	Время срабатывания, (мс)	Габаритные размеры, (мм)
5П36ТМ-10-6	3-х фаз-е реле перем-го тока	-420	10.0	110	4-8	50	1.85	-	-	105×74×34
5П36ТМ-10-8		-560								
5П36ТМ-20-6		-420	20.0	160						
5П36ТМ-20-8		-560								
<b>2. Реле общего назначения</b>										
5П19А-2.5-1	Двупол-е реле	100	2.5	30	2.2-2.8	-	-	0.6	20	35×38×12
5П19Б-1-4		400	1.0	50					50	
<b>3. Реле постоянного тока</b>										
5П20А-2.5-1	Однопол. реле	100	2.5	30	2.2-2.8	-	-	0.3	30	35×38×12
5П20А-5-0.6		60	5.0	50					50	
5П20Б-1-4		400	1.0	50					30	
5П40А-2.5-1		100	2.5	30					0.02	
5П40Б-1-4	400	1.0	50	0.05						

Таблица 27. Технические характеристики бесконтактных пускателей ПБР и ПБН

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра	Примечание
Коммутируемое напряжение	В	280, 280, 440	
Частота	Гц	50, 60	
Число коммутируемых каналов		1, 2, 3	
Номинальный ток	А	4, 6, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160	
Степень защиты		IP44, IP00	ГОСТ 14254–80
Климатическое исполнение		УЗ, УХЛ4	ГОСТ 15150–89
Допустимая частота включения	вкл/час	10000 3600	Для пускателей с прямым релейным пуском
Электрическая прочность изоляции	В	2500	
Время срабатывания токовой защиты: при $I/I_n = 7$ не более при $I/I_n = 1.3$ не более	С С	< 5 < 300	
Температура срабатывания тепловой защиты	°С	105, 130, 145	

Таблица 28. Электрические параметры реле типа BOSFET производства фирмы «International Rectifier» (IR)

Тип реле	Uраб, В	I <sub>н</sub> макс, мА	I <sub>упр</sub> , мА	t, мкс	Uиз, В
PVR1300	±100	700	10	300/50	1500
PVR1301	±100	700	10	300/50	1500
PVR2300	±200	260	10	100/50	1500
PVR3300	±300	260	10	100/50	1500
PVR3301	±300	260	10	100/50	1500
PVA1052	±100	70	5	22/15	2500
PVA1054	±100	70	5	22/15	2500
PVA1352	±100	315	5	300/50	2500
PVA1354	±100	315	5	300/50	2500
PVA2352	±200	130	5	100/50	2500
PVA3054	±300	40	5	25/15	2500
PVA3055	±300	40	5	25/15	2500

Продолжение табл. 28

Тип реле	Ураб, В	In макс, мА	Iупр, мА	t, мкс	Uиз, В
PVA3324	±300	130	2	100/50	2500
PVA3354	±300	130	5	100/50	2500
PVAZ172	±60	1000	10	500/8000	1500
PVD1052	+100	160	5	25/15	2500
PVD1054	+100	160	5	25/15	2500
PVD1352	+100	500	5	300/50	2500
PVD1354	+100	500	5	300/50	2500
PVD2352	+200	220	5	100/50	2500
PVD3354	+300	220	5	100/50	2500
PVDZ172	+60	1400	10	500/8000	1500

Таблица 29. Двухключевые полумостовые модули на базе МОП-транзисторов отечественного производства. Электрические параметры

Тип	Uds,(В)	Id, (А)	Rdson, (мОм)	Rthjc, (град/Вт)	Ptot, (Вт)
M2ТКП-25-6	600	2×25	300	0.31	400
M2ТКП-35-5	500	2×35	170	0.31	400
M2ТКП-45-4	400	2×40	100	0.31	400
M2ТКП-80-2	200	2×80	30	0.31	400
M2ТКП-125-1	100	2×125	14	0.31	400
M2ТКП-200-0.6	60	2×200	7	0.31	400

Таблица 30. Двухключевые полумостовые модули на биполярных транзисторах с изолированным затвором отечественного производства. Электрические параметры

Тип	Uce, (В)	Ic, (А)	Ucesat, (В)	Rthjc, (град/Вт)	Ptot, (Вт)
M2ТКИ-25-12	1200	2×25	3.0	0.4	300
M2ТКИ-50-12	1200	2×50	3.0	0.25	500
M2ТКИ-75-12	1200	2×75	3.0	0.2	625
M2ТКИ-100-12	1200	2×100	3.0	0.13	1000
M2ТКИ-150-12	1200	2×150	3.0	0.1	1250

**Таблица 31. Диод-транзисторные и транзистор-диодные модули (чопперы).  
Электрические параметры**

Тип	Uсе, (В)	Iс, (А)	Uсесat, (В)	Rthjc, (град/Вт)	Ptot, (Вт)
МДТКИ-25-12	1200	2×25	3.0	0.4	300
МДТКИ-50-12	1200	2×50	3.0	0.25	500
МДТКИ-75-12	1200	2×75	3.0	0.2	625
МДТКИ-100-12	1200	2×100	3.0	0.13	1000
МДТКИ-150-12	1200	2×150	3.0	0.1	1250
МТКИД-25-12	1200	2×25	3.0	0.4	300
МТКИД-50-12	1200	2×50	3.0	0.25	500
МТКИД-75-12	1200	2×75	3.0	0.2	625
МТКИД-100-12	1200	2×100	3.0	0.13	1000
МТКИД-150-12	1200	2×150	3.0	0.1	1250

**Таблица 32. Основные технические характеристики силовых интеллектуальных модулей**

Параметры	Величины	Примечание
<b>Входные параметры</b>		
Напряжение	380В, –15%, 480В +10%	
Частота	50/60 Гц	
Входной ток	8.26А 125А	T = 40°C Зарядный ток конденсаторов
<b>Выходные параметры</b>		
Напряжение	480В	
Мощность двигателя	2 кВт 150% перегрузка в течение 1 минуты	Vвх 460В, fшим – 4 кГц fвх – 60 Гц, Токр – 40 °С
Номинальный ток двигателя	5.9А 8.85А при 150% перегрузке	
Входные сигналы		
IN1–IN7 RESET	5В	Совместимы с ТТЛ и КМОП Открытый коллектор
STOP	5В	Совместим с ТТЛ и КМОП

Продолжение табл. 32

Параметры	Величины	Примечание
<b>Защита</b>		
Перегрузка по току	28А, ±10%	T <sub>c</sub> = 25°C
Защита по температуре	100°C, ±5%	
Перегрузка по напряжению	850В, ±10%	T <sub>c</sub> = 25°C
Время отработки защиты	2.5 мкс	
<b>Обратные сигналы</b>		
Ток	0.025В/А	T <sub>c</sub> = 25°C
Напряжение	0.010В/А	T <sub>c</sub> = 25°C
Сигнал «FAULT»	5В	Совместим с ТТЛ и КМОП
<b>Источник питания</b>		
Напряжения	15В, 5В	
Ток	60мА	
<b>Силовой модуль</b>		
Напряжение изоляции	2500В	
<b>Температура</b>		
Температура окружающей среды	-25 – +60°C	

**Таблица 33. Основные технические характеристики композиционных жидкометаллических контактных материалов**

Композиция	Тип каркаса	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объем жидкой фазы, см <sup>3</sup>	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Вольфрам-гелий Индий-олово	жесткий	13.4 · 10 <sup>3</sup>	45	9.7 · 10 <sup>-8</sup>
Вольфрам-гелий Индий-олово	упругий	11.6 · 10 <sup>3</sup>	58	11.7 · 10 <sup>-8</sup>
Вольфрам-гелий	жесткий	13.3 · 10 <sup>3</sup>	45	9.4 · 10 <sup>-8</sup>
Вольфрам-гелий	упругий	11.5 · 10 <sup>3</sup>	58	10.1 · 10 <sup>-8</sup>



Таблица 34. Серийные запираемые тиристоры. Основные электрические параметры

Тип	Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и повторяющееся импульсное обратное напряжение $U_{BRM}$ , В	Импульсный запираемый ток $I_{ORM}$ , А	Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии $I_{SM}$ , А	Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $dI/dt$ , А/мкс	Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии $du/dt$ , В/мкс	Импульсное напряжение в открытом состоянии $U_{TM}$ , В
T3 243-630	1200 – 2000	630	3500	250	500	3,2
T3 243-800	1200 – 2000	800	4000	250	500	3,0
T3 253-1000	1200 – 2400	1000	6000	250	500	3,5
T3 253-1250	1200 – 2400	1250	7000	250	500	3,3
T3 273-2000	2400 – 5000	2000	13000	250	500	4,8
T3 273-2500	2400 – 4500	2500	14000	250	500	4,5

Продолжение таблицы 34

Тип	Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии и повторяющийся импульсный обратный ток $I_{BRM}$ , $I_{ORM}$ , мА	Время выключения по управлению $t_{off}$ , мкс	Отпирающее постоянное напряжение/минимальный динамический поддерживаемый ток управления $U_{GT}/I_{(ON)}$ , В/А	Запирающий импульсный ток управления $I_{SM}$ , А	Тепловое сопротивление переход-корпус $R_{thjc}$ , °С/Вт	Максимальная температура полупроводниковой структуры $T_{max}$ , °С	Диаметр контактной поверхности таблеточного корпуса, мм
T3 243-630	70	12,5; 16	1,5/3	230	0,053	125	38
T3 243-800	70	16; 20	1,5/3	270	0,053	125	38
T3 253-1000	100	16; 20	1,5/5	300	0,025	125	50
T3 253-1250	100	20; 25	1,5/5	350	0,025	125	50
T3 273-2000	100	25; 32	1,5/8	600	0,018	125	75
T3 273-2500	100	32	1,5/8	650	0,018	125	75

Таблица 35. Перспективные типы запираемых тиристоров. Основные электрические параметры

Параметры	Типы тиристоров				
	ЗТ 173-2000	ЗТА 173-3000	ЗТД 193-3000	ЗТА 193-4000	ЗТФ 193-3000
Диаметр Si, мм	76	76	100	125	125
$V_{БРМ}$	5000	4500	4500	6000	4500
$V_{БРМ}$	5000	20	—	20	20
$I_{ТФРМ}, А$	2000	3000	3000	4000	3000
$I_{РС(АВ)}, А$	—	—	1000	—	—
$C_S$	3	3,5	3	4	—
$L_S$	0,25	0,2	0,2	0,25	—
Особенности	—	—	Встроенный диод обратного тока	—	Объединен в одно устройство с блоком управления; может работать без снаббера
Малая емкость снабберной цепи					

*Примечание:* ЗТД — запираемый тиристор — диод; ЗТА — запираемый тиристор без обратной блокирующей способности; ЗТФ — запираемый тиристор с форсированным выключением (зарубежное обозначение GCT)

Таблица 36. Технические характеристики тиристорных пусковых устройств типов МРН-М и УПТ-2

Технические данные	Тип тиристорного пускового устройства	
	МРН-М	УПТ-2
Состав	Блок силовой (БС), блок управления (БУ), жгут соединительный	Моноблок
Управление	Микропроцессорное	На микрохемах средней степени интеграции
Включение и выключение	Дистанционное и с блока управления	Дистанционное
Питание от сети	3х380В, 50Гц, качество электроэнергии по ГОСТ 13109—87; при пуске допускается просадка напряжения до 25%	
Диапазон настройки	N глухозаземлен.	N глухозаземлен. и изолиров.
Климатическое исполнение	УХЛ3.1 (–10...+40) град. С	ток пусковой/ток номинальный = (1...4)
Группа исполнения по механическому воздействию	M2	M18 (степень жесткости к синусоидальным ибрациям – 9)
Степень защиты	IP00	IP54
Прходная мощность, кВА	45...250	45...160
Габаритные размеры, мм	585х200х540 (БС); 378х142х314 (БУ) длина жгута соедин. 1,5 м	660х235х815
Масса не более, кг	42 (БС); 12 (БУ)	50; 8 (устр. согл.)
Трансляция сигналов ГОТОВ, НОРМА, АВАРИЯ вне устройства	–	–

Продолжение табл. 36

Технические данные	Тип тиристорного пускового устройства	
	МРН-М	УПТ-2
Блокирование вкл. и аварийное выкл. при: неполнофазном питании; повышенном напряжении питающей сети; коротком замыкании в выходных цепях; перегрузке по току; обрыве фазы; перегреве двигателя; перегреве устройства; затянгом пуска; низком сопротивлении изоляции	+	+
	-	-
	+	+
	-	-
	+	+
	-	-
	+	+
	-	-

Таблица 37. Основные технические характеристики пускорегулирующих устройств УПР-1 и УПР-2

Тип исполнения	Номинальный ток, А	Наличие реверса	Режим торможения		Размеры, мм			Масса, кг
			динамического	противовключением	Ш	В	Г	
УПР1-2000	25	-	-	-	240	266	270	11.0
УПР1-2010	25	-	Есть	-	240	266	270	11.0
УПР1-2120	25	Есть	-	Есть	240	266	270	11.0
УПР1-3000	63	-	-	-	240	325	270	12.5
УПР1-3010	63	-	Есть	-	240	325	270	12.5
УПР1-3120	63	Есть	-	Есть	240	325	270	12.5
УПР1-4000	160	-	-	-	242	500	340	31.0
УПР1-4010	160	-	Есть	-	242	500	340	31.0
УПР1-4120	160	Есть	-	Есть	242	500	340	31.0
УПР1-5000	400	-	-	-	460	880	360	65.5
УПР1-5010	400	-	Есть	-	460	880	360	65.5
УПР1-5120	400	Есть	-	Есть	460	880	360	65.5
УПР2-20X0	25	-	Есть	-	240	266	270	11.0
УПР2-30X0	63	-	Есть	-	240	325	270	12.5
УПР2-40X0	160	-	Есть	-	240	500	340	31.0

**Таблица 38. Основные технические характеристики тиристорного пускового устройства серии ТПУЭ**

Тип устройства	Габариты устройства, мм	Мощность электродвигателя, кВт
ТПУЭ-1	390×290×210	до 22
ТПУЭ-2	390×290×210	до 45
ТПУ-1	655×440×225	30–75
ТПУ-2	655×440×225	75–110
ТПУ-2м	655×440×225	110–250

**Таблица 39. Технические характеристики УПМК**

Количество независимых каналов управления	2
Количество однофазных выходных силовых ключей переменного тока в одном канале управления при $I_{\text{вых max}}$ не более 25 А	до 6
Количество подключаемых трехфазных нагрузок переменного тока в одном канале при $I_{\text{вых}}$ не более 25 А	до 3
Количество контролируемых входных дискретных сигналов с устройств автоматики в одном канале с $U_{\text{вх}}$ не более 220 В постоянного и переменного тока	до 6
Количество входов АЦП с $U_a=0-10$ и разрядностью 12	8
Предельные параметры однофазного силового ключа: $I_{\text{вых макс.}}$ , А $I_{\text{вых макс.}}$ (с радиатором), А $U_{\text{вых. Пр.}}$ , В $U_{\text{вых обр.}}$ , В	25 80 380 600
Предельная частота коммутации выходного ключа $f_{\text{max}}$ , Гц	500
Минимальная дискретность задания выдержки времени, мкс	1
Максимальная выдержка времени	не ограничена
Количество одновременно задаваемых выдержек времени по одному каналу управления	не ограничена
Количество знакомест семисегментного индикатора по одному каналу	3
Габаритные размеры (не более), мм	180×200×300
Масса, кг	не более 4

**Таблица 40. Технологические программируемые контроллеры. Сводная таблица основных параметров**

№ п/п	Наименование параметра или технической характеристики	Значение параметра либо возможный диапазон значений
1	Объем программной памяти	2 Кбайт – 10 Мбайт
2	Объем памяти данных	до 256 Кбайт
3	Количество дискретных входов ввода-вывода	до 8192
4	Количество аналоговых входов	от 1 до 256
5	Количество аналоговых выходов	от 1 до 128
6	Время выполнения логической команды (операции)	от 0,01 мкс до 0,5 мкс
7	Время выполнения команды обработки слов	от 0,01 мкс до 1 мкс
8	Число флагов/таймеров/счетчиков	от 2 до 2048/256/256
9	Число входов внешних прерываний	от 1 до 8
10	Адресное устройство ввода-вывода	до 256 Кбайт
11	Количество каналов коммуникационного интерфейса RS-485/232C	до 2
12	Встроенный MPI-интерфейс	до 1
13	Встроенный интерфейс PROFIBUS-DP	до 1
14	Количество быстрых (высокоскоростных) счетчиков	до 8
15	Количество импульсных выходов	до 2
16	Максимальное количество выполняемых инструкций	до 200
17	Варианты устройств индикации (дисплеи)	LDI, LCD, LED
18	Напряжение питания, В	220; 110; 48; 24; 12; 5 (AC, DC)
19	Диапазон температуры эксплуатации	tmin = –25°C tmax = +70°C

Таблица 41. Электросчетчики коммерческого учета, принимаемые на баланс «Энергосбыта»

№	Тип счетчика	V (В)	I (А)	Класс точности	Завод изготовитель
1	СА4У-И672 М	3×380/220	3×5(7.5)	2.0	Ленинградский электромеханический завод (ЛЭМЗ)
2	СР4У-И673 М	3×380	3×5(7.5)	2.0	
3	СА4-И672 П	3×380/220	3×10	2.0	
4	СА4-И677				
5	СА4-И678	3×380/220	3×10(100)	2.0	
6	СА4-И679				
7	СА3У-И670 М	3×100/57	3×5(7.5)	2.0	Рязанский приборный завод (РПЗ)
8	СР4У-673 М	3×100	3×5(7.5)	2.5	
9	ПСЧ-3	3×380/220	3×5.10(50)	2.0	Московский завод электромонтажных приборов (МЗЭП)
10	ПСЧ-3Р	3×380/220	3×5.10(50)	2.0	
11	ПСЧ-4	3×100	3×5(7.5)	1.0	
12	ПСЧ-4Р	3×100	3×5(7.5)	1.0	
13	СЭТ-3	380/220	5(50)	0.5; 1.0; 2.0	
		100/58	1(1.5); 5(7.5)	2.0	
14	СО-500	220	10(40)	2.0	
15	СО-501	220	10(40)	2.0	
16	СО-505	220	10(40)	2.0	
17	СО-514	220	10(60)	2.0	
18	СА45-У11 3-х фазн.	3×380/220	3×5	2.0	
19	СА45-41 3-х фазн.	3×380/220	3×10(40)	2.0	
20	СА45-51 3-х фазн.	3×380/220	3×20(100)	2.0	

Продолжение табл. 41

№	Тип счетчика	V (В)	I (А)	Класс точности	Завод изготовитель	
21	СМ45-61 3-х фазн.	3×380/220	3×10(60)	2.0	Московский завод электроизмерительных приборов (МЗЭП)	
22	ЦЭ6807Б-1 однотар.	220	5(50)	2.0		
23	ЦЭ6807Б-2 однотар.	220	5(50)	2.0		
24	СЭТ4-1 3-х фазн.	3×380/220	3×5(60)	2.0		
25	СЭТ4-2	3×380/220	3×5(60)	2.0		
26	СЭТ4-1/1	3×380/220	3×5(7.5)	2.0		
27	СЭТ4-2/1	3×380/220	3×5(7.5)	2.0		
28	СЭБ-2	220	5(50)	2.0		
29	СЭТА-1	3×100/57.7	3×1(1.5)	0.5	Мылщинский электротехнический завод (МЭТЗ)	
30	СЭТА-1/1	3×100/57.7	3×5(7.5)	0.5		
31	СЭТА-1/2	3×100/57.7	3×1(1.5)	1.0		
32	СЭТА-1/3	3×100/57.7	3×5(7.5)	1.0		
33	СЭТА-2	3×100/57.7	3×5(7.5)	0.5		
34	СЭТА-2/1	3×100/57.7	3×5(7.5)	1.0		
35	СЭТР-1	3×100/57.7	3×1(1.5)	1.0		
36	СЭТР-1/1	3×100/57.7	3×5(7.5)	1.0		
37	Альфа	100/58	1(24); 5(24)	0.2; 0.5		СП «АББ ВЭИ Метроника»
		380/220	10(24); 40(150)			
38	СЭБ-2	220	5(50)	2.0	Нижегородский завод им. Фрунзе	
39	ПСЧ-3Т	380/220	5(50)	2.0		



Таблица 42. Технические характеристики счетчиков электроэнергии ЦЭ6822 и ЦЭ6823

Параметры	ЦЭ 6822	ЦЭ 6823
Класс точности	1.0; 2.0	0.5; 1.0; 2.0
Частота измерительной сети, Гц	50 или 60	550 или 60
Номинальное фазное (линейное) напряжения, В	3×220	3×220, 3×57.7 (3×100)
Номинальная сила тока Iном, А	5 или 10	1 или 5
Максимальная сила тока, А	50 или 100	1.5 или 7.5
Порог чувствительности (для соответствующего класса точности), А	0.25Iном, 0.5Iном	0.1Iном, 0.25Iном, 0.5Iном
Полная потребляемая мощность, В·А: парал-ой/посл-й цепи	6/0.5	6/0.5
Предаточное число импульсного телеметрического выхода, имп/кВт·ч	5А 220В–800 10А 220В–400	5А 220В–2000 5А 100В–10000 1А 100В–50000
Тип интерфейса	RS 485 или ИРПС; опт-й порт	RS 485 или ИРПС; опт-й порт
Погрешность хода часов (при норм-х условиях эксплуатации), с/сут	не более 1	не более 1
Диапазон рабочих температур, °С	от –20 до 55	от –20 до 55
Габаритные размеры, мм	85×177×282	85×177×282
Масса, не более, кг	2	3
Минимальная наработка на отказ, ч	35000	
Межповерочный интервал, лет	8	
Средний срок службы, лет	24	
Гарантийный срок эксплуатации, лет	3	

Таблица 43. Основные технические характеристики трехфазных электросчетчиков серий СА и СР

Наименование параметра	Значение параметра
Потребляемая полная мощность в каждой цепи тока при $I_n$ в пределах	$5,0 \div 6,0$ ВА
Потребляемая полная мощность в каждой цепи напряжения при $I_n$ в пределах	$0,6 \div 2,5$ ВА
Отсутствие самохода в диапазоне напряжений	от 80 до 110% $U_n$
Порог чувствительности для классов точности 2,0 и 3,0	0,5 и 1,0% соответственно
Класс точности для счетчиков активной и реактивной энергии при прямом включении	2,0 и 3,0 соответственно
Систематическая составляющая относительной погрешности для счетчиков активной и реактивной энергии	5% и 10% соответственно

Таблица 44. Электрические параметры электросчетчиков активной энергии СА

Тип счетчика	Подключение	Номинальный ток, А	Максимальный ток, % номинального	Номинальное линейное напряжение, В
СА3-И670М СА3-И677	Непосредственное, в трехпроводную сеть	5; 10	200	127; 220; 380
		5; 10; 50	200	
		20; 30	250	
СА3У-И670М СА3У-И677	Через любые трансформаторы тока и напряжения в трехпроводную сеть	1; 5	125	100; 127; 220; 380
		5; 10	200	
СА4-И672М СА4-И678	Непосредственное, в четырехпроводную сеть	5; 10	200; 300; 400	220; 380
		20; 30	250	
		50	200	
СА4У-И672М СА4У-И678	Через любые трансформаторы тока в четырехпроводную сеть	5	200	

Таблица 45. Электрические параметры электросчетчиков реактивной энергии СР

Тип счетчика	Подключение	Номинальный ток, А: при включении		Максимальный ток, % номинального	Номинальное линейное напряжение, В: при включении	
		в трехпроводную сеть	в четырехпроводную сеть		в трехпроводную сеть	в четырехпроводную сеть
СР4-И673М	Непосредственное	5; 10		200	127; 220; 380	220; 380
СР4-И679		5; 10; 50				
СР4У-И673М СР4У-И679	Через любые трансформаторы тока и напряжения	20; 30	250	200	100; 127; 220; 380	

Таблица 46. Характеристики однофазных счетчиков электроэнергии

Параметры	Значение параметра					
	СО-500	СО-501	СО-502	СЭТ1-1(2)	СО-50	ЭАР-1АМВ-Н1
Класс точности, %	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.0
Номинальное напряжение, В	220					
Номинальный ток, А	10	10	10	5	10	10
Максимальный ток, А	40	40	60	50	40	75
Частота сети, Гц	50	50	50	50	50	50(60)

Продолжение табл. 46

Параметры	Значение параметра							
	СО-500	СО-501	СО-502	СЭТ1-1(2)	СО-50	ЭАР-1АМВ-Н1	СО-505	
Полная потребляемая мощность, ВА - по параллельным цепям - по последовательным цепям - по цепи управления тарифами	5.5	5.5	5.5	4.0	5.5	-	5.0	
	0.7	0.7	0.8	0.1	0.7	-	0.4	
	-	-	-	0.05	-	-	-	
Единица младшего разряда, кВт/ч	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	-	0.1	
Единица старшего разряда, кВт/ч	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	-	10 <sup>4</sup>	
Передаточное число А основного выхода, имп./кВт·ч	-	-	-	6400	-	-	-	
Время хранения информации при исчезновении питания, не менее	Без огранич.	Без огранич.	Без огранич.	Без огранич.	Без огранич.	1 год	Без огранич.	
Способ отображения информации	эл.мех.	эл.мех.	эл.мех.	эл.мех.	эл.мех.	алфав.-цифр. дисплей	Эл.мех.	
Ток трогания, % ном.	0.4	0.4	0.4	-	0.4	-	0.5	
Кол-во оборотов за 1кВт/ч, п	600	375	375	-	600	-	600	
Диапазон рабочих температур, °С	-20/+60	-20/+60	-20/+60	-35/+50	-20/+60	0/+50	-20/+60	
Габаритные размеры	-	-	-	198×121×67	214×137×113	145×224×91	214×137×113	
Масса, кг не более	1.2	1.2	1.2	1.0	1.2	1.5	1.2	

Таблица 47. Характеристики электросчетчиков серии СЭТЗ

Параметры	активной энергии		реактивной энергии	
	СЭТЗа-01 (СЭТЗа-01П, СЭТЗа-01П)	СЭТЗа-02 (СЭТЗа-02П, СЭТЗа-02П)	СЭТЗр-01 (СЭТЗр-01П, СЭТЗр-01П)	СЭТЗр-02 (СЭТЗр-02П, СЭТЗр-02П)
Номинальное напряжение, В	100/100√3		380/220	
Номинальный и максимальный ток, А	1–1.5	5–7.5	1–6	5–50
	0.5	0.5;1	1.0	1.0–50
Класс точности, %	0.5	0.5;1	1.0	1.0
	0.5	0.5;1	1.0	1.0
Перед-е число В-повер-о вых-а. имп/кВт·ч (имп/квар.ч)	7680000	1536000	7680000	768000
	15000	1500	15000	150
Передаточное число А-основного пе- редаточного устройства имп/кВт·ч (имп/квар.ч)	0.001	0.01	0.001	0.01
	0.001	0.01	0.001	0.01
Единица младшего разряда кВт·ч (квар.ч)	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
Единица старшего разряда кВт·ч (квар.ч)	1	4	1	4
	0.05	0.05	0.05	0.05
Полная потребляемая мощность, ВА – по параллельным цепям – по последовательным цепям – по цепи управления тарифами	0.05	0.05	0.05	0.05
	0.05	0.05	0.05	0.05

**Таблица 48. Технические характеристики электросчетчиков совместного производства России и Словакии серии СА45**

Тип счетчиков		СА45-У11	СА45-41	СА45-51	СА45-61
Класс точности		2	2	2	2
Номинальное напряжение	В	3×380/220			
Номинальный ток	А	5	10(20)	20	10
Максимальный ток	А	6.25	40(80)	100	60
Количество об. На 1 кВт/ч	п	750	135(67.5)	60	120
Способ подключения		трансформатор	прямой	прямой	прямой
Температурный диапазон	С	от -30 до +50			
Средний срок службы	лет	25			
Масса счетчика	кг	3.05			
Габаритные размеры	мм	306×174×145			
Межповерочный период	лет	8			

**Таблица 49. Технические характеристики электросчетчиков СЭТ4**

Наименование параметра	Значение
Фазное напряжение, В	187÷242
Сила тока, А	0.05÷60 А
Коэффициент мощности, $\cos\varphi$	0.5 емк – 1 – 0.5 инд
Номинальное фазное напряжение, В	220
Номинальная сила тока, А	5
Максимальная сила тока, А	60
Порог чувствительности в каждой фазе, Вт	5.5
Мощность, потребляемая последовательной обмоткой, Вт	0.3
Мощность, потребляемая параллельной обмоткой, не более, Вт	4.0
Передаточное число импульсного выхода имп/кВт·час	200
Количество тарифов	2
Габаритные размеры, не более, мм	92×180×292
Средняя наработка на отказ	36000

**Таблица 50. Технические характеристики трехфазных многофункциональных счетчиков серии «АЛЬФА»**

Наименование параметра	Значение
Класс точности	0,2 и 0,5
Количество тарифов	4 тарифные зоны (утро, день, вечер, ночь), автоматический переход на летнее и зимнее время, 4 типа дней недели
Диапазон токов счетчика Трансформаторного включения $I_{ном} = 1 \text{ А}$ $I_{ном} = 5 \text{ А}$ Прямого включения $I_{ном} = 40 \text{ А}$ $I_{ном} = 100 \text{ А}$	0,5 мА – 24 А 2,5 мА – 24 А 20 мА – 150 А 20 мА – 150 А
Максимальный ток в течение 1 с 0,5 с	100 А трансф. вкл. 800 А прям. вкл.
Диапазон рабочих напряжений	100, 220, 380 В
Диапазон частоты сети	47,5 – 52,5 Гц
Рабочий диапазон температур, С	от – 40 о С до + 60 °С
Влажность (не конденсирующаяся)	0 – 95 %
Потребляемая мощность счетчика	менее 3,6 ВА
Скорость обмена информацией по оптическому порту (RS-232) по интерфейсу «токовая петля» по интерфейсу RS-485	1200, 9600 бод 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 бод
Передачное число	10000 импульс/кВт·ч (трансф. вкл.) 1000 импульс/кВт·ч (прям. вкл.)
Сохранность данных при перерывах питания	2 – 3 года при помощи батареи
Регистрация отключений питания	до 9999 отключений
Защита коммерческой информации	3 уровня паролей доступа плюс аппаратная блокировка
Самодиагностика счетчика	1 раз в сутки
Масса, кг	3,0 кг
Габариты, мм	261×180×180 мм
Срок службы, лет	30 лет
Межпроверочный интервал, лет	8 лет
Гарантия производителя	3 года

**Таблица 51. Технические характеристики нагревательных проводов с неметаллической токопроводящей жилой**

№ п/п	Наименование характеристики	ПШС	ПШСУ	ПШУС	ПШУСЛ	ПШУСФН
1	Диаметр токопроводящей жилы, мм	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
2	Номинальный наружный диаметр провода, мм	2.5	2.5	2.3	3.9	3.9
3	Расчетная масса 1 км кабеля, кг	5.55	5.6	4.69	13.40	13.40
4	Количество циклов изгибов	25	25	1000	500	25
5	Радиус изгиба, мм не менее	2	2	5	2	2
6	Температура окружающей среды, °С	-60 ++250	-60 ++250	-40 ++125	-60 ++125	

**Таблица 52. Технические характеристики нагревательных проводов ПНКХ и ПНВХ**

№ п/п	Наименование характеристики	ПНВХ	ПНКХ
1	Номинальный диаметр нихромовой проволоки жилы, мм	0.05; 0.05; 0.05; 0.1	0.3
2	Электрическое сопротивление 1 м жилы, Ом	8000; 7000; 3500; 1000	50
3	Номинальный наружный диаметр провода, мм	3.4; 3.4; 3.4; 3.4	4.5
4	Расчетная масса 1 км провода, кг	12.6; 12.6; 12.6; 13.0	23.6

**Таблица 53. Технические характеристики нагревательных проводов повышенной надежности**

№ п/п	Наименование характеристики	ПНВСВ	ПНПСР	ПНРСВ	ПНРСП
1	Номинальный наружный диаметр, мм	5.9	4.7	5.9	5.1
2	Номинальный диаметр токопроводящей жилы, мм	1.2	1.2	1.2	1.2
3	Число жил	1.0	1.0	1.0	1.0
4	Расчетная масса 1 км провода, кг	65	45	75	50



**Таблица 54. Технические характеристики нагревательных кабелей с радиационно-модифицированной полимерной изоляцией**

Марка кабеля	Количество и диаметр жил	Наружный номинальный диаметр одножильного кабеля	Наружные номинальные размеры двухжильного кабеля, мм		Расчетная масса 1 км кабеля, кг
			толщина	ширина	
КНС	1×0.56	6.0	—	—	46.2
	1×0.70	6.1	—	—	48.9
	2×0.56	—	8.4	14.4	157
	2×0.70	—	8.5	14.6	164
КНН	1×0.63	6.0	—	—	47.3
	1×0.80	6.1	—	—	51.4
	2×0.63	—	8.4	14.4	159
	2×0.80	—	6.6	14.8	170

**Таблица 55. Технические характеристики нагревательных кабелей в кремнийорганической или поливинилхлоридной изоляции**

Марка кабеля	Число и сечение жил, мм <sup>2</sup>	Номинальные наружные размеры или диаметры, мм	Расчетная масса 1 км кабеля, кг
КНРПВ-М	1×0.35	5.50	40
	2×0.35		92
КНРПЭВ-М	1×0.35	5.50×15.70 6.10	52
	2×0.35		120
КНВПВТ	1×0.35	6.10×16.90 5.50	32
	1×0.50		33
КНВПЭВТ	1×0.35	5.62 6.10	38
	1×0.35		40
КНВВ	1×0.35	6.22 4.90	30
	1×0.50		32
КНВЭВ	1×0.35	5.02 5.30	36
	1×0.50		38
КНМКМ	1×2.5	5.42 6.0	51

**Таблица 56. Основные технические характеристики фотореле управления освещением ФР-1, ФР-94, ФР-7**

Наименование характеристики (параметра)	Значение
Напряжение питания, В	220 (+22, –33)
Частота, Гц	50
Диапазон срабатывания, ЛК	(5÷220) ФР-1М; (3÷6) ФР-94-3; (3÷250) ФР-7
Коммутируемое напряжение для переменного тока частотой 50 Гц постоянного тока	от 0 до 380 В; 12...220 (ФР-7) 12...30 (ФР-7)
Коммутируемый ток, не более	3 А; 0,01...5 А (ФР-7)
Максимально допустимая коммутируемая мощность при активной нагрузке, не более	450 Вт 1200 Вт (ФР-7)
Мощность, потребляемая от сети, не более, Вт	3 Вт 5 Вт (ФР-7)
Интервал рабочих температур	–40 °С ÷ +55 °С
Атмосферное давление	от 84 до 107 кПа
Относительная влажность окружающего воздуха	до 80% при t=25 °С
Масса, не более	0,2 кг 0,3 кг (ФР-7)

**Данные на фотореле ФР-7**

№ п/п	Наименование характеристики	
1	Номинальное напряжение, В	220
2	Номинальная частота (????) сети, Гц	50
3	Коммутируемое напряжение, В переменного тока f=50 Гц постоянного тока	12...220 12...30
4	Коммутируемый ток, А	0,01–5
5	Максимально допустимая коммутируемая мощность при акт. нагрузке, не более, Вт	1200
6	Мощность, потребляемая от сети, не более, Вт	5
7	Диапазон срабатывания, лк	3–250
8	Интервал рабочих температур	–40 °С÷+55 °С
9	Атмосферное давление, кПа	от 84 до 107
10	Относительная влажность	до 80% при t = 25 °С
11	Масса, кг	0,3

**Таблица 57. Основные технические характеристики тиристорных регуляторов температуры БТРТ1 и ШТРТ1**

Наименование параметра	Значение параметра				
	БТРТ1-63-380	БТРТ1-100-380	БТРТ1-200-380	ШТРТ1-400-380	ШТРТ1-630-380
Номинальное напряжение трехфазной питающей сети	380				
Номинальная частота	50				
Номинальный ток фазы нагрузки	63	100	200	400	630
Точность поддержания температуры	±1%				
Диапазон регулирования скорости нарастания температуры	10÷100 °С/мин; 10÷100 °С/ч; 10÷100 °С/сут.				
Диапазон изменения выходного напряжения	0,1÷1				

**Таблица 58. Сравнительные параметры ламп широкого применения**

Тип источника света	Световая отдача (лм/Вт)	Средний срок службы (ч)
Лампы накаливания общего назначения (...40, 60, 75, 100...Вт)	10–12	800–1000
Линейные двухцокольные галогенные лампы накаливания (...150...1500...Вт)	20–22	2000
Зеркальные галогенные лампы накаливания на напряжение 12 В (...20...50...Вт)	25–30	2000–3000
Линейные люминесцентные лампы (...18/20, 36/40, 58/65, 80...)	60–80	7000–12000
Компактные люминесцентные лампы (...7, 9, 11, 15, 20, 23...Вт)	50–60	5000–10000
Лампы типа ДРЛ (ртутные лампы) (...80, 125, 250, 400, 700...Вт)	45–5	12000–15000
Лампы типа ДНаТ (натриевые лампы высокого давления) (...70...400...Вт)	90–120	10000–15000
Лампы типа ДНаТ (натриевые лампы низкого давления) (...90...Вт)	100–180	100000
Металлогалогенные лампы 35–150 Вт 250–2000 Вт	70–75/80–100	6000–8000/8000–10000

# Содержание

От автора . . . . .	3
Предисловие . . . . .	3
<b>Глава 1. Общие принципы организации рационального энергопотребления в массовых электроустановках низкого напряжения . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Реальное состояние условий энергопотребления, сложившихся в период с 1990 г. по 2003 г. . . . .	5
1.2. Общие направления и принципы организации энергосбережения в массовых электроустановках низкого напряжения . . . . .	7
<b>Глава 2. Методы и средства оптимизации энергопотребления в нерегулируемом промышленном электроприводе переменного тока . . . . .</b>	<b>12</b>
2.1. Экономичные серии асинхронных электродвигателей и их конструктивно-технологические особенности . . . . .	12
2.2. Специальные энергосберегающие режимы работы асинхронных электродвигателей и некоторые варианты их реализации . . . . .	16
2.3. Техничко-экономические аспекты повышения КПД и коэффициента мощности асинхронных электродвигателей . . . . .	26
2.4. Выбор электродвигателей для приводных устройств . . . . .	29
<b>Глава 3. Частотно-регулируемый электропривод переменного тока . . . . .</b>	<b>33</b>
3.1. Теоретические основы синтеза систем управления электроприводом переменного тока и принципы построения статических преобразователей частоты . . . . .	33
3.2. Современное состояние и тенденции совершенствования частотно-регулируемого электропривода . . . . .	46
3.3. Энергосберегающие технологии на основе частотно-регулируемого электропривода переменного тока . . . . .	67

---

3.4. Выбор основных компонентов частотно-регулируемого электропривода переменного тока . . . . .	71
<b>Глава 4. Коммутационная электроаппаратура низкого напряжения в электротехнических устройствах и системах . . . . .</b>	<b>79</b>
4.1. Современные подходы при создании коммутационных аппаратов низкого напряжения и перспективы их совершенствования . . . . .	79
4.2. Изделия силовой электроники в структуре современных средств автоматизации и устройств коммутации тока . . . . .	87
4.3. Оценка целесообразности замены традиционной электромеханической коммутационной аппаратуры на бесконтактную . . . . .	109
<b>Глава 5. Специальные средства автоматизации, контроля и управления уровнем энергопотребления в промышленном электрооборудовании . . . . .</b>	<b>120</b>
5.1. Программируемые коммутаторы нагрузки, технологические контроллеры и терморегуляторы . . . . .	120
5.2. Технические средства коммерческого учета потребления электроэнергии . . . . .	135
5.3. Однофазные и трехфазные регуляторы мощности . . . . .	140
<b>Глава 6. Энергосберегающие технологии в коммунальной сфере . . . . .</b>	<b>152</b>
6.1. Современные электрообогревательные приборы и системы . . . . .	152
6.2. Средства и методы рационального энергопотребления в светотехнике . . . . .	163
6.3. Автоматизированные системы контроля и управления уровнем энергопотребления (АСКУЭ) . . . . .	167
<b>Глава 7. Определение экономической эффективности разработки и применения технических решений по оптимизации энергопотребления в массовых электроустановках низкого напряжения . . . . .</b>	<b>171</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>175</b>

<b>Приложение</b> . . . . .	<b>177</b>
Значения КПД электродвигателей серий 5A, AI, 4AM . . . . .	178
Привязка рядов мощности и высоты оси вращения для АД основного исполнения серии 5A . . . . .	180
Привязка рядов мощностей и высоты оси вращения АД основного исполнения серии 5АН . . . . .	181
Основные энергетические характеристики электродвигателей серии 5A (A) . . . . .	181
Основные технические характеристики асинхронных электродвигателей для параметрического регулирования . . . . .	183
Сравнительные характеристики электродвигателей серий АД и 4AMC . . . . .	185
Общие характеристики преобразователей частоты (без OMRON) . . . . .	185
Возможности управления отображением информации преобразователей частоты . . . . .	188
Возможности управления вводом-выводом в преобразователях частоты . . . . .	191
Средства защиты электродвигателей в преобразователях частоты . . . . .	193
Основные характеристики новейших преобразователей частоты зарубежного производства . . . . .	195
Соотношение мощности и габаритных размеров преобразователей частоты SILCOVERT TS . . . . .	196
Основные параметры преобразователей частоты фирмы «OMRON» . . . . .	197
Реализуемые функции в преобразователях частоты . . . . .	198
Основные технические характеристики преобразователя частоты серий АП-100 и ПЧ-30 . . . . .	200
Перечень параметров для задания пользовательской характеристики «Напряжение-частота» . . . . .	201
Технические характеристики инверторов серии 3G3HV . . . . .	202
Технические характеристики инверторов серии 3G3FV . . . . .	204
Сравнительные характеристики электромеханического и электронного ключа . . . . .	206
Таблица сравнительных характеристик наиболее распространенных видов приборов силовой электроники . . . . .	206
Значения мощностей, потребляемых катушками пускателей новой серии ПМ12 . . . . .	207

Основные характеристики бесконтактных пускателей серии ПБТ . . . . .	207
Параметры перегрузочной способности пускателей ПБТ . . . . .	208
Реле трехфазное реверсивное 5П55.30ТС. Электрические параметры . . . . .	209
Таблица состояний реле 5П55.30ТС . . . . .	209
Реле твердотельное переменного тока 5П19ТМ. Электрические параметры . . . . .	210
Технические характеристики бесконтактных пускателей ПБР и ПБН . . . . .	212
Электрические параметры реле типа BVSFET производства фирмы «International Rectifier» (IR) . . . . .	212
Двухключевые полумостовые модули на базе МОП-транзисторов отечественного производства. Электрические параметры . . . . .	213
Двухключевые полумостовые модули на биполярных транзисторах с изолированным затвором отечественного производства. Электрические параметры . . . . .	213
Диод-транзисторные и транзистор-диодные модули (чопперы). Электрические параметры . . . . .	214
Основные технические характеристики силовых интеллектуальных модулей . . . . .	214
Основные технические характеристики композиционных жидкометаллических контактных материалов . . . . .	215
Серийные запираемые тиристоры. Основные электрические параметры . . . . .	216
Перспективные типы запираемых тиристоров. Основные электрические параметры . . . . .	217
Технические характеристики тиристорных пусковых устройств типов МРН-М и УПТ-2 . . . . .	218
Основные технические характеристики пускорегулирующих устройств УПР-1 и УПР-2 . . . . .	219
Основные технические характеристики тиристорного пускового устройства серии ТПУЭ . . . . .	220
Технические характеристики УПМК . . . . .	220
Технологические программируемые контроллеры. Сводная таблица основных параметров . . . . .	221
Электросчетчики коммерческого учета, принимаемые на баланс «Энергосбыта» . . . . .	222

---

Технические характеристики счетчиков электроэнергии ЦЭ6822 и ЦЭ6823 . . . . .	224
Основные технические характеристики трехфазных электросчетчиков серий СА и СР . . . . .	225
Электрические параметры электросчетчиков активной энергии СА . . . . .	225
Электрические параметры электросчетчиков реактивной энергии СР . . . . .	226
Характеристики однофазных счетчиков электроэнергии . . . . .	226
Характеристики электросчетчиков серии СЭТ3 . . . . .	228
Технические характеристики электросчетчиков совместного производства России и Словакии серии СА45 . . . . .	229
Технические характеристики электросчетчиков СЭТ4 . . . . .	229
Технические характеристики трехфазных многофункциональных счетчиков серии «АЛЬФА» . . . . .	230
Технические характеристики нагревательных проводов с неметаллической токопроводящей жилой . . . . .	231
Технические характеристики нагревательных проводов ПНКХ и ПНВХ . . . . .	231
Технические характеристики нагревательных проводов повышенной надежности . . . . .	231
Технические характеристики нагревательных кабелей с радиационно-модифицированной полимерной изоляцией . . . . .	232
Технические характеристики нагревательных кабелей в кремнийорганической или поливинилхлоридной изоляции . . . . .	232
Основные технические характеристики фотореле управления освещением ФР-1, ФР-94, ФР-7 . . . . .	233
Данные на фотореле ФР-7 . . . . .	233
Основные технические характеристики тиристорных регуляторов температуры БТРТ1 и ШТРТ1 . . . . .	234
Сравнительные параметры ламп широкого применения . . . . .	234



*Серия «Библиотека инженера»*

**Александр Васильевич Клевцов**

**Средства оптимизации  
потребления электроэнергии**

**Справочно-информационное пособие**

Ответственный за выпуск

**В. Митин**

Научный редактор

**Д. Соснин**

Макет и верстка

**С. Тарасов**

Обложка

**Е. Жбанов**

**ООО «СОЛОН-Пресс»**

*123242, Москва, а/я 20*

*Телефоны:*

*(095) 254-44-10, 252-36-96, 252-25-21*

*E-mail: Solon-Avtor@coba.ru*

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «Альянс-книга»

Тел: (095) 258-91-94, 258-91-95

**ООО «СОЛОН-Пресс»**

127051, г. Москва, М. Сухаревская пл., д. 6, стр. 1 (пом. ТАРП ЦАО)

Формат 60×88/16. Объем 15 п. л. Тираж 1000 экз.

**ООО «Пандора-1»**

Москва, Открытое ш., д. 28

Заказ №