

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение
высшего образования
«Майкопский государственный технологический
университет»

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ **ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и
заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02
Электроэнергетика и электротехника

Майкоп 2019

УДК 621.31(07)
ББК 31.2
Э 45

**Составитель: Старков Н.Н., кандидат технических наук,
доцент**

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов очной и
заочной форм обучения по направлению подготовки 13.03.02
Электроэнергетика и электротехника

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ, ПРИЕМ-НИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ.....	6
1.1. Электроустановки.....	6
1.2. Классификация приемников электрической энергии	7
1.3. Надежность (бесперебойность) питания	10
1.4. Характерные приемники электрической энергии промышленных предприятий	13
Силовые общепромышленные установки.....	14
Электрические осветительные установки.....	15
Преобразовательные установки	15
Электродвигатели производственных механизмов	17
Электрические печи и электротермические установки	17
Электросварочные установки	20
1.5. Режимы работы электроприемников	21
1.6. Виды преобразования параметров электрической энергии	29
Глава 2. ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ.....	35
2.1. Структурные схемы импульсных полупроводниковых преобразователей и виды модуляции	35
2.2. Общая характеристика полупроводниковых преобразователей частоты	40
2.2.1. Общие положения	46
Глава 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ.....	50
3.1. Физические принципы работы и устройство машин постоянного тока	50
3.2. Классификация электрических машин переменного тока	54
Глава 4. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД	59
4.1. Электропривод как система.	59
4.2. Функции электропривода.....	61
4.3. Нагрузочные диаграммы электроприводов и методы их построения.	64
4.4. Основные уравнения электропривода постоянного тока	66
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	69

ВВЕДЕНИЕ

Анализ мирового опыта создания нового и модернизация действующего технологического оборудования промышленных предприятий показывает высокую динамику внедрения в электрооборудование промышленности вентильных преобразователей, развития регулируемых электроприводов, компьютерных средств автоматизации, использования информационных средств. Это обусловлено стремлением к максимальному повышению производительности технологического оборудования и качества производимой продукции. Все ведущие электротехнические корпорации выпускают различного типа вентильные преобразователи электрической энергии, регулируемые электроприводы комплектно с компьютерными средствами автоматизации в виде гибко программируемых систем, предназначенных для широкого использования.

Работа и развитие современной промышленности, сельского хозяйства, транспорта невозможна без автоматизированного электропривода.

В настоящее время эксплуатируемые в производстве регулируемые электроприводы выполнены на электрических двигателях постоянного тока. Однако, несмотря на то, что в большинстве развитых стран мира массовый выпуск регулируемых электроприводов постоянного тока прекращен с начала XXI века, установленные электроприводы постоянного тока еще долгие годы будут применяться в промышленности, так как их замена требует больших капитальных затрат.

На смену регулируемому электроприводу постоянного тока пришел регулируемый электропривод переменного тока, прежде всего на базе асинхронных короткозамкнутых двигателей. Асинхронные двигатели были и остаются самыми распространенными электрическими машинами, но до недавнего времени они применялись в основном в регулируемых электроприводах для вращения механизмов, работающих с постоянной скоростью: вентиляторов, насосов, компрессоров, конвейеров. В последние годы в связи с появлением новых поколений транзисторов и тиристоров, а также относительно недорогих микропроцессоров высокого быстродействия выпуск и эксплуатация электроприводов переменного тока на базе асинхронных электродвигателей стала экономически целесообразной.

Это объясняется также и тем, что технология производства асинхронных двигателей в настоящее время практически полностью автоматизирована. Механическая обработка станин, валов и роторов двигателей производится на автоматических линиях, штамповка листов магнитопровода – на пресс-автоматах. Автоматизирована сборка сердечников

статора, механизирована сборка и заливка ротора. Укладка статорной обмотки производится на автоматических станках, а пропитка и сушка обмоток на автоматических установках .

В электрических машинах переменного тока отсутствуют ограничения по предельной мощности, а питание обмотки статора может производиться от сети с напряжением в десятки киловольт. Отсутствие щеточно-коллекторного узла значительно сократило эксплуатационные затраты на обслуживание электродвигателей переменного тока.

Поэтому в дисциплине «Электрооборудование промышленности» основное внимание будет уделено рассмотрению различных типов электроприводов, являющихся основными элементами технологических установок и потребителями электрической энергии в промышленности и сельском хозяйстве.

Смежными для дисциплины «Электрооборудование промышленности» является следующий перечень дисциплин, а именно: «Электрические машины», «Электрический привод», «Силовые полупроводниковые преобразователи энергии», «Физические основы электроники», «Теоретические основы электротехники», «Физика» и «Высшая математика».

Основными элементами современного электрооборудования промышленных предприятий являются электроустановки и приемники электрической энергии.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ, ПРИЕМНИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

В данном разделе дана характеристика современных электроустановок и приемников электрической энергии промышленных предприятий.

1.1. Электроустановки

Электроустановками (ЭУ) называется совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенные для производства, трансформации, передачи, распределения электроэнергии и преобразования ее в другой вид энергии, изменения рода тока, напряжения, частоты или числа фаз.

По назначению ЭУ подразделяют на:

- установки, производящие электрическую энергию (электростанции);
- установки, потребляющие электрическую энергию (электроприемники);
- установки, преобразующие и распределяющие электрическую энергию (электрические сети, трансформаторные подстанции, преобразовательные подстанции для постоянного тока и переменного тока с частотой отличной от 50 Гц).

Согласно Правил устройства электроустановок (ПУЭ) электротехнические установки, производящие, преобразующие, распределяющие и потребляющие электроэнергию, подразделяются на электроустановки напряжением до 1000 В и электроустановки напряжением выше 1000 В.

Электротехнические установки напряжением до 1000 В выполняются как с глухо заземленной, так и с изолированной нейтралью, а установки постоянного тока – с глухо заземленной и изолированной нулевой точкой.

Электрические установки с изолированной нейтралью следует применять при повышенных требованиях по безопасности (торфяные разработки, угольные шахты и т. п.). При условии, что в этом случае обеспечиваются контроль изоляции сети и целостность пробивных предохранителей, быстрое обнаружение персоналом замыканий на землю и быстрая ликвидация их либо автоматическое отключение участков с замыканием на землю.

В четырехпроводных сетях переменного тока или трехпроводных сетях постоянного тока для установок без повышенной опасности глухое заземление нейтрали обязательно.

Электрические установки с напряжением выше 1000 В делятся на:

1. ЭУ с изолированной нейтралью (напряжения до 35 кВ);
2. ЭУ с нейтралью, подключенной через индуктивное сопротивление на землю, для компенсации емкостных токов (напряжение до 35 кВ и редко 110 кВ);
3. ЭУ с эффективно заземленной нейтралью (напряжения 110 – 150 кВ);
4. ЭУ с глухо заземленной нейтралью (напряжение 220 кВ и выше).

Кроме того, все эти установки подразделяются на установки с малыми токами замыкания на землю (до 500 А) и установки с большими токами замыкания на землю (более 500 А).

1.2. Классификация приемников электрической энергии

Около 70% всей вырабатываемой в нашей стране электрической энергии потребляется приемниками промышленных предприятий.

Приемниками электрической энергии (электроприемники ЭП) называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии.

Приемники электроэнергии промышленных предприятий делятся на следующие группы:

1. Приемники трехфазного тока напряжением до 1000 В, частотой 50 Гц.
2. Приемники трехфазного тока напряжением выше 1000 В, частотой 50 Гц.
3. Приемники однофазного тока напряжением до 1000 В, частотой 50 Гц.
4. Приемники, работающие с частотой, отличной от 50 Гц, питаемые от преобразовательных подстанций и установок.
5. Приемники постоянного тока, питаемые от преобразовательных подстанций и установок.

Для всех приемников перечисленных выше групп необходимо выяснить:

1. требования, предъявляемые к действующим Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) к надежности питания приемников (1-я, 2-я и 3-я категории);
2. режим работы (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный);

3. места расположения приемников электроэнергии и являются ли они стационарными или передвижными.

По частоте тока приемники электроэнергии делятся на приемники промышленной (50 Гц), высокой (выше 10 кГц), повышенной (до 10 кГц) и пониженной (ниже 50 Гц) частотами.

Большинство ЭП использует электрическую энергию нормальной промышленной частоты. Установки высокой и повышенной частоты применяются для нагрева под закалку, ковку и штамповку металлов, а также для плавки металлов. К приемникам с повышенной частотой относятся, например, электрические двигатели в текстильной промышленности при производстве искусственного шелка (частота 133 Гц).

Для преобразования переменного тока промышленной частоты в токи высокой и повышенной частоты служат двигатели-генераторы (электромашинные преобразователи), а также тиристорные или ионные преобразователи. Для получения повышенной частоты до 10 кГц применяют преимущественно тиристорные преобразователи (инверторы). Для получения частот 10 кГц и выше применяются ламповые генераторы. От ионных генераторов можно получать до 2800 Гц. К приемникам с пониженной частотой относятся коллекторные электродвигатели, применяемые для транспортных целей (16 2/3 Гц), перемешиватели жидкого металла (до 25 Гц) и индукционные нагревательные устройства для отливки крупных деталей. Переменный ток пониженной частоты в промышленных установках широкого применения не имеет.

В настоящее время электроснабжение промышленных предприятий ведется на переменном трехфазном токе. Для питания групп приемников постоянного тока сооружаются преобразовательные подстанции, на которых устанавливаются преобразовательные агрегаты: полупроводниковые выпрямители, ртутные выпрямители, двигатели-генераторы и механические выпрямители.

Преобразовательные агрегаты питаются от сети трехфазного тока и являются, поэтому приемниками трехфазного тока.

Приемники постоянного тока, имеющие индивидуальные преобразовательные агрегаты: электропривод по системе генератор-двигатель, ионный электропривод и т.п., являются с точки зрения электроснабжения приемниками трехфазного тока.

Часто встречающимися приемниками постоянного тока, требующими питания от преобразовательных подстанций, являются внутризаводской электрифицированный транспорт, некоторые установки, использующие явление электролиза, некоторые электродвигатели подъемно-транспортных и вспомогательных механизмов.

Приемники электрической энергии могут быть подразделены на группы по сходству режимов, т.е. по сходству графиков нагрузки. Деление потребителей на группы позволяет более точно находить суммарную электрическую нагрузку.

Различают три характерные группы приемников:

1. Приемники, работающие в режиме с продолжительно неизменной или мало меняющейся нагрузкой. В этом режиме электрическая машина или аппарат может работать продолжительное время без повышения температуры отдельных частей машины или аппарата свыше допустимой. Примерами приемников, работающих в этом режиме, являются электродвигатели компрессоров, насосов, вентиляторов и т. п.

2. Приемники, работающие в режиме кратковременной нагрузки. В этом режиме рабочий период машины или аппарата не настолько длителен, чтобы температура отдельных частей машины или аппарата могла достигнуть установившегося значения. Период остановки машины или аппарата настолько длителен, что машина практически успевает охладиться до температуры окружающей среды. Примерами данной группы приемников являются электродвигатели электроприводов вспомогательных механизмов металлорежущих станков (механизмы подъема поперечины, зажимы колонн, двигатели быстрого перемещения суппортов и др.), гидравлических затворов и т. п.

3. Приемники, работающие в режиме повторно-кратковременной нагрузки. В этом режиме кратковременные рабочие периоды машины или аппарата чередуются с кратковременными периодами отключения. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ) и длительностью цикла. В повторно-кратковременном режиме электрическая машина или аппарат может работать с допустимой для них относительной продолжительностью включения неограниченное время, причем превышение температур отдельных частей машины или аппарата не выйдет за пределы допустимых значений. Примером этой группы приемников являются электродвигатели кранов, сварочные аппараты и т. п.

Для перечисленных выше режимов работы приемников в соответствии с ГОСТ 183-74 электропромышленность выпускает электродвигатели, рассчитанные на указанные условия работы.

В действительности график нагрузки каждого приемника отличается от заданного при проектировании. На режим работы приемника влияют технологические особенности каждой отрасли промышленности. График нагрузки приемника является основным показателем, по которому его следует классифицировать.

Кроме разделения потребителей по режимам работы следует учитывать несимметричность нагрузки или неравномерность загрузки фаз. К симметричным нагрузкам относятся электродвигатели и трехфазные печи. К несимметричным нагрузкам (одно- и двухфазным) следует отнести электрическое освещение, однофазные и двухфазные печи, однофазные сварочные трансформаторы и т. п. В том случае, когда распределить их симметрично по фазам не удастся.

1.3. Надежность (бесперебойность) питания

С точки зрения обеспечения надежного и бесперебойного питания, приемники электрической энергии делятся на четыре категории:

Особая категория — это приемники, перерыв в электроснабжении которых недопустим. К ним предъявляются требования по бесперебойной работе, которая необходима для безаварийной работы производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего оборудования. К ним относятся электродвигатели задвижек и запорной арматуры, приводы компрессоров, вентиляторов, насосов, подъемных машин на подземных рудниках, обеспечивающих своевременную эвакуацию людей, а также аварийное освещение в некоторых производствах. На ряде предприятий прекращение вентиляции может вызвать опасную концентрацию горючих и токсичных газов, останов насосов может привести к пожару или взрыву.

1-я категория — приемники, перерыв в электроснабжении которых может повлечь за собой опасность для жизни людей или значительный материальный ущерб, связанный с повреждением оборудования, массовым браком продукции или длительным расстройством сложного технологического процесса производства. Удельный вес электроприемников первой категории в большинстве отраслей промышленности невелик, за исключением химических и металлургических производств. На нефтехимических заводах и заводах синтетического каучука нагрузка потребителей 1-ой категории составляет 75 – 80 %; на металлургических заводах, имеющих в своем составе только коксохимические, доменные и конверторные цехи, она равна 70 – 80 %; на металлургических заводах с полным металлургическим циклом нагрузка 1-ой категории достигает 25 – 40 %.

2-я категория – приемники, перерыв в электроснабжении которых связан с существенным недоотпуском продукции, простоем людей, механизмов, промышленного транспорта и нарушению нормальной деятельности значительного числа городских и сельских жителей. Группа

потребителей 2-ой категории является наиболее многочисленной в большинстве отраслей промышленности.

3-я категория – приемники, не подходящие под определения 1-й и 2-й категорий (например, приемники второстепенных цехов, не определяющих технологический процесс основного производства). Для электроснабжения электроприемников 3-ей категории достаточно одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения (СЭС), не превышают 1 сутки.

Вопрос о надежности электроснабжения потребителей связан с числом источников питания, схемой электроснабжения и категорией потребителей.

Источником питания (ИП) или центром питания (ЦП) называется распределительное устройство генераторного напряжения (УГН) электростанции или распределительное устройство вторичного напряжения (РУНН) понижающей подстанции энергосистемы или подстанции 35-220 кВ промышленного предприятия, к которому присоединены распределительные сети предприятия.

Для электроснабжения особой категории электроприемников должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания (ИП).

Независимым источником питания электроприемника или группы электроприемников называется ИП, на котором сохраняется напряжение в пределах, регламентированных для послеаварийного режима, при исчезновении его на других источниках питания этих электроприемников. На промышленных предприятиях к числу независимых ИП можно отнести энергосистему и собственную промышленную теплоэлектроцентраль (ТЭЦ). Так же генераторы электростанций, работающие на разные секции (системы) шин и имеющие независимые первичные двигатели (турбины). К независимым источникам питания можно отнести линии, секции, трансформаторы разных подстанций энергосистемы, аккумуляторные батареи. Практически независимыми источниками являются такие ИП, у которых при коротком замыкании на шинах другого источника питания напряжение должно сохраняться на уровне не менее 60 % номинального напряжения сети $U_{ном}$. Указанный предел установлен для устойчивой работы ЭП в условиях аварийного режима в течение времени действия релейной защиты и автоматики. Для крупных энергоемких предприятий независимыми ИП могут являться территориально разобщенными ИП. Нагрузка между этими ИП распределяется в зависимости от мощности и удаленности источников питания, от сезонности работы предприятия. В общем случае к числу независимых источников

питания относятся две секции или системы шин одной или двух электростанций и подстанций при одновременном соблюдении следующих условий:

а) каждая секция или система шин в свою очередь имеет питание от независимого источника питания;

б) секции (системы) шин не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключающаяся при нарушении нормальной работы одной секции (системы) шин.

Приемники 1-ой категории должны иметь не менее двух независимых источников питания и перерыв их электроснабжения при аварии на одном из ИП может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

Приемники 2-ой категории могут иметь один – два источника питания (решается конкретно в зависимости от значения, которое имеет данное промышленное предприятие в народном хозяйстве страны, и местных условий). Для ЭП 2-ой категории при нарушении электроснабжения одного ИП допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригадой.

Приемники 3-ей категории, как правило, могут иметь один источник питания, но если по местным условиям можно обеспечить питание без существенных затрат и от второго источника, то применяется резервирование питания и для этой категории приемников. Допускается питание электроприемников 2-ой категории по одной воздушной линии, в том числе с кабельной вставкой, если обеспечена возможность проведения аварийного ремонта этой линии за время не более 1 суток. Кабельные вставки этой линии должны выполняться двумя кабелями, каждый из которых выбирается по длительно допустимой нагрузке линии. Допускается питание ЭП 2-ой категории по одной кабельной линии, состоящей не менее чем из двух кабелей, присоединенных к одному общему аппарату. При наличии *централизованного (передвижного) складского резерва трансформов* и возможности замены повредившегося трансформатора за время не более 1 суток допускается питание электроприемников 2-ой категории от одного трансформатора.

Практика эксплуатации систем электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий показывает, что наиболее надежными являются системы электроснабжения, содержащие минимальное количество коммутационных аппаратов (выключателей, разъединителей и т. п.), смонтированные с высоким качеством, при своевременности выполнения профилактических ремонтов и замены устаревшего электрооборудования.

На надежность СЭС влияют соответствие пропускной способности элементов сети нагрузкам потребителей; использование перегрузочной способности сети, схемы соединения элементов сети; наличие чувствительных, быстродействующих и селективных защит; наличие или отсутствие в энергосистеме дефицита мощности и запасных резервных элементов; четкость всей структуры управления предприятием и другие факторы.

Следует отметить, что развитие электрических систем по мере роста нагрузок сопровождается повышением надежности электроснабжения и улучшением использования всех элементов сети в нормальных условиях.

При проектировании СЭС предприятия следует учитывать удельный вес электроприемников той или иной категории. Если преобладают нагрузки 1-ой категории, то необходимо предусмотреть автоматическое включение резерва. Если же удельный вес электроприемников 1-ой категории невелик, то целесообразны более дешевые схемные решения при помощи резервных перемычек между соседними трансформаторными подстанциями (ТП). Иногда такое резервирование осуществляется на цеховых силовых распределительных пунктах, к которым подключены электроприемники 1-ой и 2-ой категорий. Питание этих пунктов следует производить от разных ТП или разных секций подстанции, а для переключения применить простейшую автоматику.

Для обеспечения требуемой надежности питания всех ЭП предприятия при послеаварийных режимах ПУЭ допускают возможность отключения неответственных потребителей в этих режимах. Поэтому часто требуется специальное рассмотрение схемы питания потребителей при послеаварийных режимах.

1.4. Характерные приемники электрической энергии промышленных предприятий

Для систем электроснабжения промышленных предприятий можно выделить следующие типы характерных приемников электрической энергии:

1. Силовые промышленные установки
2. Электрические осветительные установки
3. Преобразовательные установки
4. Электродвигатели производственных механизмов
5. Электрические печи и электротермические установки
6. Электросварочные установки

Силовые общепромышленные установки

К этой группе приемников относятся компрессоры, вентиляторы, насосы и подъемно-транспортные устройства.

Двигатели компрессоров, вентиляторов и насосов работают примерно в одинаковом режиме и в зависимости от мощности снабжаются электрической энергией на напряжение от 0,22 до 10 кВ. Мощность таких установок изменяется в очень широком диапазоне от долей единицы до тысяч киловатт.

Питание двигателей производится током промышленной частоты 50 Гц. Характер нагрузки, как правило, ровный, особенно для мощных установок. Перерыв в электроснабжении чаще всего недопустим и может повлечь за собой опасность для жизни людей, серьезное нарушение технологического процесса или повреждение оборудования. Например, прекращение подачи сжатого воздуха на машиностроительном заводе, где режущий инструмент крепится при помощи пневматических устройств, может вызвать ранения обслуживающего персонала. Прекращение электроснабжения насосной станции на металлургическом заводе может вывести из строя такую ответственную установку, как доменная печь, и причинить крупные убытки. Последствия отключения насосных установок во время пожара не нуждаются в пояснениях. В ряде цехов прекращение питания двигателей вентиляторов может вызвать массовые отравления работающего персонала. Таких примеров можно привести большое количество. В указанных выше случаях установки следует относить к потребителям 1-ой категории.

Потребители рассматриваемой группы создают нагрузку равномерную и симметричную по всем трем фазам. Толчки нагрузки имеют место только при пуске. Коэффициент мощности достаточно стабилен и обычно имеет значение 0,8–0,85.

Для электропривода крупных насосов, компрессоров и вентиляторов чаще всего применяют синхронные двигатели, работающие с опережающим коэффициентом мощности.

Подъемно-транспортные устройства работают в повторно-кратковременном режиме. Для этих устройств характерны частые толчки нагрузки, в связи с резкими изменениями нагрузки коэффициент мощности также изменяется в значительных пределах, в среднем от 0,3 до 0,8. По бесперебойности питания эти устройства должны быть отнесены (в зависимости от места работы и установки) к потребителям 1-ой и 2-ой категорий. В подъемно-транспортных устройствах применяется как переменный (50 Гц), так и постоянный ток. В большинстве случаев нагрузку от подъемно-транспортных устройств на стороне переменного тока следует считать симметричной по всем трем фазам.

Электрические осветительные установки

Электрические светильники представляют собой однофазную нагрузку, однако благодаря незначительной мощности приемника (обычно не более 2 кВт) в электрической сети при правильной группировке осветительных приборов можно достичь достаточно равномерной нагрузки по фазам (с несимметрией не более 5–10%).

Характер нагрузки равномерный, без толчков, но ее значение изменяется в зависимости от времени суток, года и географического положения. Частота тока общепромышленная, равная 50 Гц. Коэффициент мощности для ламп накаливания равен 1, для газоразрядных ламп 0,6. Следует иметь в виду, что в проводах, особенно нулевых, при применении газоразрядных ламп появляются высшие гармоники тока.

Кратковременные (несколько секунд) аварийные перерывы в питании осветительных установок допустимы. Продолжительные перерывы (минуты и часы) в питании для некоторых видов производства недопустимы. В таких случаях применяется резервирование питания от второго источника тока (в некоторых случаях даже от независимого источника постоянного тока). В тех производствах, где отключение освещения угрожает безопасности людей, применяются специальные системы аварийного освещения. Для осветительных установок промышленных предприятий применяются напряжения от 6 до 220 В.

Преобразовательные установки

Для преобразования трехфазного тока на территории промышленного предприятия сооружаются преобразовательные установки. В этих установках осуществляется преобразование трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц в постоянный или, в трехфазный или однофазный ток пониженной, повышенной или высокой частоты.

В зависимости от типа преобразователей тока преобразовательные установки делятся на:

1. полупроводниковые преобразовательные установки;
2. преобразовательные установки с ртутными выпрямителями;
3. преобразовательные установки с двигателями-генераторами,
4. преобразовательные установки с механическими выпрямителями.

По своему назначению преобразовательные установки служат для питания:

1. двигателей ряда машин и механизмов;
2. электролизных ванн;
3. внутриводского электрического транспорта;
4. электрофильтров;
5. сварочных установок постоянного тока и др.

Преобразовательные установки для целей электролиза широко применяются в цветной металлургии для получения электролитических алюминия, свинца, меди и пр. В таких установках ток промышленной частоты напряжением 6–35 кВ, как правило, при помощи выпрямителей преобразуется в постоянный ток необходимого по технологическим условиям напряжения (до 825 В).

Перерыв в питании электролизных установок не приводит к тяжелым авариям с повреждением основного оборудования и может быть допущен на несколько минут, а в некоторых случаях на несколько часов. Здесь перерыв питания связан в основном с недовыпуском продукции. Однако вследствие обратной ЭДС электролизных ванн в некоторых случаях могут иметь место перемещения выделившихся металлов обратно в раствор ванны и, следовательно, дополнительная затрата электроэнергии на новое выделение этого же металла. Электролизные установки должны снабжаться электрической энергией, как приемники 1-ой категории, но допускающие кратковременные перерывы в питании. Режим работы электролизных установок дает достаточно равномерный и симметричный по фазам график нагрузки. Коэффициент мощности электролизных установок равен примерно 0,85–0,9. Особенностью электролизного процесса является необходимость поддержания постоянства выпрямленного тока, и в связи с этим возникает необходимость регулирования напряжения со стороны переменного тока.

Преобразовательные установки для внутрипромышленного электрического транспорта (откатка, подъем, различные виды перемещения грузов и т.п.) по мощности относительно невелики (от сотен до 2000 – 3000 кВт). Коэффициент мощности таких установок колеблется в пределах 0,7–0,8. Нагрузка на стороне переменного тока симметрична по фазам, но резко изменяется за счет пиков тока при работе тяговых электродвигателей. Перерыв в питании приемников этой группы может повлечь за собой порчу продукции и даже оборудования (особенно на металлургических заводах). Прекращение работы транспорта вообще вызывает серьезные осложнения в работе предприятия, и поэтому эта группа потребителей должна снабжаться электроэнергией, как приемники 1-ой или 2-ой категории, допускающие кратковременный перерыв в питании. Питание этих установок производится переменным током промышленной частоты напряжением 0,4–35 кВ.

Преобразовательные установки для питания электрофильтров (с механическими выпрямителями) до 100–200 кВт имеют широкое применение для очистки газов. Они питаются переменным током промышленной частоты от специальных трансформаторов, имеющих на первичной обмотке напряжение 6–10 кВ, а на вторичной до 110 кВ. Коэф-

коэффициент мощности этих установок равен 0,7–0,8. Нагрузка на стороне высокого напряжения симметрична и равномерна. Перерывы в питании допустимы и длительность их зависит от технологического процесса производства. В таких производствах, как химические заводы, эти установки могут быть отнесены к приемникам 1-ой и 2-ой категорий.

Электродвигатели производственных механизмов

Этот вид приемников встречается на всех промышленных предприятиях. Для электропривода современных станков применяются все виды двигателей. Мощность двигателей чрезвычайно разнообразна, изменяется от долей до сотен киловатт и больше. В станках, где требуются высокие частоты вращения и ее регулирование, применяются двигатели постоянного тока, питающиеся от выпрямительных установок. Напряжение сети 660–380/220 В с частотой 50 Гц. Коэффициент мощности колеблется в широких пределах в зависимости от технологического процесса. По надежности электроснабжения эта группа приемников относится, как правило, ко 2-ой категории. Однако имеется ряд станков, где перерыв в питании недопустим по условиям техники безопасности (возможны травмы обслуживающего персонала) и по причине возможной порчи изделий, особенно при обработке крупных дорогостоящих деталей.

Электрические печи и электротермические установки

По способу превращения электрической энергии в тепловую энергию можно разделить на:

1. печи сопротивления;
2. индукционные печи и установки;
3. дуговые электрические печи;
4. печи со смешанным нагревом.

1. *Печи сопротивления* по способу нагрева подразделяются на печи *косвенного действия* и *печи прямого действия*. Нагрев материала в печах косвенного действия происходит за счет тепла, выделяемого нагревательными элементами при прохождении по ним электрического тока. Печи косвенного нагрева являются установками напряжением до 1000 В и питаются в большинстве случаев от сетей 380 В промышленной частоты 50 Гц. Печи выпускаются однофазного и трехфазного исполнения мощностью от единиц до нескольких тысяч киловатт. Коэффициент мощности в большинстве случаев равен 1.

В печах прямого действия нагрев осуществляется теплом, выделяемым в нагреваемом изделии при прохождении по нему электрического тока. Печи выполняются одно- и трехфазными мощностью до

3000 кВт; питание осуществляется током промышленной частоты 50 Гц от сетей 380/220 В или через понижающие трансформаторы от сетей более высокого напряжения. Коэффициент мощности лежит в интервале от 0,7 до 0,9. Большинство печей сопротивления в отношении бесперебойности электроснабжения относится к приемникам электрической энергии 2-ой категории.

2. *Печи и установки индукционного и диэлектрического нагрева* подразделяются на плавильные печи и установки для закалки и сквозного нагрева диэлектриков.

Расплавление металла в индукционных печах осуществляется теплом, возникающим в нем при прохождении индукционного тока.

Плавильные печи изготавливаются со стальным сердечником и без него. Печи с сердечником применяются для плавления цветных металлов и их сплавов. Питание печей осуществляется током промышленной частоты 50 Гц напряжением 380 В и выше в зависимости от мощности. Печи с сердечником выпускаются одно-, двух- и трехфазного исполнения мощностью до 2000 кВА. Коэффициент мощности колеблется в пределах 0,2–0,8 (печи для плавки алюминия имеют $\cos \varphi = 0,2 - 0,4$, для плавки меди 0,6–0,8). Печи без сердечника применяются для выплавки высококачественной стали и реже – цветных металлов. Питание промышленных печей без сердечника может быть осуществлено током промышленной частоты 50 Гц от сетей напряжением 380 В и выше и током повышенной частоты 500–10000 Гц от тиристорных или электромашинных преобразователей. Приводные двигатели преобразователей питаются током промышленной частоты.

Печи выпускаются мощностью до 4500 кВА, коэффициент мощности их очень низок: от 0,05 до 0,25. Все плавильные печи относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

Установки для закалки и сквозного нагрева в зависимости от назначения питаются при частотах от 50 Гц до сотен килогерц. Питание установок повышенной и высокой частоты производится соответственно от тиристорных или машинных преобразователей индукторного типа и ламповых генераторов. Эти установки относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

В установках для нагрева диэлектриков нагреваемый материал помещается в электрическое поле конденсатора, и нагрев происходит за счет токов смещения. Эта группа установок широко применяется для клейки и сушки древесины, нагрева пресс порошков, пайки и сварки пластиков, стерилизации продуктов и т. п. Питание осуществляется током с частотой 20–40 МГц и выше. В отношении бесперебойности элек-

троснабжения установки для нагрева диэлектриков относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

3. Дуговые электрические печи по способу нагрева разделяются на печи прямого и косвенного действия.

В печах прямого действия нагрев и расплавление металла осуществляются теплом, выделяемым электрической дугой, горящей между электродом и расплавляемым металлом. Дуговые печи прямого действия подразделяются на ряд типов, характерными из которых являются сталеплавильные и вакуумные.

Сталеплавильные печи питаются током промышленной частоты напряжением 6–110 В. В через понижающие трансформаторы. Печи выпускаются с трехфазным питанием мощностью до 45000 кВА в единице. Коэффициент мощности 0,85–0,9. В процессе работы в период расплавления шихты в дуговых сталеплавильных печах происходят частые эксплуатационные короткие замыкания (к.з.). Ток эксплуатационного короткого замыкания превышает номинальный в 2,5–3,5 раза. Короткие замыкания вызывают снижение напряжения на шинах подстанции, что отрицательно сказывается на работе других приемников электрической энергии. В связи с этим совместная работа дуговых печей и других потребителей от общей подстанции допустима в том случае, если при питании от мощной энергосистемы суммарная мощность печей не превышает 40% мощности понизительной подстанции, а при питании от маломощной системы 15–20%. Вакуумные дуговые печи выполняются мощностью до 2000 кВт. Питание осуществляется постоянным током, напряжением 30–40 В. В качестве источников электрической энергии применяются электромашинные преобразователи и полупроводниковые выпрямители, включаемые в сеть переменного тока 50 Гц.

Нагрев металла в печах косвенного действия осуществляется теплом, выделяемым электрической дугой, горящей между угольными электродами. Дуговые печи косвенного нагрева кашли применение для выплавки меди и ее сплавов. Мощность печей сравнительно невелика (до 500 кВА); питание производится током промышленной частоты 50 Гц от специальных печных трансформаторов. В отношении бесперебойности электроснабжения эти печи относятся к приемникам электрической энергии 1-й категории, допускающим кратковременные перерывы в питании.

4. Электрические печи со смешанным нагревом можно разделить на рудотермические и печи электрошлакового переплава.

В рудотермических печах материал нагревается теплом, которое выделяется при прохождении электрического тока по шихте и горении дуги. Печи применяются для получения ферросплавов, корунда, вы-

плавки чугуна, свинца, возгонки фосфора, выплавки медного и медно-никелевого штейна. Питание осуществляется током промышленной частоты через понижающие трансформаторы. Мощность некоторых печей очень велика, до 100 МВА (печь для возгонки желтого фосфора). Коэффициент мощности 0,85–0,92. В отношении бесперебойности электроснабжения печи для рудотермических процессов относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

В печах электрошлакового переплава нагрев осуществляется за счет тепла, выделяющегося в шлаке при прохождении по нему тока. Расплавление шлака производится теплом электрической дуги. Электрошлаковый переплав применяется для получения высококачественных сталей и специальных сплавов. Питание печей осуществляется током промышленной частоты 50 Гц через понижающие трансформаторы, обычно от сетей 6–10 кВ со вторичным напряжением 45–60 В. Печи выполняются, как правило, однофазными, но могут быть и трехфазными. Коэффициент мощности 0,85–0,95. В отношении надежности электроснабжения печи электрошлакового переплава относятся к приемникам электрической энергии 1-й категории.

При электроснабжении цехов, имеющих вакуумные электрические печи всех типов, необходимо учитывать, что перерыв в питании вакуумных насосов приводит к аварии и браку дорогостоящей продукции. Эти печи следует отнести к приемникам электрической энергии 1-й категории.

Электросварочные установки

Электросварочные установки как приемники делятся на установки, работающие на переменном и постоянном токе. Технологически сварка делится на дуговую и контактную сварку, по способу производства работ на ручную и автоматическую.

Электросварочные агрегаты постоянного тока состоят из двигателя переменного тока и сварочного генератора постоянного тока. При такой системе сварочная нагрузка распределяется по трем фазам в питающей сети переменного тока равномерно, но график ее остается переменным. Коэффициент мощности таких установок при номинальном режиме работы составляет 0,7–0,8; при холостом ходе коэффициент мощности снижается до 0,4. Среди сварочных агрегатов постоянного тока имеются и выпрямительные установки.

Электросварочные установки переменного тока работают на промышленной частоте переменного тока 50 Гц и представляют собой однофазную нагрузку в виде сварочных трансформаторов для дуговой сварки и сварочных аппаратов контактной сварки. Сварка на перемен-

ном токе дает однофазную нагрузку с повторно-кратковременным режимом работы, неравномерной нагрузкой фаз и, как правило, низким коэффициентом мощности (0,3–0,35 для дуговой и 0,4–0,7 для контактной сварки). Сварочные установки питаются от сетей напряжением 380 – 220 В. Сварочные трансформаторы на строительномонтажных площадках характеризуются частыми перемещениями в питающей сети. Это обстоятельство должно быть учтено при проектировании питающей сети. С точки зрения надежности питания, сварочные установки относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

1.5. Режимы работы электроприемников

Согласно ГОСТ 183-74 различают восемь номинальных режимов работы электроприемников (электродвигателей): продолжительный; кратковременный; повторно-кратковременный; повторно-кратковременный с частыми пусками; повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением; перемежающийся; перемежающийся с частыми реверсами; перемежающийся с двумя или более частотами вращения.

Продолжительный номинальный режим работы (S1) – это режим при неизменной номинальной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышение температуры всех частей двигателя, при неизменной температуре окружающей среды, достигают практически установившихся значений. Согласно ГОСТ 183-74 различают восемь номинальных режимов работы электроприемников (электродвигателей): продолжительный; кратковременный; повторно-кратковременный; повторно-кратковременный с частыми пусками; повторно-кратковременный с частыми пусками и электрическим торможением; перемежающийся; перемежающийся с частыми реверсами; перемежающийся с двумя или более частотами вращения.

Продолжительный номинальный режим работы (S1) – это режим при неизменной номинальной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышение температуры всех частей двигателя, при неизменной температуре окружающей среды, достигают практически установившихся значений. Диаграммы потребляемой электродвигателем мощности P_1 , момента на валу M , потерь ΔP и температуры нагрева τ приведены на рис. 1.1.

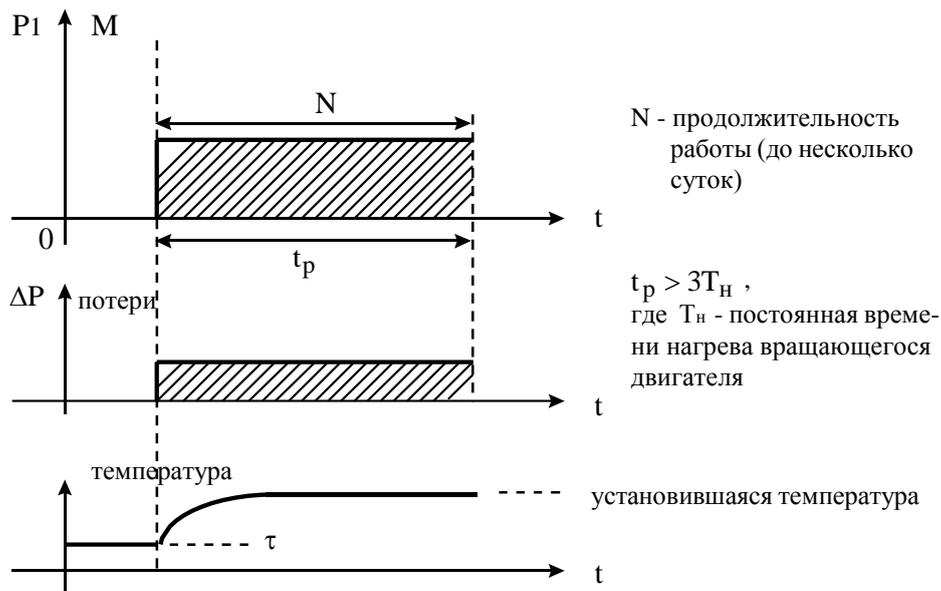


Рис. 1.1. Диаграммы продолжительного режима S1

Режим S2 (кратковременный номинальный режим работы) – режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины; причем за время нагрузки превышение температуры не достигает практически установившихся значений, а во время паузы двигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Работает машина при неизменной нагрузке P в течение времени t_p , недостаточного для достижения всеми частями машины установившейся температуры, после чего следует остановка машины на время, достаточное для охлаждения машины до температуры, не более чем на 2°C превышающей температуру окружающей среды (рис.1.2) Мощность двигателя в кратковременном режиме S2 ориентировочно можно определить по формуле:

$$P_{S2} \leq P_{S1} \cdot \sqrt{\frac{1}{1 - e^{t_p/T}}}, \quad (1)$$

где P_{S1} – номинальная мощность двигателя в длительном режиме S1; T – постоянная времени нагрева двигателя; t_p – время работы; t_0 – время паузы; T_0 – постоянная времени охлаждения неподвижного двигателя; $N = 10, 30, 60, 90$ мин (каталожное время работы), при этом

$$t_p = 3T \text{ а } t_0 > 3T_0$$

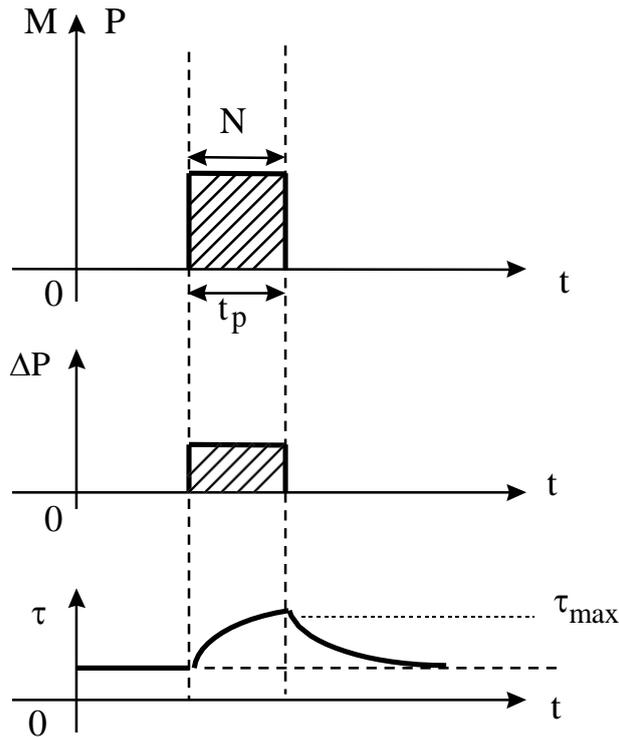


Рис. 1.2. Диаграммы кратковременного режима S2

Режим S3 (повторно-кратковременный номинальный режим работы рис. 1.3) – режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения машины (паузами), причем как рабочие периода, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры могли достигнуть установившихся значений.

В этом режиме работы продолжительность цикла не превышает 10 мин.

$$t_{\text{ц}} \leq 10 \text{ мин и ПВ} \leq 60 \text{ \%}.$$

Режим характеризуется относительной продолжительностью включения, % стандартное ПВ = 15, 25, 40, 60 %, которая определяется по формуле

$$ne = \frac{t_p}{t_p + t_0} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% ,$$

где t_p – время работы, t_0 – время паузы, $t_{\text{ц}}$ – время цикла.

Пусковые потери в этом режиме практически не оказывают влияния на превышение температуры частей машины.

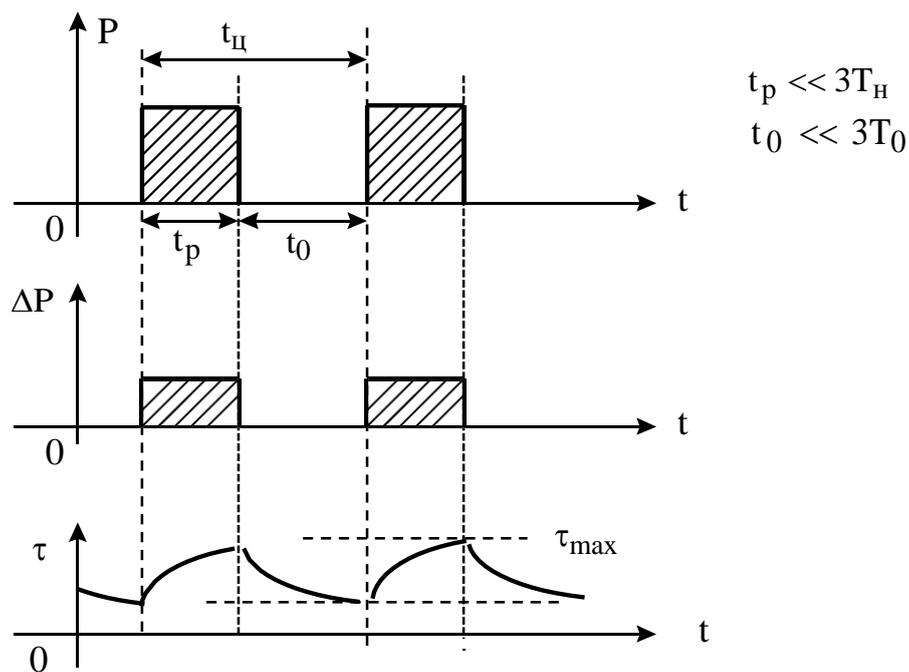


Рис. 1.3. Диаграммы повторно-кратковременного режима S3

Режим S4 (повторно-кратковременный номинальный режим с частыми пусками) – режим, при котором периоды пуска и кратковременной неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения машины, причем рабочие периоды, так и паузы, не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. В этом режиме пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины (рис. 1.4.).

Данный режим характеризуется относительной продолжительностью включения, числом пусков в час и коэффициентом инерции привода. Это последовательность идентичных режимов работы. Каждый, из которых включает время пуска $t_{п}$, время работы при постоянной нагрузке t_p и время стоянки t_0 . За время t_p двигатель не нагревается до установившейся температуры, а время стоянки t_0 не охлаждается до температуры окружающей среды.

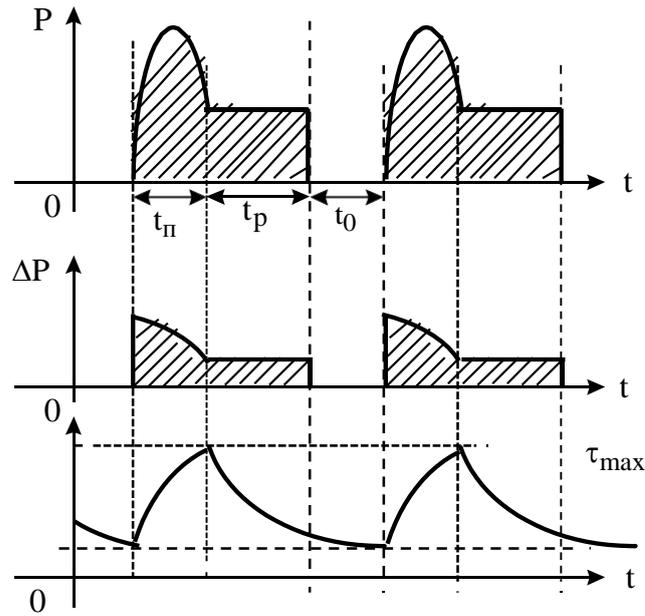


Рис. 1.4. Диаграммы повторно-кратковременного режима S4

Режим S5 (повторно-кратковременный номинальный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением) – это режим, при котором периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического торможения чередуются с периодами отключения машины. Рабочие периоды так и паузы не настолько длительны, чтобы превышение температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (рис.1.5.).

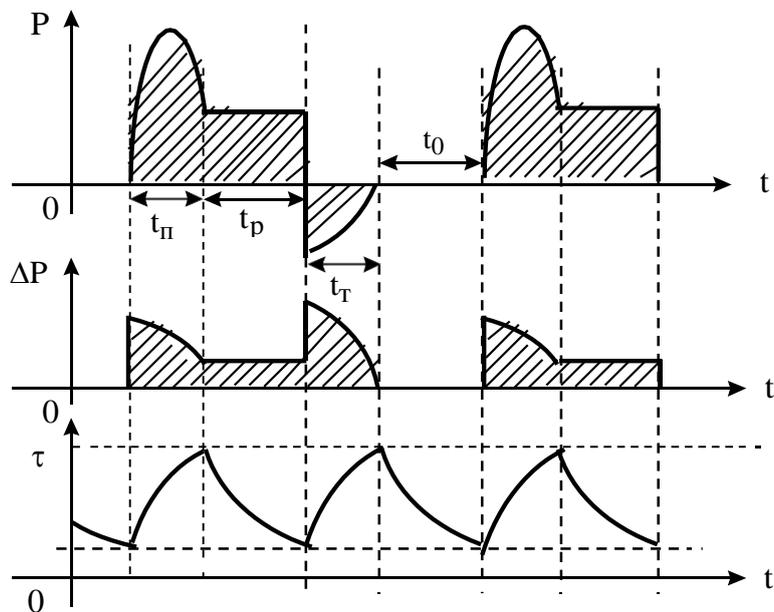


Рис. 1.5. Диаграммы повторно-кратковременного режима S5

В этом режиме потери пусковые и при электрическом торможении оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины. Он характеризуется относительной продолжительностью включения, числом пусков в час, коэффициентом инерции

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\Pi} + t_p + t_T}{t_{\Pi} + t_p + t_T + t_0} \cdot 100\%;$$

Стандартные значения число пусков в час и коэффициентов инерции такие же как и в режиме S4, исключая значение $F1 = 6.3$ и 10 и включая дополнительное $F1 = 2$.

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\Pi} + t_p}{t_{\Pi} + t_p + t_0} \cdot 100\%;$$

Стандартные ПВ – 15, 25, 40, 60 %. Число пусков в час: 30, 60, 120, 240. $F1$ – коэффициент инерции – это отношение суммарного момента инерции привода к моменту инерции якоря двигателя

$$F1 = \frac{J_{\Sigma}}{J_p};$$

Стандартные значения: 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10.

Режим S6 (перемежающийся номинальный режим работы) – режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода, во время которых двигатель не отключается от сети. Как рабочие периоды, так и периоды холостого хода не настолько длительны, чтобы превышение температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений. Продолжительность одного цикла $t_{\Pi} \leq 10$ мин. Относительная продолжительность нагрузки, в %

$$\text{ПН} = \frac{t_p}{t_p + t_{xx}} \cdot 100\%;$$

где t_{xx} - время холостого хода. Стандартные значения ПН - 15, 25, 40, 60 % (рис. 1.6).

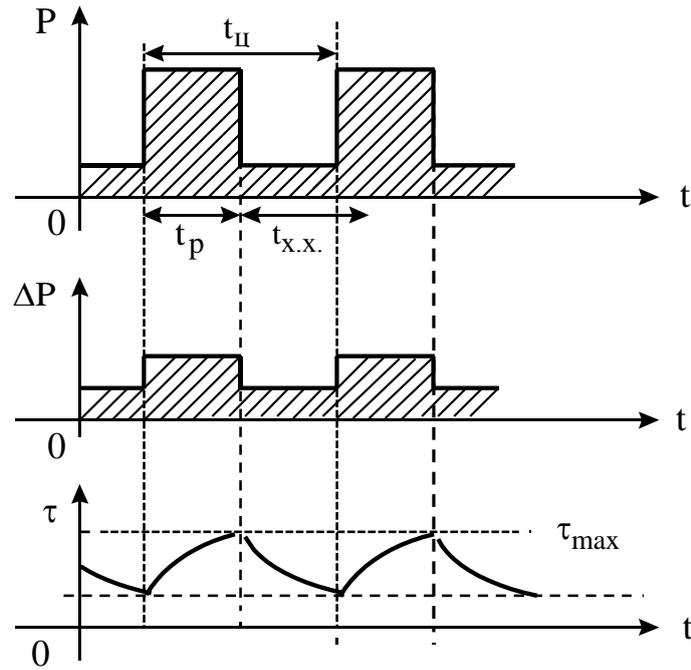


Рис. 1.6. Диаграммы перемежающегося режима S6

Режим S7 (Перемежающийся номинальный режим работы с частыми реверсами) – это режим, при котором периоды реверса чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки. В этом режиме потери при реверсировании оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины, которая работает без остановки, находясь постоянно под напряжением.

Данный режим характеризуется числом реверсов в час: 30, 60, 120, 240 и коэффициентом инерции $F1$ как и для S5.

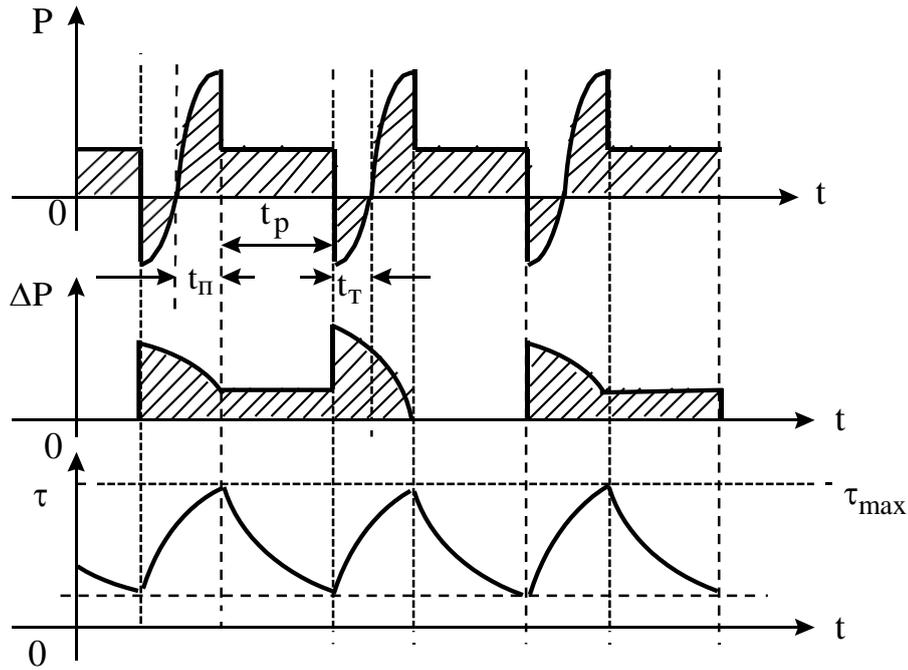


Рис. 1.7. Диаграммы перемежающегося режима S7

Режим S8 (перемежающийся режим работы с двумя или более угловыми скоростями) - это режим, при котором периоды с одной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой угловой скорости при соответствующей этой скорости нагрузке.

В этом режиме потери при переходе с одной угловой скорости на другую оказывают существенное влияние на превышения температуры частей машины.

Данный режим характеризуется числом циклов в час, коэффициентом инерции, относительной продолжительностью нагрузки в % на отдельных ступенях:

$$\text{ПН}_1 = \frac{t_{\Pi} + t_{p1}}{t_{\Pi} + t_{p1} + t_{T1} + t_{p2} + t_{T2} + t_{p3}} \cdot 100\% ;$$

$$\text{ПН}_2 = \frac{t_{T1} + t_{p2}}{t_{\Pi} + t_{p1} + t_{T1} + t_{p2} + t_{T2} + t_{p3}} \cdot 100\% ;$$

$$\text{ПН}_3 = \frac{t_{T2} + t_{p3}}{t_{\Pi} + t_{p1} + t_{T1} + t_{p2} + t_{T2} + t_{p3}} \cdot 100\% ,$$

где t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} - время работы на каждой угловой скорости, t_{T1}, t_{T2} - время электрического торможения, t_{Π} - время пуска.

Стандартные значения числа циклов в час: 30, 60, 120, 240.

$$F1 = 1,2; 1,6; 2; 2,5; 4.$$

1.6. Виды преобразования параметров электрической энергии

В настоящее время более 40% всей вырабатываемой электрической энергии, обладающей определенными исходными параметрами (величиной, формой, частотой напряжения и тока), преобразуется в электрическую энергию с другими параметрами, отличными от исходных параметров. Электроэнергия, производимая для широких потребительских целей, в основном вырабатывается и передается переменным 3-х фазным током промышленной частоты ($f = 50$ Гц), вследствие удобства его трансформации.

Однако в ряде отраслей промышленности и техники, таких как электротранспорт, электротехнологии, автоматизация промышленных установок, сварочная и бытовая техника, радиоэлектроника и т.п., требуется электроэнергия, отличающаяся от промышленной частоты по частоте, форме выходного напряжения или тока, числу фаз, возможности регулирования параметров электроэнергии.

Поэтому в дальнейшем значительная часть этой энергии преобразуется в энергию постоянного тока; во многих случаях бывает необходимо, наоборот, преобразовать энергию постоянного тока в энергию переменного тока или энергию постоянного тока одного напряжения в энергию постоянного тока другого напряжения и т.д.

При этом можно выделить следующие виды энергетического преобразования параметров электрической энергии:

1. Трансформация.
2. Регулирование.
3. Стабилизация.
4. Выпрямление.
5. Инвертирование.
6. Преобразование частоты.
7. Преобразование числа фаз.
8. Симметрирование.
9. Преобразование источника напряжения в источник тока.

В зависимости от требований практики виды преобразования реализуются различными методами, из которых наиболее известны три, имеющие разную физическую природу.

Первый метод основан на физических явлениях в линейных цепях, таких как резонанс, ответвление и отражение части потока энергии. Резонанс достаточно широко используется для осуществления стабилизации, симметрирования, компенсации фазовых сдвигов и мощности искажения в системах стабилизации напряжения и симметрирования токов в цеховых подстанциях.

В индуктивно-емкостных преобразователях явление резонанса используют для преобразования источника напряжения в источник тока и наоборот и фильтрации (подавлению) пульсаций в электрических цепях.

Трансформация напряжений и токов так же относится к первому методу преобразования энергии.

Второй метод основан на физических явлениях в нелинейных цепях [16,17]. Функциональные возможности этого метода значительно шире. Здесь могут эффективно осуществляться регулирование, стабилизация; преобразование частоты, числа фаз, симметрирование, компенсация, преобразование источника напряжения в источник тока, фильтрация, автомодуляция. Характерным примером устройств, реализующих регулирование, являются дроссели насыщения и подмагничиваемые трансформаторы, получившие исключительно широкое распространение в преобразовательной технике. Стабилизация наиболее эффективно реализуется феррорезонансными цепями [16, 20, 22, 27], которые также составили целую эпоху в электромагнитной технике и продолжают совершенствоваться. Преобразование частоты и числа фаз основано на способности нелинейных индуктивностей и емкостей генерировать высшие гармоники напряжения и тока с различными фазами. Это свойство с успехом использовано в удвоителях, утроителях и умножителях частоты с большей кратностью, в делителях частоты, а также в преобразователях однофазного напряжения в двухфазное, трехфазное и т. д.

Третий метод преобразования – импульсно-модуляционный. Его главная отличительная черта заключается в принудительном квантовании потока энергии для осуществления того или иного вида преобразования. Каких-либо новых физических явлений по отношению к тем, что определяют первый и второй методы, здесь нет. Все системы с полностью управляемыми ключевыми элементами описываются теорией линейных электрических цепей с переменными во времени параметрами, а системы с не полностью управляемыми ключами, у которых не заданы моменты размыкания, или системы с интегральными законами формирования импульсных последовательностей, относятся к нелинейным.

Эти вопросы и целый ряд других инженерных задач во многих областях электротехники позволяют решать силовые преобразователи электрической энергии. Вначале такие преобразователи выполнялись исключительно на основе электромеханических систем, например, в системе «Двигатель–Генератор», когда двигатель, питаемый электроэнергией одного вида, приводит во вращение генератор, вырабатывающий электроэнергию другого вида или с другими параметрами. В настоящее время такие системы почти полностью

вытеснены полупроводниковыми статическими преобразователями, имеющими существенные преимущества, такие как:

- отсутствие вращающихся частей;
- отсутствие скользящих контактов;
- достаточно высокий КПД;
- приемлемые массогабаритные показатели;
- простота обслуживания.

Современная классификационная схема подразделяет силовые преобразователи на следующие группы:

1. выпрямители, преобразующие энергию переменного тока в энергию постоянного тока;
2. инверторы, преобразующие энергию постоянного тока в энергию переменного тока;
3. преобразователи переменного тока, преобразующие энергию переменного тока одних параметров в энергию переменного тока других параметров;
4. преобразователи энергии постоянного тока одного напряжения в энергию постоянного тока другого напряжения.

Все возможные виды преобразователей электрической энергии с одной стороны являются нагрузкой для первичной питающей сети и вторичным активным (регулируемым) источником для нагрузки. По этой причине при эксплуатации и разработки все виды преобразователей электрической энергии должны обеспечивать электромагнитное совмещение базовых преобразовательных ячеек с питающей сетью и нагрузкой. На рис. 1.8 приведена классификация базовых ячеек преобразователей электрической энергии [22].

1. Преобразователи переменного (двунаправленного) тока в постоянный (однонаправленный) ток, называемые *выпрямителями*, которые обозначают ДТ/ОТ, аналогично принятому сокращению в англоязычной литературе АС-DC (Alternative Current - Direct Current, т. е. переменный ток – постоянный ток).

2. Преобразователи переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты, возможно и с другим числом фаз, называемые *преобразователями частоты*, которые обозначим, следуя той же логике, как ДТ/ДТ, аналогично зарубежному техническому обозначению АС-АС.

3. Преобразователи переменного тока с одним числом фаз в переменный ток той же частоты с другим числом фаз, называемые *преобразователями числа фаз* и являющиеся, по сути, частным случаем преды-

дущего типа преобразователей и поэтому обозначаемые в дальнейшем ДТ/ДТ(Ф).

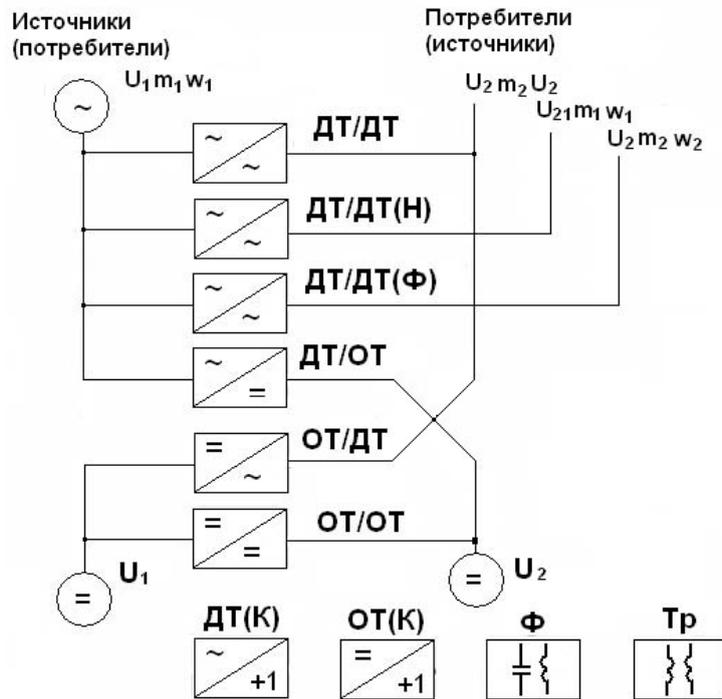


Рис. 1.8. Классификация базовых ячеек преобразователей электрической энергии

4. Преобразователи переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты, отличающейся в фиксированное число фаз M от исходной частоты, называемые *умножителями частоты*, также являющиеся другим частным случаем преобразователя частоты и поэтому обозначаемые в дальнейшем ДТ/ДТ(Ч).

5. Преобразователи переменного напряжения в регулируемое переменное напряжение той же частоты, называемые *регуляторами переменного напряжения* и обозначаемые ДТ/ДТ(Н).

6. Преобразователи постоянного тока в переменный ток, называемые *инверторами*, которые обозначим ОТ/ДТ аналогично их зарубежному коду DC-AC.

7. Преобразователи постоянного тока в постоянный ток, называемые *регуляторами постоянного тока* (электронными «трансформаторами»), которые обозначим ОТ/ОТ аналогично соответствующему зарубежному сокращению DC-DC.

8. Регулируемые *источники реактивной (неактивной) мощности*, обозначаемые ИРМ, позволяющие вводить в систему электроснабжения дополнительные (к реактивным мощностям потребителей) реактивные мощности сдвига ИРМ(С), искажения ИРМ(И), несимметрии ИРМ(Н) с целью компенсации соответствующих мощностей некачественных по-

требителей и улучшения таким образом качества электроэнергии в системе электроснабжения. Возможны два варианта подключения ИРМ к сети: к узлу (поперечная компенсация за счет задания дополнительного тока в узле сети (ИРМТ)) и между узлами (продольная компенсация за счет задания дополнительного напряжения между узлами сети (ИРМН)). В зависимости от вида, способа включения и алгоритма управления ИРМ может выполнять функции компенсатора реактивной мощности сдвига, регулятора напряжения в узле, *активного фильтра* (путем введения в сеть воздействия со спектром, обратным спектру возмущения нормального режима сети).

Полное преобразовательное устройство содержит, помимо базовой ячейки, при наличии цепей переменного тока еще входной или выходной трансформатор (ячейка Т), а также обычно входной и выходной фильтры (ячейки Ф, рис. 1.8).

Трансформатор предназначен:

- во-первых, для согласования требуемого уровня выходного напряжения базовой ячейки с заданным уровнем напряжения питающей сети;
- во-вторых, для возможности увеличения числа фаз переменного напряжения на вторичной стороне трансформатора,
- в-третьих, для создания гальванической (кондуктивной) изоляции цепей входа и выхода преобразователя.

Последнее обстоятельство, обеспечивая беспроводную связь (только через электромагнитное поле трансформатора) входных и выходных цепей преобразователя, исключает возможность опасного попадания напряжения со стороны, имеющей более высокий потенциал, на сторону, имеющую более низкий потенциал при отключении трансформатора на одной из сторон.

Преобразование электрической энергии в базовых ячейках осуществляется с помощью резко нелинейных элементов – вентилях, которые могут находиться только в одном из двух состояний – включенном (проводящем) или выключенном (запертом). В результате как потребление энергии ячейкой из питающей сети, так и передача ее на выходе ячейки потребителю происходит дискретно, что приводит к снижению качества преобразуемой и преобразованной электроэнергии. Для ослабления и сглаживания последствий дискретности процесса преобразования энергии предназначены фильтры на входе и выходе вентиляхной ячейки. Другими словами, эти фильтры обеспечивают электромагнитную совместимость преобразовательной ячейки с питающей сетью и нагрузкой.

Под *электромагнитной совместимостью* в электротехнике понимается способность различных электротехнических устройств, связанных сетями электроснабжения и электрораспределения, одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации при наличии непреднамеренных помех в этих сетях и не создавать недопустимых электромагнитных помех в сети другим устройствам, присоединенным к этой сети.

Глава 2. ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

В этой главе учебного пособия основное внимание уделено вентильным преобразователям электрической энергии используемым в промышленных установках.

2.1. Структурные схемы импульсных полупроводниковых преобразователей и виды модуляции

Особенность большинства полупроводниковых преобразователей систем электроснабжения и электрооборудования промышленных предприятий – силовое импульсное воздействие с прерывистой посылкой отдельных порций энергии к объекту регулирования посредством модуляции того или иного вида. Такой способ подвода энергии позволяет за счет дозировки длительности и интенсивности воздействия существенно повысить плотность подводимой к нагрузке энергии и реализовать оптимальные способы управления нестационарными и стационарными процессами в электромеханических, электронно-оптических, электротехнологических и других электроустановках производственных комплексов.

В целом энергоподсистему промышленного предприятия и производственного комплекса, выполненную на полупроводниковых вентильных преобразователях, можно представить в виде (рис. 2.1) [20].

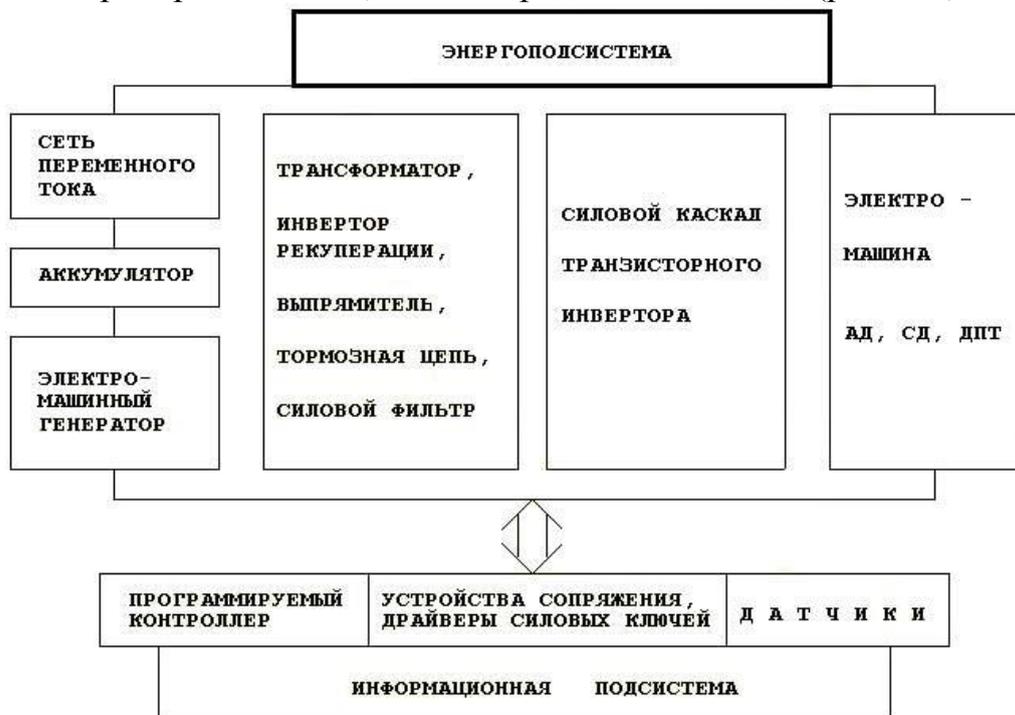


Рис. 2.1. Энергоподсистема промышленного предприятия

Электротехнические комплексы и системы на базе полупроводниковых импульсных преобразователей электрической энергии разделяются на две подсистемы: энергетическую и информационную. Энергетическая подсистема включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового и электромеханического преобразователей и осуществляет двухсторонний обмен энергией между первичным источником питания и электрической машиной посредством коммутации силовых ключей. Информационная подсистема включает в себя систему управления полупроводниковым преобразователем с информационно-измерительной частью и осуществляет реализацию заданного алгоритма регулирования координат.

Требования, предъявляемые к энергоподсистемам импульсных полупроводниковых преобразователей чрезвычайно различны, что предопределяет использование большого числа типов преобразовательных устройств, классификация которых приведена на рис. 2.2.

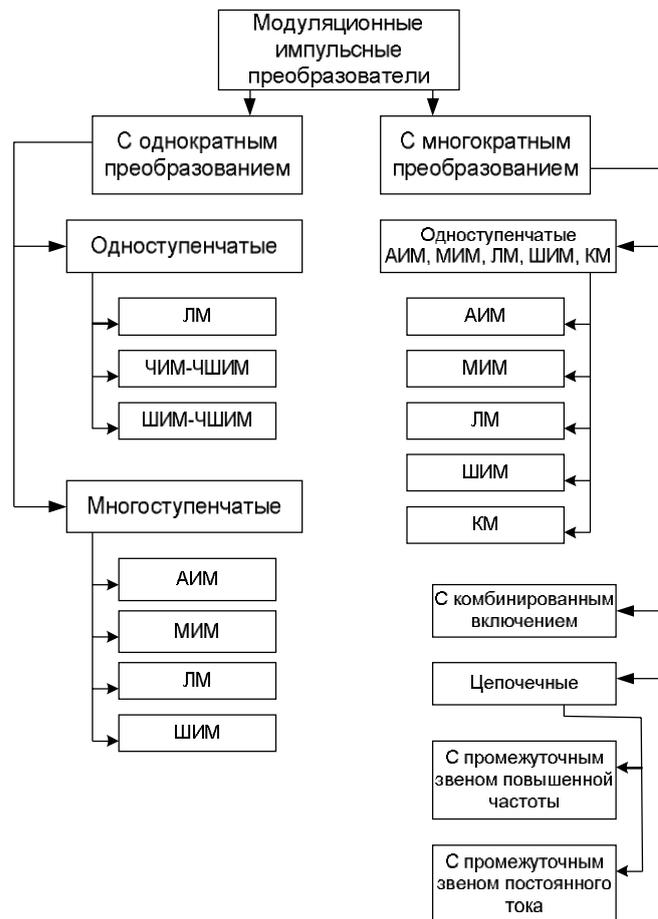


Рис. 2.2 Классификация преобразовательных устройств

Преимущественное распространение в них получили выпрямители (В), широтно-импульсные преобразователи (ШИП) постоянного напря-

жения (тока), автономные инверторы напряжения (тока) на основе полумостовых и мостовых однофазных и трехфазных транзисторных схем, импульсные преобразователи постоянного напряжения с реактивными накопителями энергии [1, 27]. Ужесточение требований к качеству выходной электрической энергии и диапазону ее регулирования привело к необходимости использования схем, как с однократным, так и с многократным преобразованием энергии. В этих схемах с помощью системы управления реализуются различные виды модуляций. Это линейная (ЛМ) и импульсная (ИМ) модуляции. Это амплитудная (АМ), фазовая (ФМ), частотно-импульсная (ЧИМ). Так же широтно-импульсная модуляция (ШИМ), амплитудно-импульсная (АИМ), многозонная импульсная (МИМ), комбинированная (КМ) и др.

Большими функциональными возможностями и гибкостью управления при сравнительно высоких технико-экономических показателях обладают импульсные вентильные энергосистемы (ИВЭ) с многократным преобразованием, построенные по схеме цепочечного или комбинированного включения элементарных преобразователей (В, ШИП, АИ), фильтров и трансформаторов рис. 2.3. В преобразователях со звеном повышенной частоты (ЗПЧ), которое представляет собой промежуточный вентильный преобразователь, при бестрансформаторном входе (рис.2.3, а) существенно улучшаются массогабаритные показатели трансформаторов ЗПЧ и фильтров по сравнению с их аналогами, работающими на частоте 50 Гц. Такие преобразователи выполняют также функции регулирования или стабилизации, подавляют низкочастотные пульсации. Цепочечные схемы с ЗПЧ менее чувствительны к характерным для электротехнологических устройств и приборных электроприводов резким изменениям нагрузки, которые могут компенсироваться с помощью регулятора напряжения звена постоянного тока.

В преобразователях-регуляторах постоянного напряжения, ЗПЧ может быть реализовано в виде АИ с ШИМ и выходным трансформатором, выпрямителем и высокочастотным фильтром (рис.2.3,б).

Структурные схемы цепочечных инвертирующих преобразователей с ЗПЧ (рис.2.3,в), обычно содержат высокочастотный АИ с выходным трансформатором, совмещающим процессы преобразования на основной и повышенной частоте посредством гармонической модуляции выходного напряжения на высокой (несущей) частоте.

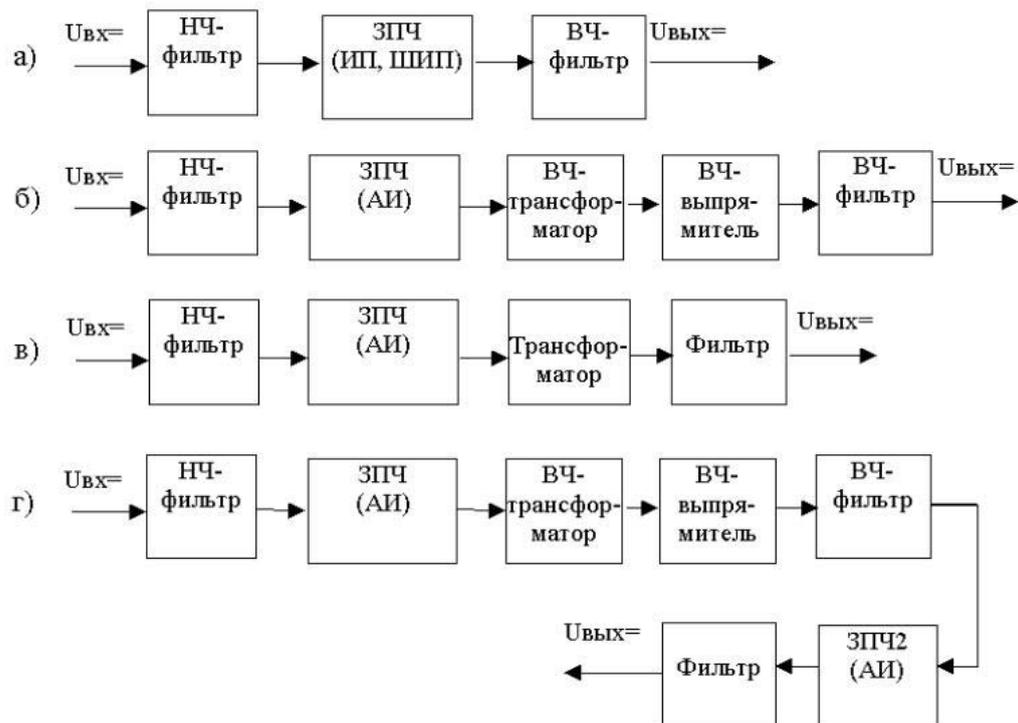


Рис. 2.3 Функциональные схемы включения элементарных преобразователей

Преобразователь с инвертированием на повышенной частоте и модуляцией выходного напряжения на основной частоте наиболее прост по структуре (содержит минимальное число звеньев), имеет хорошие энергетические характеристики и позволяет улучшить массогабаритные и динамические характеристики системы. Выходной согласующий трансформатор, работающий на основной частоте выходного напряжения, несколько ухудшает общие массогабаритные показатели цепочечного преобразователя в целом.

При значительной разнице в величинах входного и выходного напряжений рационально использовать цепочечную схему (рис.2.3,г); здесь трансформаторная развязка осуществляется в высокочастотном звене вентильного блока ЗПЧ1, на который возлагаются и функции регулирования выходного напряжения. Выпрямленное и сглаженное высокочастотным фильтром напряжение затем вновь инвертируется блоком ЗПЧ2, работающем также на повышенной частоте с модуляцией по заданному закону, после чего высокочастотная составляющая выходного напряжения отфильтровывается. Разделение функций регулирования и модуляции между блоками ЗПЧ улучшает технико-экономические показатели цепочечного преобразователя, так как все звенья работают на повышенной частоте.

В качестве основных элементов ЗПЧ используются чаще всего транзисторные ШИП, в том числе с индуктивными накопителями энер-

гии [14, 19, 20], тиристорно-конденсаторные ключи с дозированной передачей энергии [14, 38, 40], резонансные инверторы различных типов. Регулирование выходного напряжения в ЗПЧ может осуществляться ключевыми элементами посредством разных видов модуляций, преимущественно ШИМ, ЧИМ, ВИМ и т.д. Преимущественно используется ШИМ, обеспечивающая, как правило, лучшие технико-экономические показатели.

Уменьшить помехи, создаваемые цепочечными преобразователями, и облегчить условия коммутации транзисторов, можно используя высокочастотные резонансные инверторы (с обратными диодами и без них), в которых транзисторы переключаются в моменты времени, соответствующие нулевому значению тока в колебательном контуре [16,14,20,22].

Информационная подсистема современных электроприводов и электроустановок строится на базе микроконтроллеров [5,6], разрабатываемых такими ведущими фирмами как ABB, INTEL, MOTOROLA, TEXAS INSTRUMENTS, SIEMENS AG, ANALOG DEVICES, ядром которых является процессор с мощной системой команд, имеющих в своем составе большой набор периферийных устройств: порты ввода-вывода, таймеры-счетчики, аналого-цифровые, цифро-аналоговые преобразователи, широтно-импульсные модуляторы и так далее, что позволяет обрабатывать сигналы с датчиков обратной связи, реализовывать сложные законы управления в режиме реального времени и вырабатывать управляющие сигналы для силового блока преобразователя. На микроконтроллер возлагаются также функции контроля, защиты и диагностики отдельных элементов и всей системы в целом.

В случае проектирования прецизионных систем с большим диапазоном регулирования и высоким быстродействием целесообразно использовать микроконтроллер ADMC300 фирмы ANALOG DEVICES и TMS320F240 фирмы TEXAS INSTRUMENTS. Это представители последнего поколения вычислительных управляющих устройств, обладающих повышенной вычислительной производительностью и специально адаптированных для задач управления системами электропривода с полупроводниковыми преобразователями. Оба этих микроконтроллера являются представителями новых развивающихся семейств, что обеспечивает надежность вложений и перспективу дальнейшего усовершенствования разрабатываемых изделий при минимальных затратах.

2.2. Общая характеристика полупроводниковых преобразователей частоты

Полупроводниковые преобразователи частоты для электромеханических и электроэнергетических систем подразделяют на два основных класса, различающихся по способу связи с первичной сетью [16,22]:

- непосредственные преобразователи частоты (НПЧ);
- двухзвенные преобразователи частоты (ДПЧ) с промежуточным звеном постоянного или переменного тока.

Нагрузкой для полупроводниковых преобразователей частоты в большинстве случаев являются электрические двигатели переменного тока, имеющие на неподвижной части (статоре) трехфазную обмотку.

Поэтому при общей характеристике преобразователей частоты на нагрузку представляют в виде трехфазной схемы.

Непосредственные преобразователи частоты получили применение в основном для регулирования тихоходных синхронных и асинхронных электроприводов средней и большой мощности (рис. 2.12) [22].

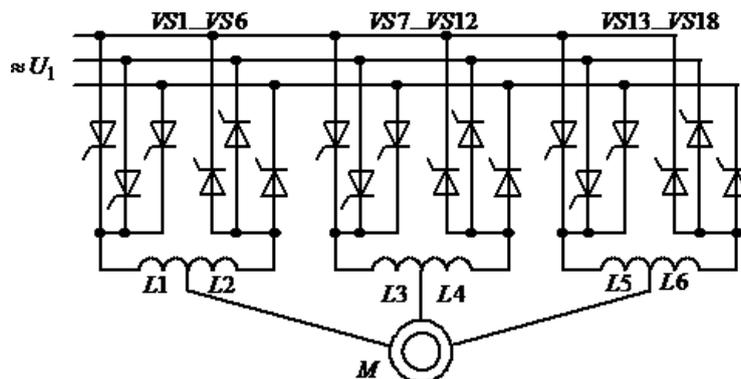


Рис. 2.12. Система непосредственный преобразователь частоты – асинхронный двигатель

Связано это с тем, что максимальное значение выходной частоты НПЧ составляет $1/3 - 2/3$ от частоты питающей сети. Кроме этого, НПЧ имеют низкий коэффициент мощности и оказывают влияние на форму входного тока как потребитель в системе энергоснабжения. Сложность (многоэлементность) силовых цепей и цепей управления существенно снижает область использования таких вторичных источников питания.

Основой силовой схемы преобразователя частоты с непосредственной связью является реверсивный тиристорный преобразователь. Многофазный выход преобразователя частоты с непосредственной связью достигается использованием нескольких реверсивных преобразователей с однофазным выходом рис. 2.12. Выходное однофазное напряжение

низкой частоты f_{1j} обеспечивается циклическим изменением углов открытия тиристоров. Коммутация тока тиристорами каждой группы непосредственного преобразователя частоты одного направления осуществляется напряжением сети рис. 2.13.

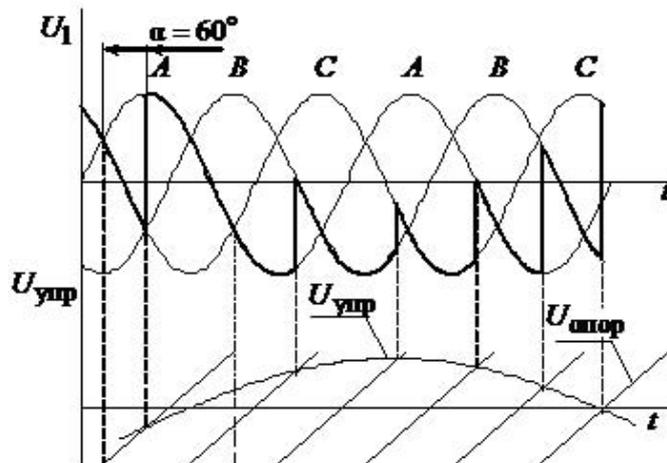


Рис. 2.13. Выходное однофазное напряжение непосредственного преобразователя частоты

Большинство НПЧ предусматривает совместное согласованное управление реверсивными группами тиристоров. В этом случае для ограничения уравнивающих токов служат ограничивающие реакторы $L_1...L_6$, что увеличивает массу и габаритные размеры преобразователя, а также снижает его энергетические показатели.

На диаграммах напряжения рис. 2.13 управление происходит при переменном угле управления α . Закон изменения управляющего напряжения $U_{упр}$ в непосредственном преобразователе частоты определяется специальным задатчиком. В рассмотренном случае управляющее напряжение изменяется по синусоидальному закону. В некоторых случаях применяют управляющее напряжение прямоугольной формы.

Трехфазная система управляющих напряжений прямоугольной формы сдвинутая для каждой из фаз на 120 эл. градусов приведена на рис. 2.14.

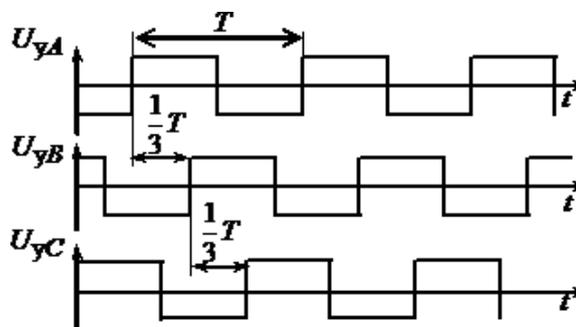


Рис. 2.14. Трехфазная система управляющих напряжений прямоугольной формы

Если каждый из управляемых выпрямителей непосредственного преобразователя частоты охватить глубокими отрицательными обратными связями по току, то преобразователь приобретает свойства источника тока. Таким образом, непосредственные преобразователи частоты могут работать в режиме источника напряжения либо в режиме источника тока. Достоинством непосредственных преобразователей частоты являются:

- однократное преобразование энергии, что определяет высокий КПД преобразователя;
- возможность прохождения реактивной мощности как от сети к нагрузке, так и обратно;

Недостатки:

- сложность устройств управления. Большое число тиристоров требует большого числа систем импульсно-фазового управления;
- коэффициент мощности преобразователя существенно меньше единицы ($\cos \varphi \approx 0,15$);
- существенно искажается форма напряжения питающей сети;
- трудности получения частот, близких к частоте питающей сети. Для нулевой схемы максимальная частота выходного напряжения обычно ограничивается $f_{1\max} = 16$ Гц. Переход к мостовой схеме расширяет рабочий диапазон до $f_{1\max} = 25$ Гц.

Поэтому асинхронные электроприводы с непосредственными преобразователями частоты применяются для безредукторных электроприводов средней и большой мощности.

Двухзвенный преобразователь частоты с промежуточным звеном переменного тока состоит из двух звеньев, а именно:

- преобразователь напряжения источника питания в переменное напряжение повышенной частоты;
- непосредственный преобразователь переменного напряжения повышенной частоты в переменное напряжение требуемой частоты и напряжения.

Введение промежуточного звена переменного тока позволяет устранить один из основных недостатков сетевых НПЧ, т. е. увеличить верхний предел регулирования выходной частоты. Однако при этом ухудшаются массогабаритные и энергетические показатели преобразователя в целом. Поэтому область применения таких преобразователей весьма ограничена. Кроме всего прочего силовая часть преобразователя и его система управления имеют более сложную структуру, чем у непосредственного преобразователя частоты [16, 22].

Двухзвенные преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока нашли более широкое применение в качестве вторичного источника питания. Основными элементами данных преобразователей являются выпрямитель с фильтром и инвертор. Напряжение питающей сети сначала выпрямляется выпрямителем, а затем *инвертируется*, т. е. преобразуется в переменное напряжение (или ток) требуемой частоты с помощью инвертора.

Преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока делятся на:

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

Автономные инверторы напряжения (рис. 2.15) освоены серийным производством и промышленным использованием наиболее простые ДПЧ, выполненные по схеме "управляемый тиристорный выпрямитель – LC фильтр – автономный тиристорный инвертор напряжения с принудительной коммутацией".

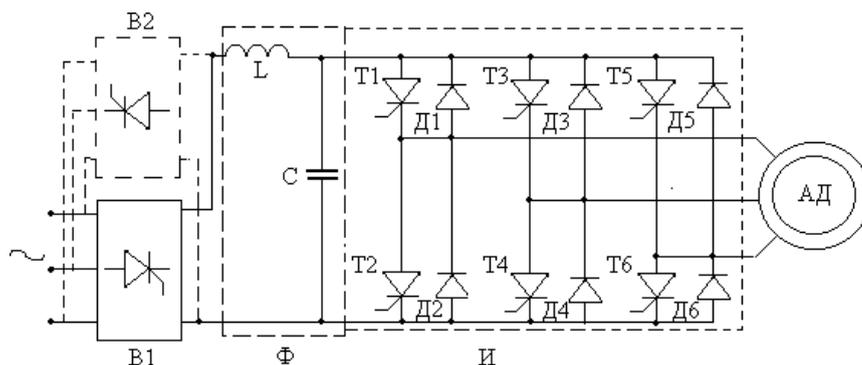


Рис. 2.15. Схема инвертора напряжений

Структура входных цепей и режим переключения тиристоров (транзисторов) организованы таким образом, что величина и форма напряжения на выходе инвертора не зависят от нагрузки, и поэтому он является источником напряжения [16, 17]. Величина и форма тока на выходе АИН зависит от нагрузки. Поэтому инверторы напряжения совместимы только с нагрузкой активно-индуктивного характера. В противном случае между инвертором и нагрузкой включаются *буферные элементы* индуктивного характера.

Благодаря наличию емкости C , при работе инвертора, как источника напряжения, на активно-индуктивную нагрузку, каковым является асинхронный двигатель (АД), обеспечивается обмен реактивной энергией между АД и звеном постоянного тока. Кроме конденсатора, для этой цели необходимы обратные диоды Д1-Д6, включенные параллельно основным ключам Т1-Т6. Через эти диоды протекает ток в моменты

времени возврата реактивной энергии от двигателя в емкость C . Фильтр LC обеспечивает сглаживание пульсаций напряжения с выхода выпрямителя $V1$. Напряжение на выходе инвертора (И) можно регулировать двумя способами:

- изменением напряжения U_d в звене постоянного тока. В этом случае используется управляемый выпрямитель V , а инвертор выполняет функции коммутатора фаз, формируя требуемую частоту. Такой ПЧ называется АИН с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ);
- широтно-импульсным регулированием напряжения в инверторе, которое осуществляется модуляцией напряжения несущей частоты ω_k (частоты коммутации ключей) сигналом основной частоты. Такой ПЧ называется АИН с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В них, как правило, выпрямитель $V1$ является неуправляемым.

В АИН отсутствует рекуперация энергии в питающую сеть. Чтобы обеспечить ее при генераторном режиме работы АД (например, в случае интенсивного торможения двигателя), устанавливается второй комплект выпрямителя – $V2$ (показан на рисунке пунктиром), который должен быть управляемым. В генераторных режимах АД он работает как инвертор, ведомый сетью.

Автономные инверторы тока в звене постоянного тока имеют реактор фильтра Φ с индуктивностью L , которая обеспечивает сглаживание выпрямленного тока и ограничивает пульсации тока, возникающие при переключении ключей инвертора. В отличие от инвертора напряжений, величина и форма тока в АИТ не зависят от параметров нагрузки, поэтому он является источником тока [17, 22, 23].

Схема силовых цепей трехфазного мостового инвертора тока приведена на рис.2.16.

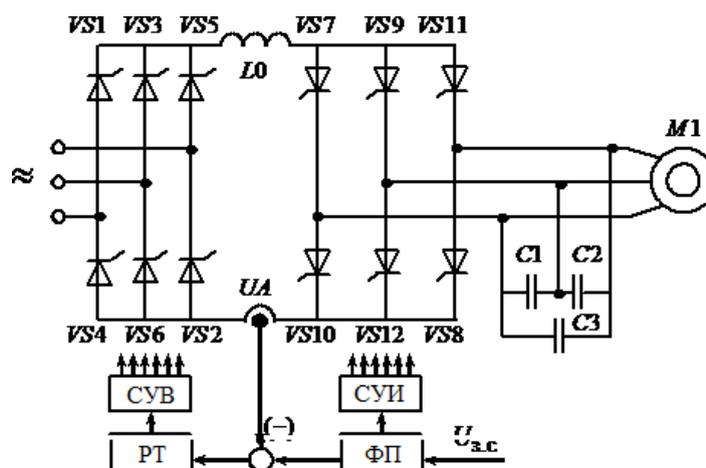


Рис. 2.16. Схема силовых цепей трехфазного мостового инвертора тока
 СУВ – схема управления выпрямителем; РТ – регулятор тока;
 СУИ – схема управления инвертором; ФП – функциональный преобразователь.

Двухступенчатые преобразовательные устройства выполняются на основе выпрямителя трехфазного переменного напряжения сети и автономного инвертора, преобразующего выпрямленное напряжение в переменное трехфазное с регулируемой частотой и амплитудой. Несмотря на двукратное преобразование энергии и обусловленное при этом некоторое снижение КПД, преобразователи частоты с промежуточным звеном постоянного тока получили наибольшее распространение в регулируемом электроприводе.

В автономном инверторе тока управляемый выпрямитель, выполненный на тиристорах $VS1...VS6$, работает в режиме регулятора тока, а инвертор на тиристорах $VS7...VS12$ формирует требуемую частоту выходного тока. Фильтр с индуктивностью $L0$ обеспечивает сглаживание пульсаций выпрямленного тока

Тиристоры инвертора тока $VS7...VS12$, включенные по трехфазной мостовой схеме, пропускают ток в течение 120° электрических градусов. Переключение производится с периодичностью 60° в последовательности, соответствующей нумерации тиристоров. Диаграммы токов для каждой из фаз инвертора приведены на рис. 2.17.

Коммутация тока и компенсация реактивной мощности осуществляется конденсаторами $C1...C3$ на стороне переменного тока. При активно-индуктивной нагрузке на выходе инвертора и на тиристорах $VS7...VS12$ в моменты коммутации могут возникнуть значительные перенапряжения, обусловленные действием ЭДС самоиндукции нагрузки. Их ограничение достигается установкой соответствующих емкостей. При снижении частоты и при постоянном моменте на валу двигателя емкость конденсаторов возрастает обратно пропорционально квадрату частоты.

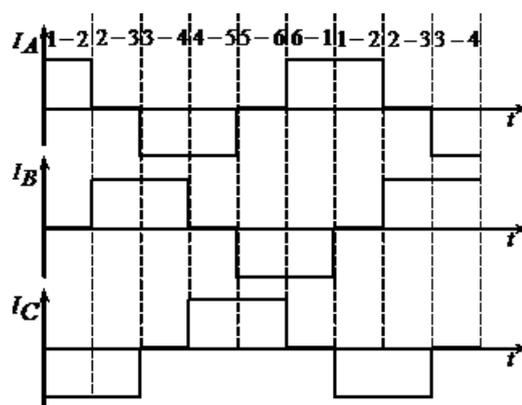


Рис. 2.17. Диаграммы токов для каждой из фаз инвертора

При переходе двигателя, питаемого от автономного инвертора тока, в генераторный режим изменяется направление против-ЭДС инвертора, который переходит в режим работы выпрямителем, что могло бы

вызвать увеличение тока в звене постоянного тока. Однако за счет сильной отрицательной обратной связи по току, которой охвачен выпрямитель, ток в звене постоянного тока сохраняется на прежнем уровне, а выпрямитель переводится в режим инвертора, ведомого сетью. Вследствие чего происходит рекуперация энергии в питающую сеть без изменения направления тока в звене постоянного тока.

Таким образом, в автономных инверторах тока легко реализуются тормозные режимы двигателя с рекуперацией энергии в сеть, что делает предпочтительным его применение в реверсивных электроприводах.

Основные достоинства преобразователей частоты с автономными инверторами тока:

- возможность рекуперации энергии в сеть;
- близкое к синусоидальному выходное напряжение;
- безаварийность режима короткого замыкания в нагрузке.

Недостатки:

- ограничение выходной частоты на уровне 100-125 Гц;
- коммутационные перенапряжения на тиристорах, что заставляет усложнять силовую схему;
- невозможность работы на групповую нагрузку;
- существенные вес и габариты индуктивного фильтра

2.2.1. Общие положения

В настоящее время известны многочисленные варианты построения главных цепей управляемых выпрямителей и автономных трехфазных инверторов напряжений и токов, предназначенных для управления электроприводами постоянного и переменного тока. Несмотря на большое разнообразие этих схем, отличающихся, прежде всего типом переключающих элементов, большинство из них строятся на основе одной и той же обобщенной схеме замещения, изображенной на рис. 2.18.

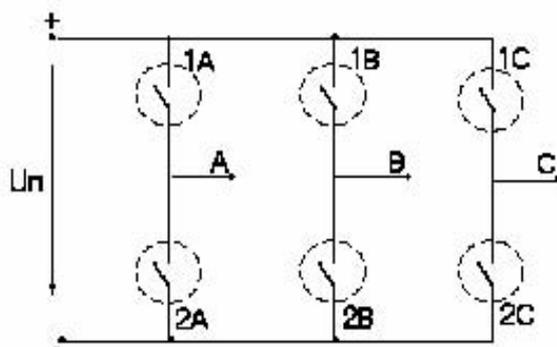


Рис. 2.18. Обобщенная схема замещения силовой части вентильного преобразователя

Идеализированный трехфазный мост состоит из шести силовых управляемых ключей 1А-2С, выделенных окружностями. Каждый из этих ключей должен обладать двухсторонней проводимостью и содержит в общем случае несколько полупроводниковых приборов.

Таким образом, если управляемый элемент силового ключа находится во включенном состоянии, то соответствующее плечо моста обладает прямой проводимостью; а если управляемый элемент силового ключа находится в выключенном состоянии, то соответствующее плечо моста обладает обратной проводимостью [21, 24].

Рассмотрим с помощью данной схемы процесс инвертирования в инверторах. Инвертирование, т. е. преобразование постоянного напряжения источника питания в трехфазное переменное напряжение необходимой частоты, на выходных зажимах А, В, С инвертора осуществляется коммутацией ключей в плечах моста с определенной частотой и в определенной последовательности. Форма выходного напряжения в АИН и форма выходного тока в АИТ определяются, прежде всего, выбранным законом переключения ключей – *законом коммутации*.

Рациональным методом аналитического исследования процессов в схемах полупроводниковых инверторов является раздельное рассмотрение *рабочих и коммутационных* процессов. *Рабочие процессы* протекают в силовой части полупроводникового преобразователя, их закономерности определяются в результате анализа работы обобщенной структурной схемы инвертора на заданную нагрузку при принятом законе коммутации.

Коммутационные процессы определяются конкретными свойствами полупроводниковых приборов, используемых в той или иной схеме инвертора. В случае использования обычных незапираемых тиристоров, обладающих неполной управляемостью, объектом анализа являются процессы в устройствах *искусственной коммутации*.

Скорости протекания коммутационных процессов намного выше в сравнении с рабочими процессами. Поэтому, при математическом моделировании процессов в преобразователях частоты (инверторах и выпрямителях), ограничиваются рассмотрением рабочих процессов при работе ПЧ на АД.

В зависимости от структуры силовой цепи все инверторы подразделяются на два класса: инверторы с постоянной и инверторы с переменной структурой силовой цепи. В схемах первого класса управляющие сигналы поступают всегда на три ключа, что обуславливает неизменность структуры силовой части. В схемах второго класса число

ключей, на которые подаются управляющие сигналы, может быть меньше трех.

Простейший способ управления ключами, обеспечивающий неизменность структуры силовой цепи, является способ со 180° -й проводимостью (или $\alpha=180^\circ$). В этом случае в течение $1/6$ периода выходного напряжения включены три вентильных ключа: два нечетных и один четный или, наоборот, один нечетный и два четных. Цикл коммутации состоит из шести тактов, продолжительность каждого составляет 60° . Каждый ключ открыт в течение трех тактов или (180°). В любой момент времени по всем фазам обмотки статора протекают токи (в том числе и во время переходных процессов, вызванных коммутацией ключей в одной фазе).

При изменяющейся структуре силовой цепи пользуются способами со 120° и 150° -й проводимостью ключей. 120° -ный закон управления вентилями характеризуется открытым состоянием в любой момент времени двух ключей. Продолжительность одного такта при этом составляет 60° , а ключ открыт непрерывно в течение двух тактов, т. е. 120° . За счет ЭДС самоиндукции и наличия обратных диодов в силовой части инвертора во всех фазах двигателя протекает ток так же, как и при 180° – законе управления.

150° -ый закон управления вентилями представляет собой комбинацию двух предыдущих законов, когда поочередно включаются либо три, либо два ключа. Схема работает 12 тактов, длительность каждого из которых 30° , а поэтому ключ находится в открытом состоянии 5 тактов (т. е. 150°).

Если принять за *базовый закон коммутации* 180° -й способ управления ключами, то диаграмму состояния ключей на обобщенной схеме замещения трехфазного мостового инвертора можно представить в виде рис.2.19. [21, 24].

Интервалы времени, в течение которых существует симметричная двусторонняя проводимость соответствующих плеч моста, выделены на диаграмме состояний жирными горизонтальными линиями. Индекс горизонтали соответствует обозначению силового управляемого ключа. В соответствии с показанной на диаграмме последовательностью переключения каждый из ключей находится непрерывно во включенном состоянии в течение половины периода выходной частоты ($\lambda=\pi$). В течение же $1/6$ периода выходного напряжения (60° -ной зоне) включены три ключа: один в анодной группе вентилей, два в катодной и наоборот. Каждой комбинации состояний соответствует определенная комбинация подключения линий питания нагрузки А, В и С к шинам источника питания.



Рис. 2.19. Диаграмма состояний ключей инвертора

В соответствии с диаграммами включения (рис. 2.19.) в каждый момент времени постоянный ток протекает через две фазы нагрузки и включенные вентили. Таким образом, ток нагрузки в инверторе тока и выходное напряжение инвертора напряжения однозначно определяются соответственно током i_d или напряжением U_d выпрямителя. Однозначное определение линейных и фазных напряжений и токов на выходных фазах инвертора устанавливается и описывается с помощью коммутационных функций F_k следующего вида[23]:

$$F_k = C_i(t - t_i). \quad (2.16)$$

где F_k – коммутационная функция, определяемая состоянием k -го ключа в силовой цепи инвертора; t – текущее время открытого состояния ключа, t_i – моменты коммутации k -го ключа в процессе функционирования инвертора; C_i – значения коммутационной функции, соответствующие состоянию ключа в момент t_i . В моменты коммутации коммутационная функция принимает значения +1 или -1[21].

Линейные напряжения на выходе идеализированного инвертора, которые при соединении фаз обмоток статора треугольником одновременно являются и фазными напряжениями двигателя, можно при базовом законе коммутации представить в виде графиков рис. 2.20 [25]; Где U_n – напряжение на входе инвертора, а U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} – линейные напряжения на выходе инвертора.

Глава 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Электрические машины – это основные электромеханические преобразователи энергии, широко используемые в промышленности, технике и в различных отраслях народного хозяйства.

Конструкция электрической машины имеет два основных элемента: вращающийся (ротор) и неподвижный (статор). На статоре и на роторе располагаются обмотки, по которым при работе электрической машине протекают токи и возникают магнитные поля, взаимодействующие друг с другом.

Принцип работы любой электрической машины связан с законом электромагнитной индукции и взаимодействием проводника с током с магнитным полем (закон Ампера).

Электромеханические преобразователи энергии – это источники электрической энергии постоянного и переменного тока и приемники этой энергии для преобразования ее в требуемый для технологического процесса вид.

3.1. Физические принципы работы и устройство машин постоянного тока

Электрическая машина постоянного тока используется на практике, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя, то есть обладает свойством обратимости, впервые сформулированного Э.Х. Ленцем в 1835 году. В режиме генератора машина постоянного тока преобразует механическую работу, подводимую к валу от первичного двигателя, в электрическую энергию постоянного тока, а в режиме двигателя осуществляет обратное преобразование: электрическую энергию в механическую работу вращательного или поступательного движения.

Машина постоянного тока (МПТ) была первой электрической машиной преобразователем электрической энергии в механическую работу – разработана в 1838г. Б.С. Якоби применил двигатель постоянного тока для привода паромы. С развитием техники переменного тока удельный вес машины постоянного тока в общем выпуске электрических машин постепенно уменьшался из-за более сложной конструкции и меньшей надежности. Вместе с тем у машин постоянного тока есть преимущества, обуславливающие их возрастающее сегодня применение в современной технике. Так, широкий диапазон и плавность регулирования частоты вращения обусловили применение двигателя постоянного тока в современном автоматизированном электроприводе.

Устройство машины постоянного тока

Внешний вид одной из конструкций и схематическое устройство двигателя постоянного тока показаны на рис. 3.1, а, б.

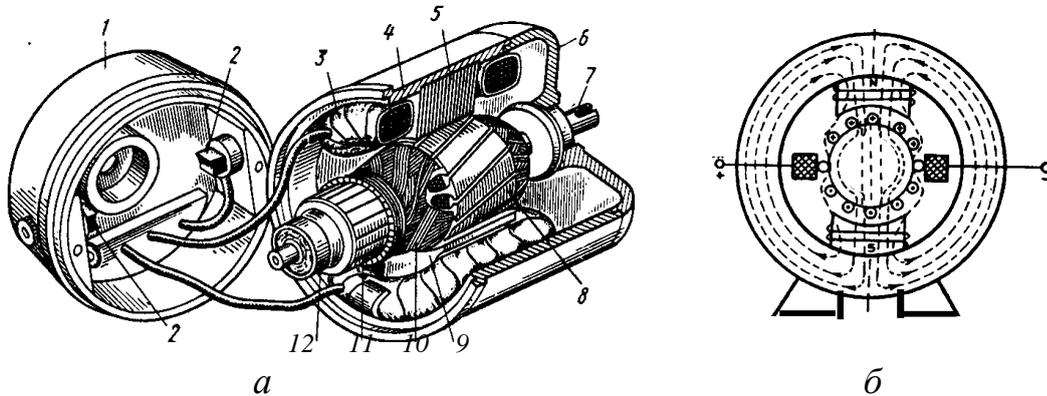


Рис. 3.1. Внешний вид конструкции и схематическое устройство двигателя постоянного тока

Двигатель состоит (рис. 3.1, а) из переднего подшипникового щита 1, на котором размещены щетки 2 и в отверстие которого входит подшипник 12. Статор 5 двигателя содержит обмотки возбуждения 3 полюсов и помещен в корпус 4. Корпус двигателя в сборе закрывается подшипниковыми щитами 1 и 6. На вал 7 напрессованы сердечник якоря 8, коллектор 11 и подшипники. Обмотка 10 расположена в пазах сердечника якоря, и ее отпайки электрически соединены с пластинами коллектора.

Принцип действия машины постоянного тока

Принцип действия машины постоянного тока рассматривают, используя ее схематическое изображение в осевом направлении, представленное на рис. 3.2.

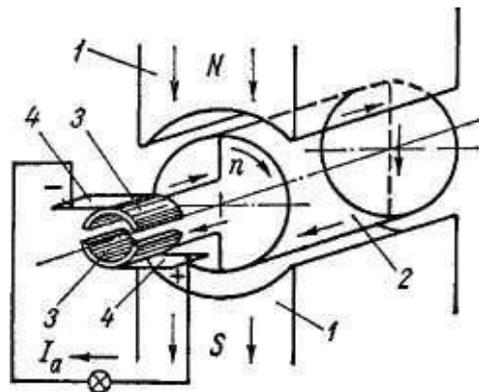


Рис. 3.2. Устройство простейшей машины постоянного тока

Неподвижная часть машины, называемая индуктором, состоит из полюсов и круглого стального ядра, к которому прикрепляются полюсы. Назначением индуктора является создание в машине основного маг-

нитного потока. Индуктор изображенной на рис. 3.2 простейшей машины имеет два полюса 1 (ярмо индуктора на рисунке не показано).

Вращающаяся часть машины состоит из укрепленных на валу цилиндрического якоря 2 и коллектора. 3. Якорь состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали, и обмотки, укрепленной на сердечнике якоря. Обмотка якоря в показанной на рисунке простейшей машине имеет один виток. Концы витка соединены с изолированными от вала медными пластинами коллектора, число которых в рассматриваемом случае равно двум. На коллектор налегают две неподвижные щетки 4, с помощью которых обмотка якоря соединяется с внешней цепью.

Основной магнитный поток в нормальных машинах постоянного тока создается обмоткой возбуждения, которая расположена на сердечниках полюсов и питается постоянным током. Магнитный поток проходит от северного полюса N через якорь к южному полюсу S и от него через ярмо снова к северному полюсу. Сердечники полюсов и ярмо также изготавливаются из ферромагнитных материалов.

Рассматриваемая простейшая машина, как было отмечено выше, может работать как генератором, так и двигателем.

Для работы МПТ в режиме генератором якорь приводится во вращение, а обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока, и создается постоянное магнитное поле. В проводниках обмотки якоря при его вращении индуктируется ЭДС, направление которой может быть определено по правилу **правой руки** [15]. Поскольку поток полюсов неизменный, а ЭДС индуктируется только вследствие вращения якоря, то называется она – ЭДС вращения.

ЭДС в секциях обмотки якоря меняет свое направление, так как проводники обмотки якоря проходят попеременно под северным и южным полюсами.

Частота ЭДС в двухполюсной машине равна скорости вращения якоря n , выраженной в оборотах в секунду:

$$f = n, \quad (3.1)$$

а в общем случае, когда машина имеет p пар полюсов с чередующейся полярностью, частота $f = np$.

Величина ЭДС обмотки якоря МПТ в общем виде равна [15]:

$$E = E_a \frac{z}{2a} = \frac{\Phi 2pnz}{60 \cdot 2a} = c_e \Phi n, \quad (3.2)$$

где $c_e = \frac{2pz}{60 \cdot 2a}$ – коэффициент ЭДС, зависящий от конструктивных особенностей машины, Φ – магнитный поток в воздушном зазоре машины

Второй величиной характеризующей принцип действия МПТ является электромагнитный момент, величину которого можно определить для рассматриваемой машины в виде [15]:

$$M_{\text{эмр}} = F_{\text{пр}} D_a = B l_a D_a, \quad (3.3)$$

где D_a – диаметр якоря, I_a – ток в проводнике обмотки якоря, $F_{\text{пр}} = B l_a$ – электромагнитная сила, действующая на проводник с током, находящимся в магнитном поле. Направление действия силы на проводник определяют по правилу *левой руки*.

Полный электромагнитный момент МПТ можно представить в виде

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{эмр}} z = \frac{pz}{2\pi a} \Phi I_a = c_m \Phi I_a, \quad (3.4)$$

где $c_m = \frac{pz}{2\pi a}$ – коэффициент момента, зависящий от конструктивных данных машины, I_a – ток обмотки якоря.

Режим двигателя. Рассматриваемая простейшая машина работает двигателем, если к обмотке ее якоря подвести постоянный ток от внешнего источника. При этом на проводники обмотки якоря будут действовать электромагнитные силы $F_{\text{пр}}$ и возникнет электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$. Величин $F_{\text{пр}}$ и $M_{\text{эм}}$, как и для генератора, определяются теми же равенствами. При достаточной величине $M_{\text{эм}}$ якорь машины придет во вращение, и будет развивать механическую мощность. Момент $M_{\text{эм}}$ при этом является движущим и действует в направлении вращения.

В режиме двигателя коллектор превращает потребляемый из внешней цепи постоянный ток в обмотке якоря и работает, таким образом, в качестве механического инвертора тока.

Проводники обмотки якоря двигателя также вращаются в магнитном поле, и поэтому в обмотке якоря двигателя тоже индуцируется ЭДС. Направление ЭДС в двигателе такое же, как и в генераторе. Таким образом, в двигателе ЭДС якоря E направлена против тока I_a и приложенного к зажимам якоря напряжения. Поэтому ЭДС якоря двигателя называется также противоэлектродвижущей силой.

В машине постоянного тока установившиеся процессы описываются уравнением равновесия напряжений и выражениями для ЭДС и

электромагнитного момента, а работоспособность их оценивают по внешним и регулировочным характеристиками.

3.2. Классификация электрических машин переменного тока

В электроприводе переменного тока можно выделить энергетическую силовую часть, содержащую полупроводниковый преобразователь (преобразователь частоты (ПЧ)), электрический двигатель (ЭД) и исполнительный орган (ИО) (рис.3.19).

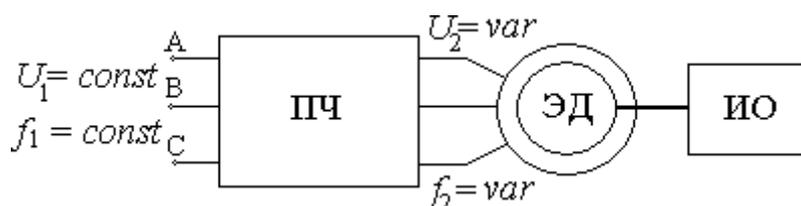


Рис. 3.19.. Силовая часть электропривода переменного тока

Электрический двигатель преобразует электрическую энергию в механическую энергию и приводит в движение исполнительный орган производственной установки, с помощью которой реализуется технологический процесс. В современном частотно-регулируемом электроприводе в качестве исполнительных элементов (электрических двигателей) широко используют асинхронные или синхронные электрические двигатели.

Преобразователь частоты управляет электрическим двигателем и представляет собой электронное статическое устройство. На выходе преобразователя формируется электрическое напряжение с переменными амплитудой и частотой.

Электрический двигатель является основным элементом привода и определяет его энергетические показатели и в ряде случаев его назначение. Классификация электрических двигателей переменного тока используемых для привода механизмов в зависимости от принципа работы и конструктивного исполнения представлена на рис. 3.20



Рис. 3.20. Классификация электродвигателей переменного тока

На сегодняшний день наиболее дешёвыми и массово применяемыми являются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (беличьей клеткой) (АД), которые могут безупречно работать практически без всякого обслуживания. Такие двигатели нашли широкое применение в регулируемых асинхронных электроприводах с управлением по напряжению и частоте питания.

Асинхронные двигатели с фазным ротором позволяют осуществлять питание, как со стороны статора, так и со стороны ротора. При этом возможно три способа подключения преобразователя частоты, а именно: либо в цепь статора, либо в цепь ротора, либо в цепь статора и ротора одновременно. В первых двух случаях вторая цепь подключается непосредственно к питающей сети постоянной частоты. В третьем случае при совместном управлении со стороны статора и ротора реализуется наиболее полное использование машины.

В системах автоматического регулирования, мощность которых колеблется от долей ватта до 750 Вт, применяют как трехфазные АД с короткозамкнутым ротором, так и двухфазные АД, которые получили название асинхронные исполнительные двигатели (АИД). Ротор таких двигателей выполняется в виде полого немагнитного тонкостенного стакана из сплавов алюминия. Принцип действия АИД не отличается от принципа действия трехфазных АД.

Синхронный двигатель представляет собой электрическую машину переменного тока, трехфазная обмотка статора которой подключена к трехфазному источнику питания с частотой ω_1 , а вторая обмотка, распо-

ложенная на вращающейся части (роторе) подключена к источнику постоянного тока. В синхронных микродвигателях для образования поля возбуждения часто используют постоянные магниты.

Вращающееся магнитное поле обмотки статора взаимодействует с постоянным магнитным полем обмотки возбуждения, расположенной на роторе, что приводит к появлению вращающего электромагнитного момента. Отличительной особенностью синхронных электродвигателей (СД) является постоянство частоты вращения ротора при изменении нагрузки на валу. В зависимости от формы магнитной системы ротора они подразделяются на двигатели с явнополюсным и неявнополюсным ротором.

Синхронные электродвигатели для систем автоматического регулирования, выполнены по типу классической синхронной машины с электромагнитным возбуждением и пусковой обмоткой типа "беличья клетка". Они имеют наиболее оптимальные рабочие и пусковые характеристики. Статор синхронных электродвигателей не отличается от статоров асинхронных машин. В пазы статора укладывается двух или трехфазная обмотка, создающая вращающееся магнитное поле.

В зависимости от особенностей возбуждения постоянного магнитного поля синхронные двигатели, делятся на двигатели с активным и реактивным ротором. В первом типе двигателей ротор явнополюсный из постоянного магнита. В двигателях с реактивным ротором – это явнополюсный или зубчатый ротор из магнитомягкого материала [13, 15, 21, 24, 25].

Машины постоянного тока имеют более высокие технические показатели (линейность характеристики, высокий КПД, малые габариты), чем машины переменного тока. Существенный недостаток – наличие электромеханического преобразователя – коллектора, который снижает надежность, создает радиопомехи, взрывоопасность и т.д.

Этих недостатков лишен бесконтактный двигатель постоянного тока, называемый *вентильным двигателем*. В этом двигателе щеточный аппарат заменен полупроводниковым коммутатором, якорь находится на статоре, а ротор представляет собой двухполюсный (реже четырехполюсный) постоянный магнит. Для упрощения коммутатора число секций обмотки якоря выбирается малым – три, четыре [10, 15, 41].

Существенным элементом двигателя является датчик положения ротора. Он может быть выполнен с использованием фотоэлектрических, индуктивных, емкостных элементов, датчиков Холла, и т.д.

Функциональная схема вентильного двигателя приведена на рис. 3.21.

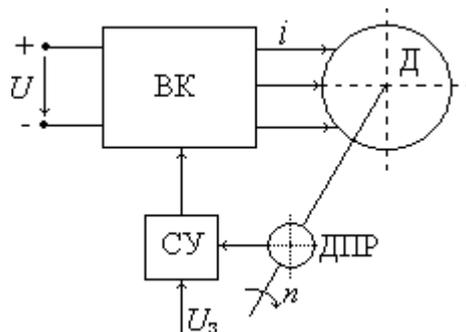


Рис. 3.21. Схема вентильного двигателя

По схеме такой двигатель представляет собой электромеханическую систему, в состав которой входят вентильный коммутатор (ВК), система управления (СУ), датчик положения ротора (ДПР).

Вентильный коммутатор преобразует постоянный ток в переменный ток, необходимый для создания вращающегося магнитного поля. Система управления формирует управляющие сигналы для вентильных ключей ВК. ДПР определяет логику включения вентильных ключей.

Исполнительные органы некоторых рабочих машин и механизмов должны совершать дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. В ЭП таких машин и механизмов успешно применяются шаговые двигатели различных типов.

Шаговый двигатель по принципу своего действия является синхронным двигателем, в котором магнитное поле перемещается (вращается) не непрерывно, а дискретно, шагами. Это достигается (рис. 3.22) за счет импульсного возбуждения обмоток шагового двигателя (ШД) с помощью электронного коммутатора (ЭК), который преобразует одноканальную последовательность управляющих импульсов f_y в многофазную систему напряжений U_y прикладываемых к обмоткам (фазам) шагового двигателя.

Современные шаговые двигатели разнообразны по своему конструктивному исполнению. В зависимости от числа фаз и устройства магнитной системы шаговые двигатели бывают однофазными, двухфазными и многофазными с активным или пассивным ротором.

Активный ротор выполняется из постоянных магнитов или снабжается обмоткой возбуждения. Шаговые двигатели с ротором из постоянных магнитов получили название магнитоэлектрических.

Шаговые двигатели с пассивным ротором делятся на реактивные и индукторные двигатели.

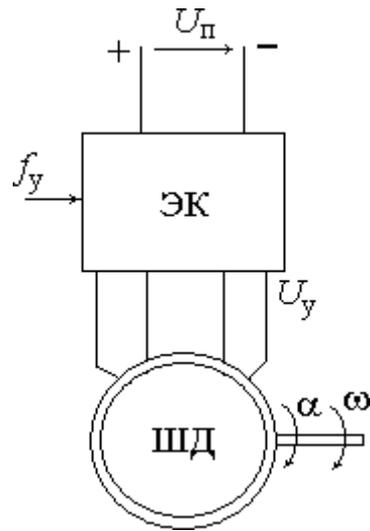


Рис. 3.22. Схема шагового двигателя

Глава 4 ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Современные промышленные электроприводы (ЭП) и электроприводы автономных объектов (ЭАО) представляют собой замкнутую электромеханическую автоматическую систему, обеспечивающую то или иное воздействие на окружающие объекты для получения готовой продукции или управляющую перемещением объекта регулирования.

В общем, любой электропривод обеспечивает силовое воздействие, в результате которого осуществляется преобразование по заданному закону какой-либо первичной энергии (запасённой ранее) в механическую энергию.

Благодаря большой эксплуатационной надёжности и несложной технологии изготовления электроприводы нашли широкое применение в различных областях техники; для управления оптическими телескопами, антеннами радиолокационных станций, оптическими и механическими элементами лентопротяжных трактов аэро- и космических фотоаппаратов, в химической и целлюлозно-бумажной промышленности, в установках непрерывной разливки стали, при автоматизации технологических процессов, а также в военной и других специальных областях техники.

4.1. Электропривод как система.

Электропривод – это управляемая электромеханическая система. Её назначение – преобразовывать электрическую энергию в механическую и обратно и управлять этим процессом.

Электропривод имеет два канала – *силовой* и *информационный* (рис. 4.1). По первому транспортируется преобразуемая энергия (широкие стрелки на рис. 4.1), по второму осуществляется управление потоком энергии, а также сбор и обработка сведений о состоянии и функционировании системы, диагностика ее неисправностей (тонкие стрелки на рис. 4.1).

Силовой канал в свою очередь состоит из двух частей – электрической и механической части и обязательно содержит связующее звено – электромеханический преобразователь.

В *электрическую часть* силового канала входят устройства *ЭП*, передающие электрическую энергию от источника питания (шин промышленной электрической сети, автономного электрического генератора, аккумуляторной батареи и т.п.) к электромеханическому преобразо-

вателю ЭМП и обратно и осуществляющие, если это нужно, преобразование электрической энергии.

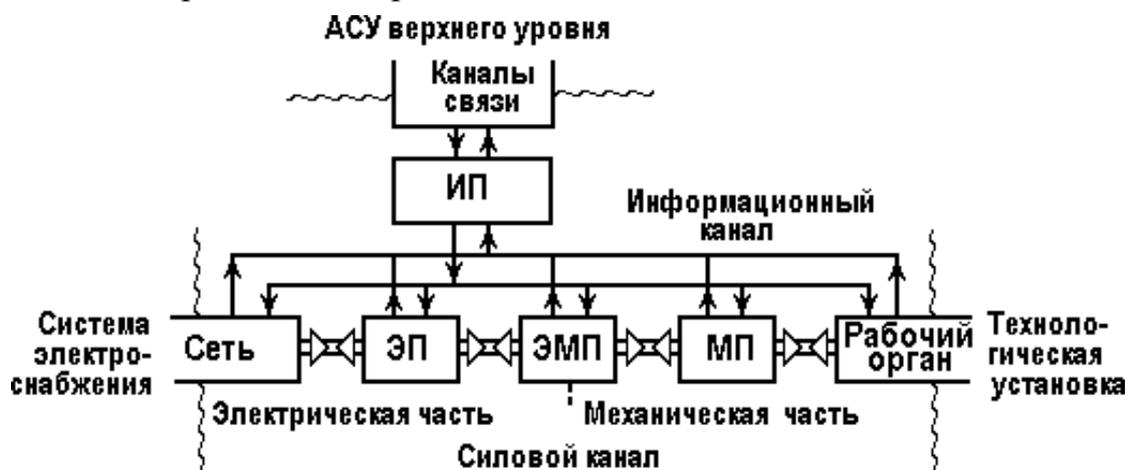


Рис. 4.1. Общая структура электропривода

Механическая часть состоит из подвижного органа электромеханического преобразователя, механических передач и исполнительного органа установки, в котором полезно реализуется механическая энергия.

Электропривод взаимодействует с *системой электропитания* или источником электрической энергии, с одной стороны, с *технологической установкой* или машиной, с другой стороны, и наконец, через информационный преобразователь *ИП* с *информационной системой более высокого уровня*, часто с человеком – оператором, с третьей стороны (рис. 4.1).

Можно считать, что электропривод как подсистема входит в указанные системы, являясь их частью. Действительно, специалиста по электроснабжению электропривод обычно интересует как потребитель электроэнергии, технолога или конструктора машин – как источник механической энергии, инженера, разрабатывающего или эксплуатирующего АСУ, – как развитый интерфейс, связывающий его систему с технологическим процессом или системой электроснабжения.

Практически все процессы, связанные с механической энергией, движением, осуществляются электроприводом. Исключение составляют лишь автономные транспортные средства (автомобили, самолеты, некоторые виды подвижного состава, судов), использующие неэлектрические двигатели. В относительно небольшом числе промышленных установок используется гидропривод, еще реже – пневмопривод.

Столь широкое, практически повсеместное распространение электропривода обусловлено особенностями электрической энергии – возможностью передавать ее на любые расстояния, постоянной готовно-

стью к использованию, легкостью превращения в любые другие виды энергии.

Сегодня в приборных системах используются электроприводы, мощность которых составляет единицы микроватт; мощность электропривода компрессора на перекачивающей газ станции – десятки мегаватт, т.е. диапазон современных электроприводов по мощности превышает 10^{12} . Такого же порядка и диапазон по частоте вращения: в установке, где выращиваются кристаллы полупроводников, вал двигателя должен делать 1 оборот в несколько десятков часов при очень жестких требованиях к равномерности движения; частота вращения шлифовального круга в современном хорошем станке может достигать 150 тыс. об/мин.

Но особенно широк – безгранично широк – диапазон применений современного электропривода: от искусственного сердца до шагающего экскаватора, от вентилятора до антенны радиотелескопа, от стиральной машины до гибкой производственной системы. Именно эта особенность – теснейшее взаимодействие с технологической сферой – оказывала и оказывает на электропривод мощное стимулирующее влияние. Непрерывно растущие требования со стороны технологических установок определяют развитие электропривода, совершенствование его элементарной базы, его методологии. В свою очередь, развивающийся электропривод положительно влияет на технологическую сферу, обеспечивает новые, недоступные ранее возможности.

С энергетической точки зрения электропривод – *главный потребитель электрической энергии*: сегодня в развитых странах он потребляет более 60% всей производимой электроэнергии. В условиях дефицита энергетических ресурсов это делает особенно острой проблему энергосбережения в электроприводе и средствами электропривода.

Специалисты считают, что сегодня сэкономить единицу энергетических ресурсов, например 1 т условного топлива, вдвое дешевле, чем ее добыть. Нетрудно видеть, что в перспективе это соотношение будет изменяться: добывать топливо становится всё труднее, а запасы его всё убывают.

4.2. Функции электропривода

Рассмотрим подробнее силовой (энергетический) канал электропривода (рис. 4.2). Будем полагать, что мощность P передается от сети (P_1) к рабочему органу (P_2), что этот процесс управляем и что передача и преобразование мощности ее сопровождается некоторыми потерями ΔP в каждом элементе силового канала.

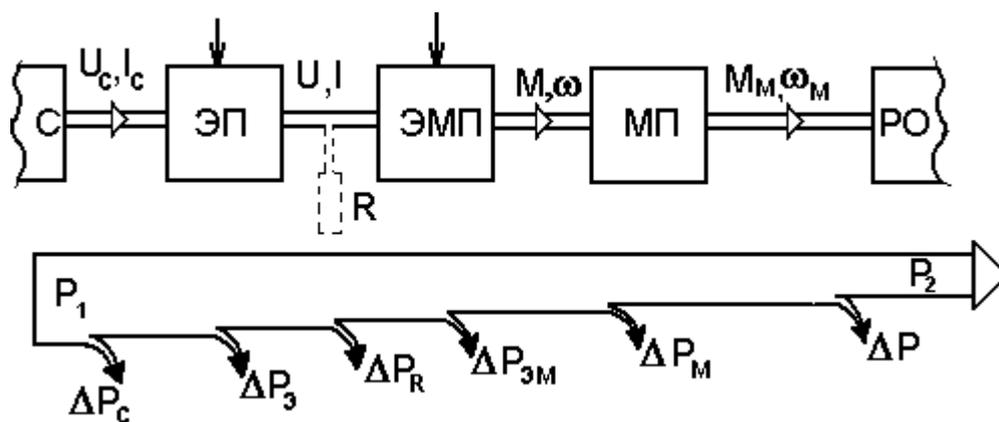


Рис.4. 2. Энергетический канал

Функция *электрического преобразователя ЭП* (если он используется) состоит в преобразовании электрической энергии, поставляемой источником (сетью) и характеризуемой напряжением U_c и током I_c сети, в электрическую же энергию, требуемую двигателем и характеризуемую величинами U, I . Преобразователи бывают *неуправляемыми* (трансформатор, выпрямитель, параметрический источник тока). Чаще всего – это *управляемые преобразователи* (мотор-генератор, управляемый выпрямитель, преобразователь частоты). Они могут иметь *одностороннюю* (выпрямитель) или *двухстороннюю* (мотор – генератор, управляемый выпрямитель с двумя комплектами вентилялей) *проводимость*. В случае *односторонней проводимости преобразователя* и обратном (от нагрузки) потоке энергии используется *дополнительный резистор R* для “слива” тормозной энергии.

Электромеханический преобразователь ЭМП (двигатель), всегда присутствующий в электроприводе, преобразует электрическую энергию (U, I) в механическую (M, ω) и обратно.

Механический преобразователь (передача) – ременный или шестереночный редуктор, червячная передача (пара винт-гайка), система блоков, кривошипно-шатунный механизм и т.п. осуществляет согласование момента M и скорости ω двигателя с моментом M_M (усилием F_M) и скоростью ω_M рабочего органа технологической машины.

Величины, характеризующие преобразуемую энергию, - напряжения, токи, моменты (силы), скорости называют *координатами электропривода*.

Основная функция электропривода состоит в *управлении* координатами, т.е. в их *принудительном направленном изменении* в соответствии с требованиями обслуживаемого технологического процесса.

Управление координатами должно осуществляться в пределах, разрешенных конструкцией элементов электропривода, чем обеспечивается надежность работы системы. Эти допустимые пределы обычно связаны с *номинальными значениями координат*, назначенными производителями оборудования и обеспечивающими его оптимальное использование.

В правильно организованной системе при управлении координатами (потоком энергии) должны минимизироваться *потери ΔP* во всех элементах и к рабочему органу должна подводиться требуемая в данный момент мощность.

Эти вопросы – свойства и характеристики различных электроприводов, как правильно управлять их координатами в установившихся – статических - и переходных - динамических - режимах, как оценивать энергетические свойства и, наконец, как правильно проектировать силовую часть электропривода, являются основным предметом теории электропривода.

В этом разделе практически не будут затрагиваться интересные и непростые задачи, относящиеся к информационным каналам электропривода: мы будем полагать, что современные технические средства смогут обеспечить любые нужные воздействия, и будем акцентировать внимание на том, что должна делать система управления электропривода, а не на том как это может быть практически осуществлено.

Даже беглого взгляда на структуру силовой части электропривода (рис. 4.2) достаточно, чтобы понять, что объект изучения весьма сложен. Он содержит разнородные элементы - электрические и электронные, электромеханические, механические, совсем непростые процессы, которыми нужно управлять, и т.п. Очевидно, что эффект при изучении предмета – глубокое понимание основных явлений и умение решать простые, но важные для практики задачи – может быть достигнут лишь при выполнении ряда условий.

Во-первых, надо научиться работать с моделями реальных, как правило, очень сложных объектов, т.е. с искусственными простыми объектами, отражающими, тем не менее, именно те свойства реального объекта, которые изучаются.

Во-вторых, надо стараться использовать лишь хорошие модели, отражающие то, что нужно, и так, как нужно, не избыточные, но и не примитивные. Это совсем не просто, и этому будет уделено значительное внимание.

В-третьих, нужно строго оговаривать условия, при которых получена та или иная модель. Если этого не сделать, результаты могут просто не иметь смысла.

И, наконец, надо уметь выделять главное и отбрасывать второстепенное, частное. Именно глубокое понимание основных принципов, со-размерностей, главных соотношений, закономерностей и умение применять их на практике – основная цель изучения дисциплины «Электрооборудование промышленности».

4.3. Нагрузочные диаграммы электроприводов и методы их построения.

Мощность электропривода определяется главным образом выбором рода тока, типа и конструктивного исполнения электродвигателя. *Выбор двигателя* – один из ответственных этапов проектирования привода, так как именно двигатель осуществляет электромеханическое преобразование энергии и в значительной мере определяет технические и экономические качества привода в целом.

Исходные данные для выбора двигателя обычно представляются в виде *нагрузочных диаграмм механизма*, т.е. зависимостей $M_c(t)$ и $\omega(t)$ и приведенного момента инерции J_Σ . Зависимость $\omega(t)$ иногда называют тахограммой. Иногда $M_c(t)$ зависит от пути, в этом случае при известной скорости можно перестроить заданный график $M_c(s)$, получив его в виде $M_c(t)$.

Нагрузочные диаграммы механизма, вообще говоря, могут иметь любой вид, однако всегда можно выделить цикл, т.е. промежуток времени $T_{\text{ц}}$ через который диаграмма повторяется. Если характер работы таков, что режимы воспроизводятся плохо (лифт, подъемный кран и т.п.), строят нагрузочные диаграммы для наиболее вероятного или наиболее тяжелого цикла.

Следует особо подчеркнуть, что для обоснованного выбора двигателя требуемая нагрузочная диаграмма механизма должна быть известна. На рис. 4.3 в качестве примера приведены требуемые нагрузочная диаграмма и тахограмма некоторого механизма.

Для предварительного выбора двигателя по известной нагрузочной диаграмме механизма находят средний момент статической нагрузки.

$$M_{\text{ср}} = \frac{\sum_i^n M_{Ci} \cdot t_i}{\sum_i^n t_i} \quad (4.1)$$

где M_{Ci} – момент статической нагрузки на i -ом интервале;

t_i – продолжительность i -ого интервала;

n – число интервалов, где $M_c = \text{const}$.

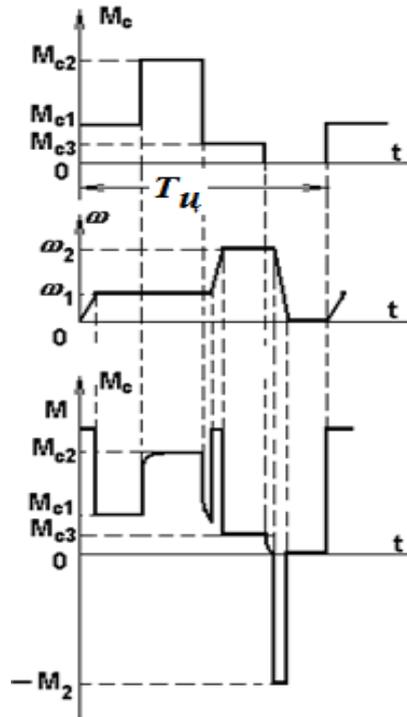


Рис. 4.3. Нагрузочные диаграммы механизма

Номинальный момент искомого двигателя с учетом динамических нагрузок может быть оценен как

$$M_H = (1,1-1,3)M_{ССР} \quad (4.2)$$

В качестве номинальной скорости следует взять ω_{\max} , если регулирование однозонное вниз от основной скорости, или ω_{\min} , если регулирование однозонное вверх от основной скорости. По найденным таким образом величинам M_H и ω_H можно выбрать двигатель по каталогу и, следовательно, определить его момент инерции, построить механические характеристики, кривые переходных процессов.

После того, как двигатель предварительно выбран, можно перейти к построению *нагрузочной диаграммы двигателя*, т.е. зависимости $M(t)$. Это построение сводится к решению уравнения движения аналитическими классическим или операторным методами.

$$M = M_C + J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.3)$$

Рассмотрим нагрузочную диаграмму двигателя, построенную в предположении, что при изменении скорости и $M_C = const$, когда осуществляется набросе и сброс нагрузки, а привод работает на линейной механической характеристике.

Нетрудно видеть, что нагрузочная диаграмма двигателя (рис. 4.4) существенно отличается от нагрузочной диаграммы механизма.

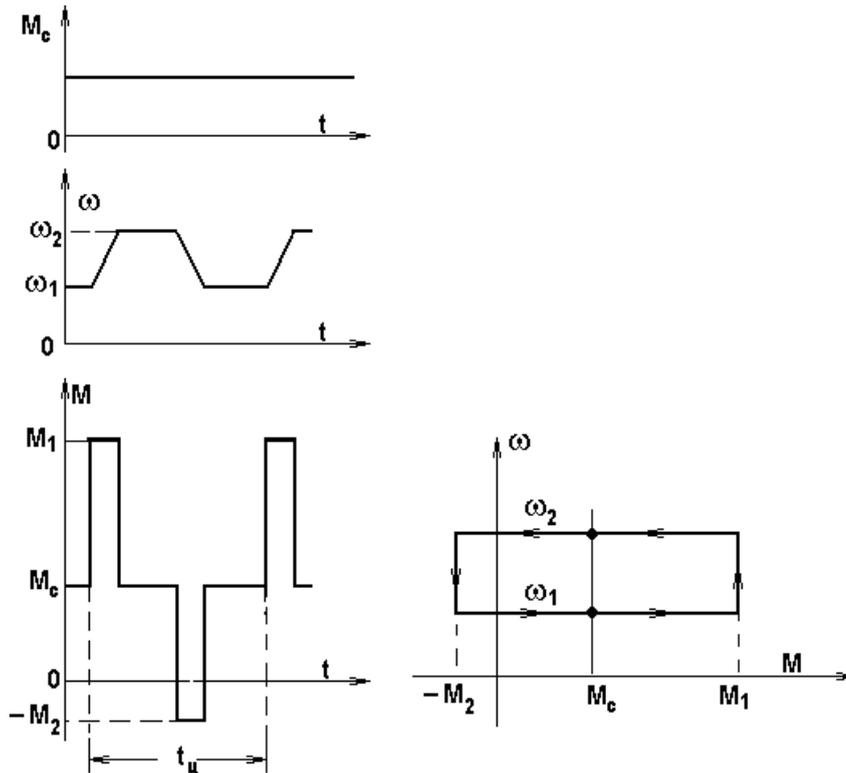


Рис. 4.4. Нагрузочная диаграмма двигателя при $M_c = const$ и $\omega = var$

4.4. Основные уравнения электропривода постоянного тока

Для получения простейшей модели электропривода постоянного тока, описывающей установившиеся (статические) режимы и позволяющей получить основные характеристики, воспользуемся схемой на рис. 4.5. Будем полагать, что якорная цепь питается от независимого источника с напряжением U , сопротивление цепи якоря R постоянно, магнитный поток Φ определяется лишь током возбуждения и не зависит от нагрузки (реакция якоря не проявляется), индуктивные параметры цепей пока не учитываются, поскольку рассматриваются лишь установившиеся (статические) режимы.

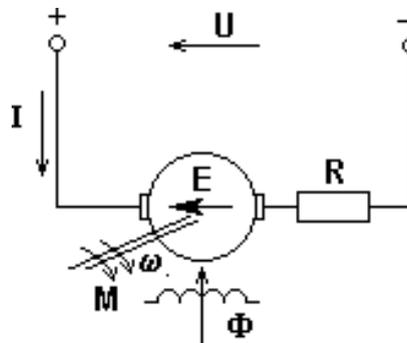


Рис. 4.5. Схема электропривода с двигателем постоянного тока

Взаимодействие тока I в обмотке якоря с магнитным потоком Φ , создаваемым обмотками, расположенными на полюсах машины, приводит в соответствии с законом Ампера к возникновению электромагнитных сил, действующих на активные проводники обмотки и, следовательно, электромагнитного момента M :

$$M = cI\Phi, \quad (4.4)$$

где c – конструктивный параметр машины.

В движущихся с угловой скоростью ω в магнитном поле под действием момента M в проводниках обмотки якоря в соответствии с законом Фарадея наводится ЭДС вращения E :

$$E = c\Phi\omega, \quad (4.5)$$

направленная в рассматриваемом случае встречно по отношению к вызвавшей движение причине – ЭДС источника питания U .

В соответствие со вторым законом Кирхгоффа для якорной цепи машины справедливо уравнение:

$$U = E + IR, \quad (4.6)$$

Уравнения (4.4) – (4.6) – простейшая, но достаточная для понимания главных процессов в электроприводе постоянного тока модель. Для решения практических задач они должны быть дополнены уравнением движения с моментом потерь ΔM , входящим в M_c ,

$$M = M_c + J_\Sigma \frac{d\omega}{dt}$$

и уравнениями цепи возбуждения для конкретной схемы электропривода.

Разумеется, в условиях каждой задачи должно быть строго оговорено, что задано и известно, а что нужно искать.

Рассмотрим подробнее роль, которую играет ЭДС E в процессе преобразования энергии, осуществляемом электрической машиной. Если существовал некоторый установившийся режим $M_l = M_{c1}$, а затем M_c изменился, например, возрос до величины M_{c2} , то для получения нового установившегося режима необходимо иметь средство, которое изменило бы M , приведя его в соответствие с новым значением M_c . В двигателе внутреннего сгорания эту роль выполнит оператор, увеличив подачу топлива; в паровой турбине – специальный регулятор, который увеличит подачу пара. В электрической машине эту роль выполнит ЭДС. Действительно, при возрастании M_c скорость двигателя начнет снижаться, значит уменьшится в соответствии с (4.5) и ЭДС (полагаем для простоты, что Φ , а также U и R – постоянные). Из (4.6) следует, что

$$I = \frac{U - E}{R}, \quad (4.7)$$

следовательно, ток вырастет, обусловив тем самым рост момента в соответствии с (4). Двигатель автоматически, без каких-либо внешних воздействий перейдет в новое установившееся состояние.

Эти процессы будут иметь место при любых величинах и знаках M_c , то есть ЭДС будет выполнять функцию регулятора, как в двигательном режиме, так и в тормозных режимах работы машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Под ред. Г.Б. Онищенко.– М.:РАСХН-2001.– 520 с.
2. Аристов А.В., Бурулько Л.К., Паюк Л.А. Математическое моделирование в электромеханике: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 145 с.
3. Бурулько Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: Учебное пособие. Часть 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 74 с.
4. Бурулько Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: Учебное пособие. Часть 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
5. Бурулько Л.К., Боровиков Ю.С. Специальные электроприводы переменного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 145 с.
6. Бурулько Л.К., Глазачев А.В. Динамика электроприводов летательных аппаратов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 127 с.
7. Бурулько Л.К., Глазачев А.В. Электропривод летательных аппаратов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.