

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**Л.К. Бурулько, Ю.Н. Дементьев**

## **Электрооборудование промышленности**

**Часть 1**

**Источники, приемники и преобразователи электрической энергии**

Учебно-методическое пособие

Издательство  
Томского политехнического университета  
2012



УДК 62-83(075.8)  
ББК 31.29я73  
К12

**Бурулько Л.К.**

**К12** Электрооборудование промышленности. Ч.1. Источники, приемники и преобразователи электрической энергии: учебно-методическое пособие / Бурулько Л.К., Дементьев Ю.Н.; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 162 с.

В пособие рассмотрены и включены сведения об основном электрооборудовании, электротехнологических установках, автоматизированном электроприводе, как основе исполнительных частей современных рабочих машин и технологических комплексов предприятий учреждения и организаций.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

**УДК 62-83(075.8)**  
**ББК 31,29я73**

*Рецензенты*

Доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехнические средства автоматизации и управления» ТУСУРа

А.Г. Гарганеев

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник 13 отдела автоматики и электромеханики ТУСУРа

Н.А. Михневич

**ISBN 987-5-982298-832-4**

© ГОУ ВПО НИ ТПУ 2012

© Бурулько Л.К., Дементьев Ю.Н., 2012

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2012

## 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 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 нерегулируемых 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:

- установ-ки, производящие электрическую энергию (электростанции);
- установ-ки, 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 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  $\Delta P$  и температуры нагрева  $\tau$  приведены на рис. 1.1.*

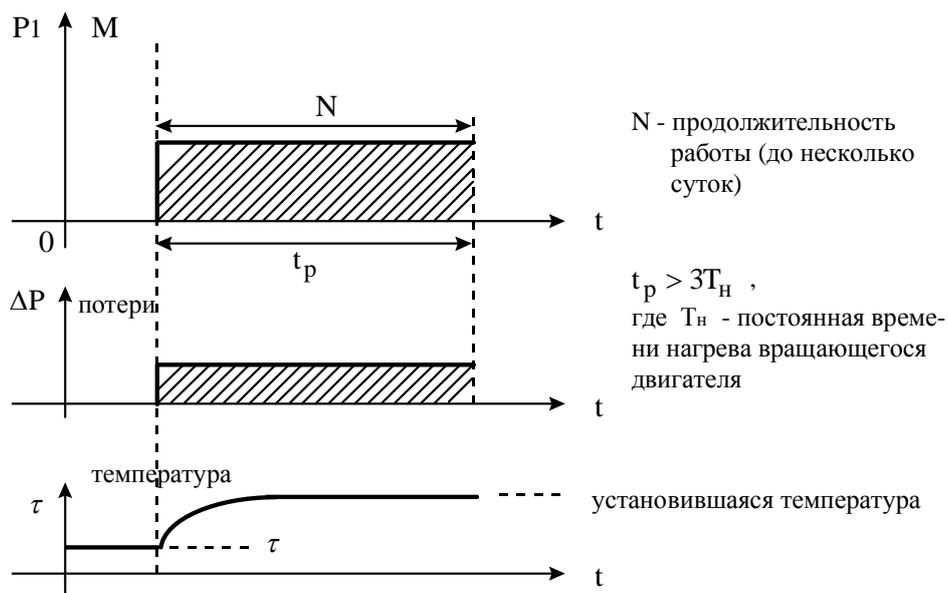


Рис. 1.1. Диаграммы продолжительного режима S1

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  $2^\circ\text{C}$  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

$$t_p \ll 3T \text{ а } t_0 > 3T_0$$

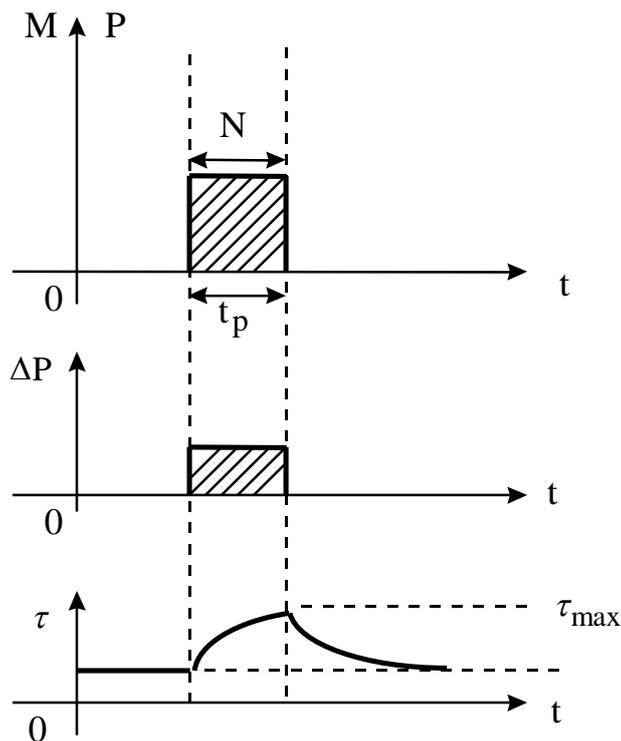


Рис. 1.2. Диаграммы кратковременного режима S2

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.

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

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.

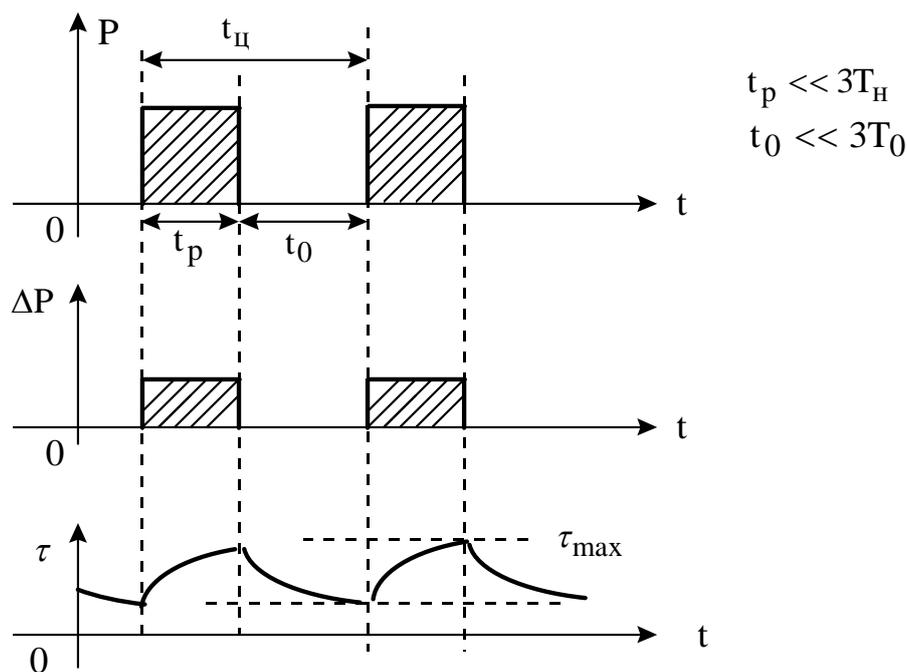


Рис. 1.3. Диаграммы повторно-кратковременного режима S3

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.

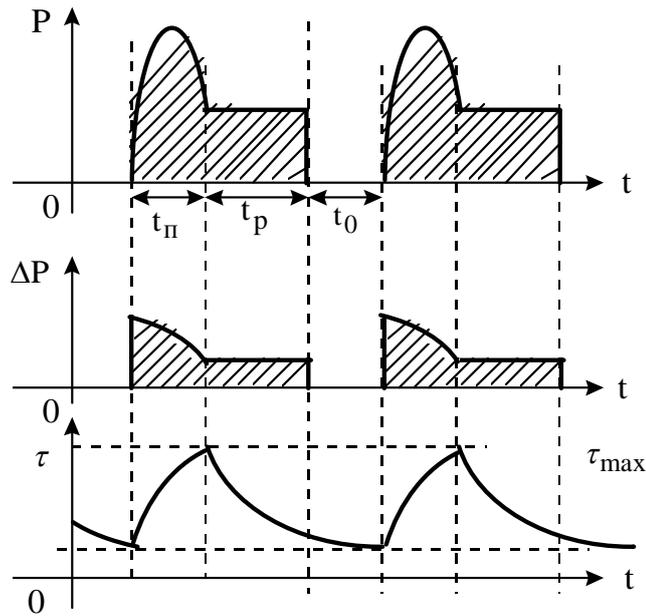


Рис. 1.4. Диаграммы повторно-кратковременного режима S4

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.).

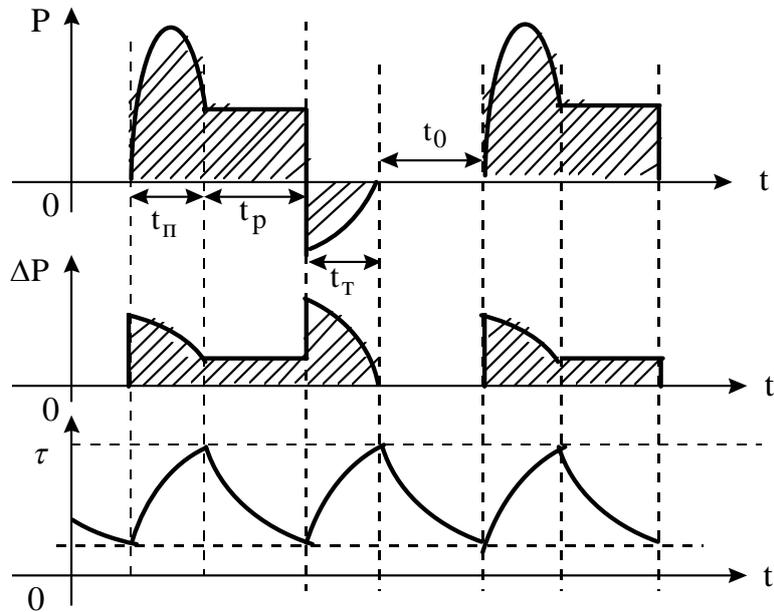


Рис. 1.5. Диаграммы повторно-кратковременного режима S5

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

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

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  $F1 = 2$ .

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

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 %

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

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

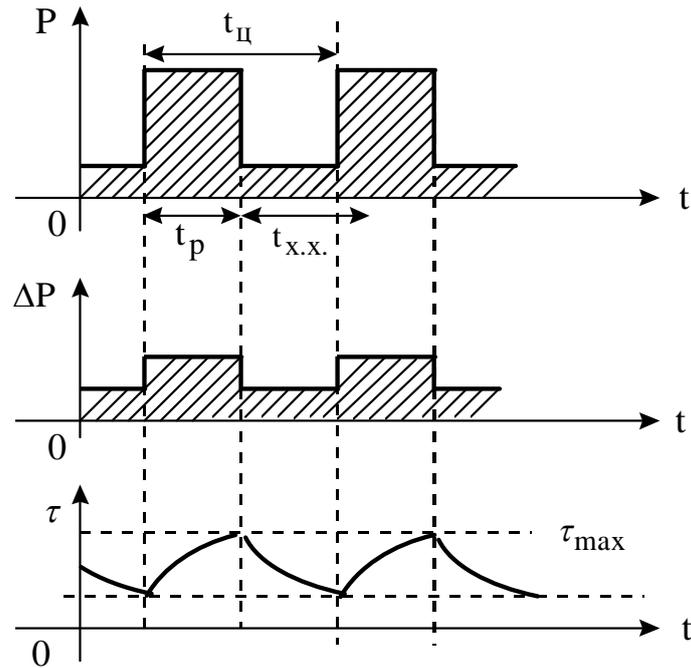


Рис. 1.6. Диаграммы перемежающегося режима S6

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.

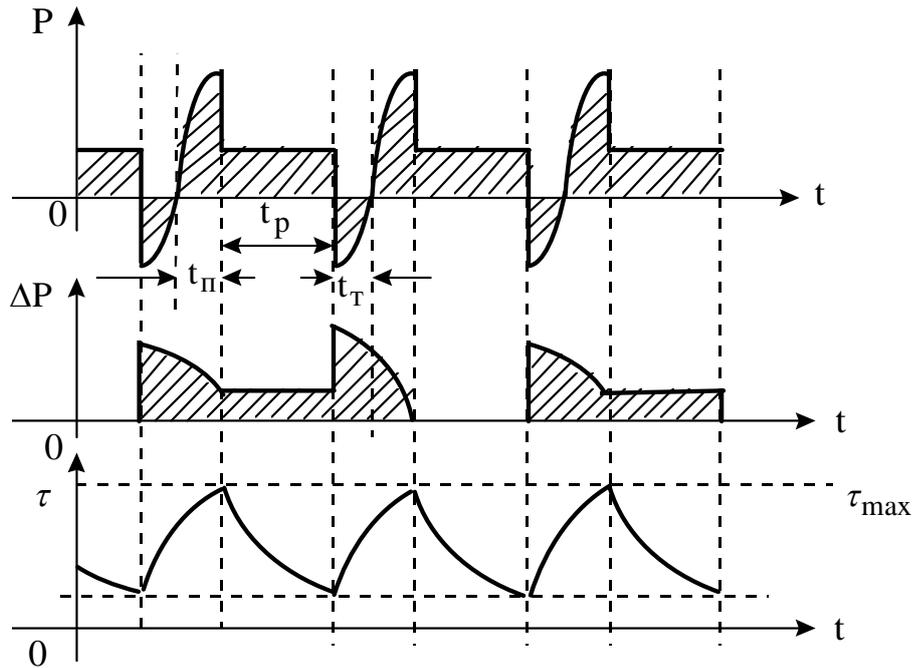


Рис. 1.7. Диаграммы перемежающегося режима S7

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:

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

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

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

где  $t_{\text{p1}}, t_{\text{p2}}, t_{\text{p3}}$  – время работы на каждой угловой скорости,  $t_{\text{T1}}, t_{\text{T2}}$  - время электрического торможения,  $t_{\text{П}}$  – 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).

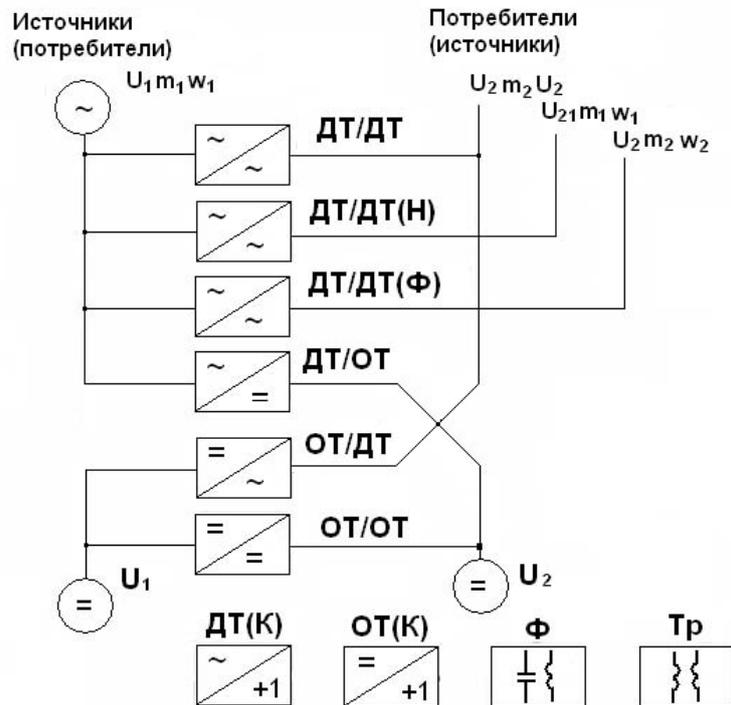


Рис. 1.8. Классификация базовых ячеек преобразователей электрической энергии

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].

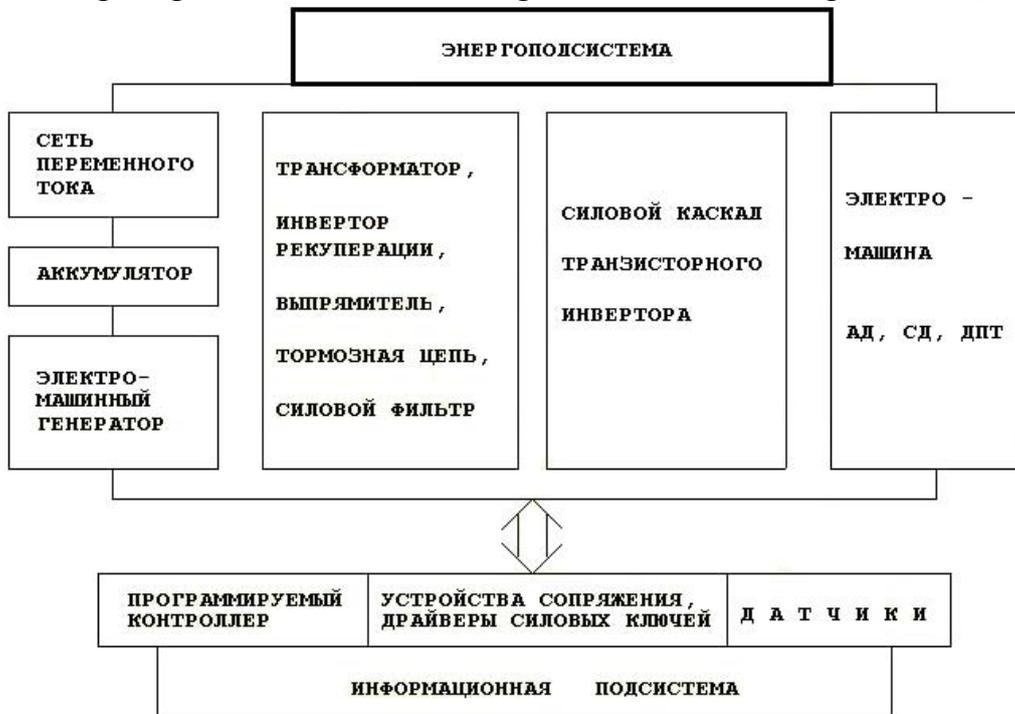


Рис. 2.1. Энергоподсистема промышленного предприятия

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.

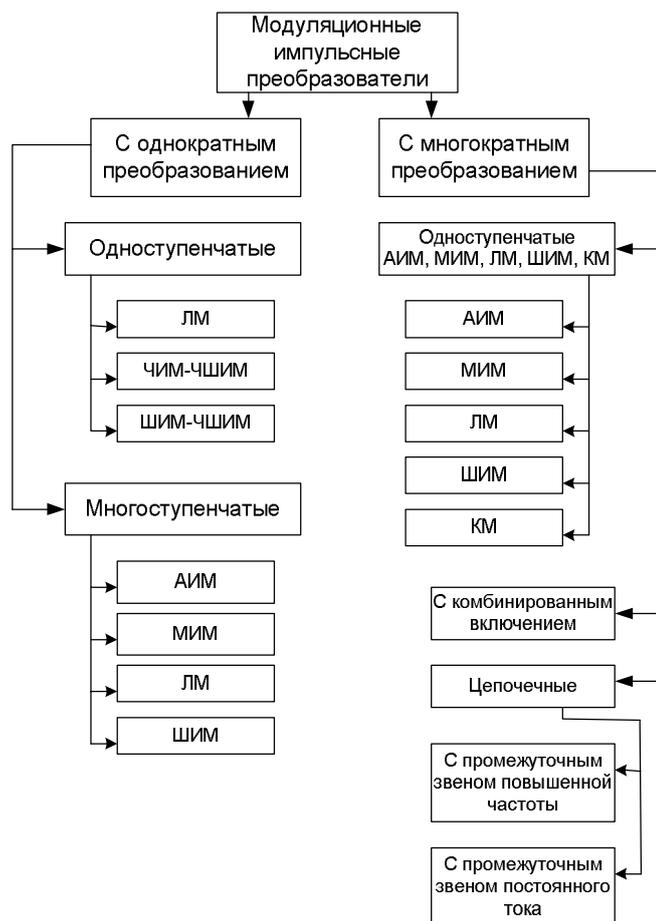


Рис. 2.2 Классификация преобразовательных устройств

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.

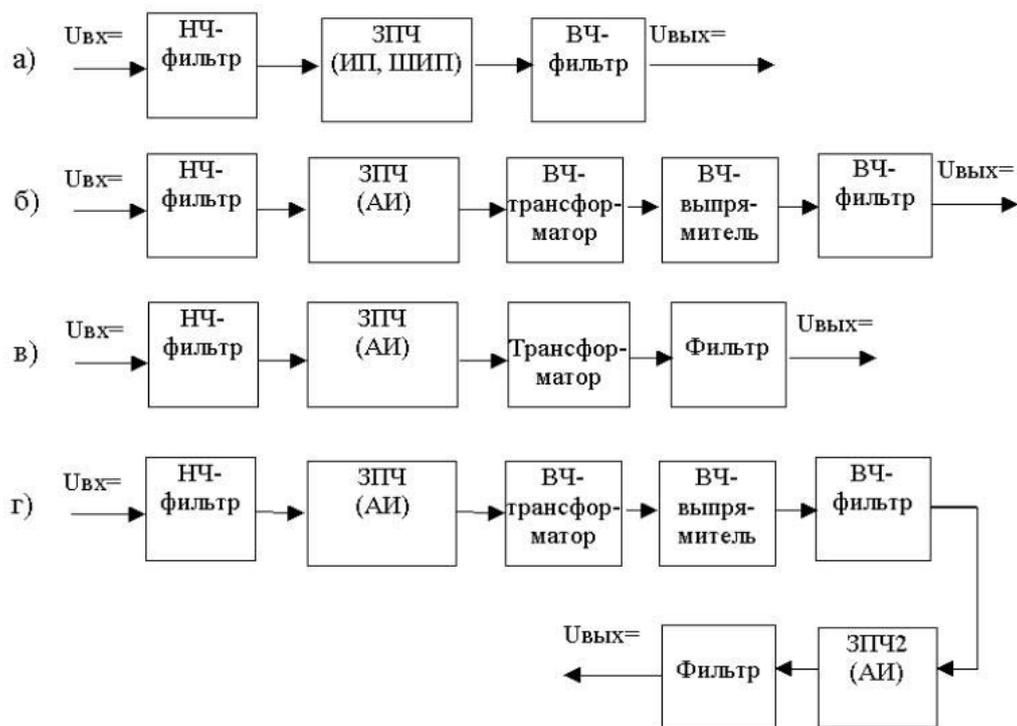


Рис. 2.3 Функциональные схемы включения элементарных преобразователей

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. Управляемые выпрямители

Выпрямители, позволяющие регулировать величину выпрямленного напряжения в заданных пределах, называются управляемыми. Регулировать величину выпрямленного напряжения можно двумя принципиально различными способами:

1. Изменять каким-либо способом величину подводимого к выпрямителю напряжения (например, с помощью автотрансформатора, ступенчато регулируемых трансформаторов, дросселей насыщения и др.).

2. Использовать в выпрямителях свойства управляемых вентилей (с полной или частичной управляемостью).

Наибольшее распространение в технике получили управляемые выпрямители, относящиеся ко второй группе.

Управляемые выпрямители используются для управления двигателем постоянного по цепи якоря, электролизных ванн, внутриводского электрического транспорта, электрофильтров, сварочных установок постоянного тока и др. Источником энергии для управляемых выпрямителей является сеть переменного тока. Принцип управления состоит в том, что в положительный полупериод питающего напряжения тиристор, подобно ключу, открывается и подает напряжение к двигателю лишь часть этого полупериода. Напряжение и ток на выходе управляемого выпрямителя содержат постоянные и переменные составляющие. Для анализа работы выше перечисленных установок необходимо найти постоянные составляющие напряжения и тока, определяемые как средние значения этих величин за период изменения напряжения сети. Изменяя момент (фазу) открытия тиристора, меняют среднее значение напряжения и, таким образом, регулируют выходное напряжение установки.

Существует большое число различных схем управляемых выпрямителей. По принципу действия и построения они могут быть разделены на две группы: однополупериодные (схемы с нулевым проводом), в которых используют только одну полуволну напряжения сети, и двухполупериодные (мостовые схемы), где использованы обе полуволны переменного напряжения сети.

Работу простейшей двухполупериодной схемы иллюстрирует рис. 2.4. К источнику синусоидального напряжения сети  $u_c$  с амплитудой  $U_m$  подключена нагрузка  $R$  через тиристорный мост  $T1-T4$ . Диагональные тиристоры  $T1$ ,  $T4$  и  $T2$ ,  $T3$  открываются попарно, поочередно в момент времени, определяемый углом отпирания  $\alpha$ .

В интервале угла  $\alpha < \omega t < 180^\circ$  к нагрузке подведено напряже-

ние  $u = U_m \cdot \sin \omega t$ . На рис. 2.4, в кривая напряжения на нагрузке закрашена темным цветом.

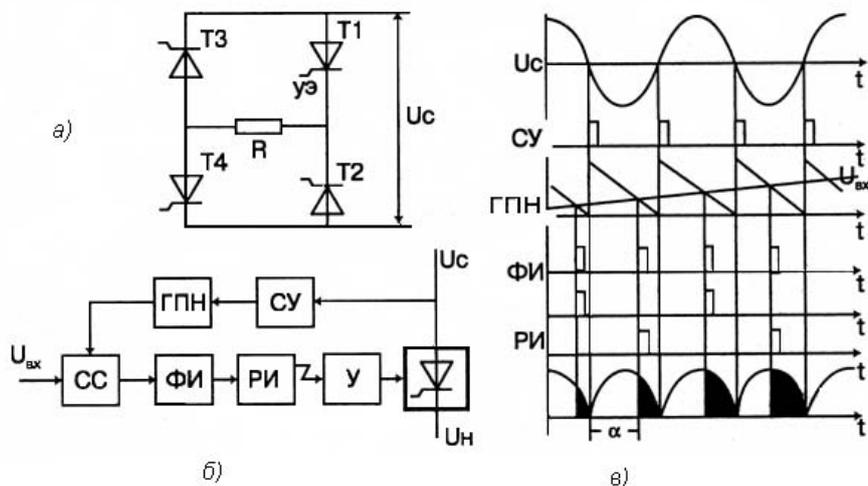


Рис.2.4 Однофазный двухполупериодный управляемый выпрямитель: а – мостовая схема, б – функциональная схема вертикального управления, в – графики напряжений на элементах

Так как нагрузка резистивная, кривая тока повторяет кривую напряжения. В момент времени  $\alpha=180^\circ$  ток уменьшается до нуля и соответствующая пара диагональных тиристоров закрывается. Этот процесс повторяется каждый полупериод. Управление тиристорами желательно осуществлять импульсами возможной меньшей длительности (так как ее увеличение связано с возрастанием мощности схемы управления), но несколько превышающий время включения тиристора, то есть время перехода его из закрытого в открытое состояние.

Необходимо также обеспечить достаточно крутой передний фронт управляющего импульса, что уменьшает потери мощности в тиристоре при включении, а следовательно, его нагрев.

Рассмотренный фазовый метод управления может быть реализован с помощью фазосдвигающих способов, одним из которых является вертикальный способ управления, основанный на сравнении опорного напряжения (обычно пилообразной формы) и постоянного напряжения сигнала управления (рис. 2.4). Равенство мгновенных значений этих напряжений определяет фазу  $\alpha$ , при которой схема вырабатывает импульс, затем усиливаемый и подаваемый на управляющий электрод тиристора. Изменение фазы  $\alpha$  управляющего импульса достигается изменением уровня напряжения сигнала управления  $U_{вх}$ . Функциональная схема управления приведена на рис. 2.4,б. Опорное напряжение, вырабатываемое генератором пилообразного напряжения (ГПН) и синхронизированное с напряжением сети с помощью синхронизирующего устройства (СУ), подаётся на схему сравнения (СС), на которую одновре-

менно поступает и входное напряжение (сигнал управления). Сигнал со схемы сравнения поступает на формирователь импульсов (ФИ), затем на вход распределителя импульсов (РИ), на усилители мощности (У), откуда в виде мощного, обладающего крутым фронтом и регулируемого по фазе импульса подаётся на управляющий электрод.

Интегрируя напряжение  $u = U_m \sin \omega t$  на интервале  $\alpha - \pi$ , определим среднее за период значение напряжение на нагрузке:

$$U_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} (1 + \alpha) \quad (2.1)$$

На рис. 2.5 штриховой линией изображена функция (2.1) в долях наибольшего среднего значения напряжения на нагрузке  $U_{cp} = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}$ , соответствующего  $\alpha = 0$

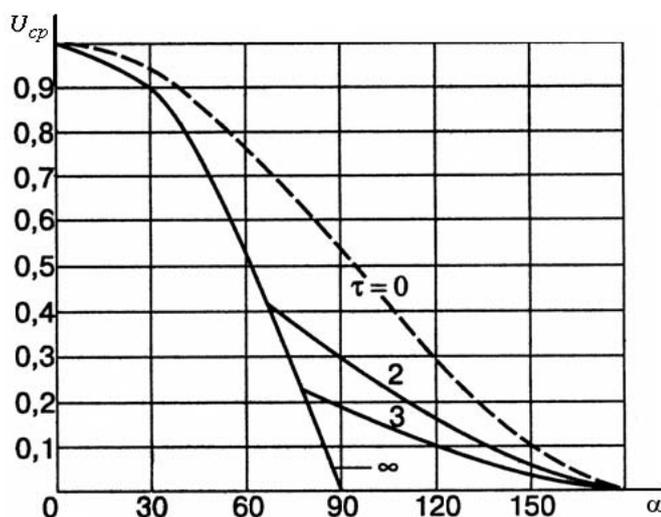


Рис. 2.5 Зависимости среднего напряжения на выходе УВ от угла управления

Процессы в выпрямителе усложняются, если нагрузка имеет активно-индуктивный характер. На рис. 2.6 показаны процессы, протекающие в подобных цепях. Отпирание тиристорov осуществляют, как и в простейшей схеме, рис. 2.4. В отличие рис. 2.4 ток нарастает не скачком, а плавно за счёт индуктивности нагрузки  $L_H$ . Причём, когда напряжение питающее тиристор фазы проходит через ноль, ток не прекращается, а под действием ЭДС самоиндукции, создаваемой индуктивностью  $L_H$ , продолжает протекать ещё некоторое время, преодолевая отрицательное напряжение питающей фазы. Тиристор закрывается лишь в момент времени  $\beta$ , когда ток, протекающий через него, достигнет нуля.

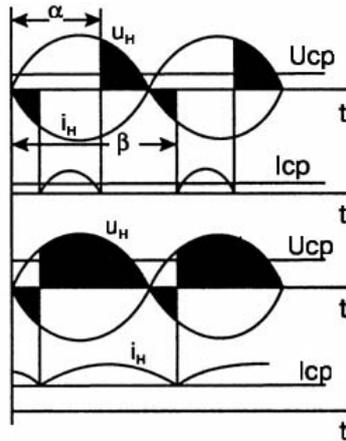


Рис. 2.6 Электромагнитные процессы в УВ при активно-индуктивной нагрузке

В результате, как и при чисто резистивной нагрузке, на участке  $\beta - (\alpha + 180^\circ)$  происходит разрыв (прерывание) тока в цепи.

Таким образом, при наличии индуктивности в нагрузке кривая выпрямленного напряжения может иметь наряду с положительными участками и отрицательные участки, поэтому среднее значение напряжения на нагрузке равно

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{U_m}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta). \quad (2.2)$$

Это напряжение является функцией, как от угла отпирания вентиля  $\alpha$ , так и относительной постоянной времени цепи нагрузки, определяемой как  $\tau = \frac{\omega \cdot L_H}{R_H}$ . На рис. 2.5 показаны зависимости

$U_{\text{ср}} = f(\alpha)$  для трех значений  $\tau = 2, 3, \infty$ .

По мере уменьшения  $\alpha$  угол  $\beta$  увеличивается, и интервал проводимости одной диагонали (Т1, Т4) может перекрыть момент отпирания другой диагонали (тиристоры Т2, Т3). Поэтому при отпирании тиристоров Т2, Т3 мгновенное значение тока через них окажется равным мгновенному значению тока тиристоров Т1, Т4, которые запираются. Наступает режим непрерывного тока (рис. 2.6), при котором  $\beta = \alpha + 180^\circ$ .

Ток в цепи нагрузки может быть представлен в виде двух составляющих: постоянной и переменной. Переменная составляющая резко возрастает, когда ток становится прерывистым.

Так как переменная составляющая тока вызывает дополнительный нагрев и потери в нагрузке, при управлении двигателем стремятся обеспечить режим непрерывного тока, для чего последовательно с якорем включают дополнительный дроссель, увеличивая тем самым  $\tau$ .

Среднее значение напряжения на нагрузке в режиме непрерывного тока равно

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+180^{\circ}} U_m \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_m}{\pi} \cos \alpha \approx 0.9U \cos \alpha \quad (2.3)$$

Отметим, что индуктивность дополнительного дросселя увеличивает электромагнитную, а его активное сопротивление электромеханическую постоянную времени двигателя. Поэтому дополнительный дроссель ухудшает динамические свойства привода.

Режим непрерывного тока сохраняется при изменении  $\alpha$  в пределах  $0 < \alpha < \alpha_{\text{гп}}$ , где граничный угол  $\alpha_{\text{гп}}$  является функцией  $\tau$ . При  $\tau \rightarrow \infty$  угол  $\alpha_{\text{гп}} \rightarrow 90^{\circ}$ . Таким образом, при значительной индуктивности нагрузки, регулирование напряжения на ней эффективно лишь при изменении  $\alpha$  в пределах  $0 < \alpha < 90^{\circ}$  (рис. 2.5).

Для равномерной нагрузки фаз и уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения используют трёхфазные управляемые выпрямители. Эти выпрямители подключаются к трехфазной сети переменного тока, как правило, через трехфазный трансформатор.

Рассмотрим особенности работы трехфазного однополупериодного выпрямителя, схема которого приведена на рис. 2.7.

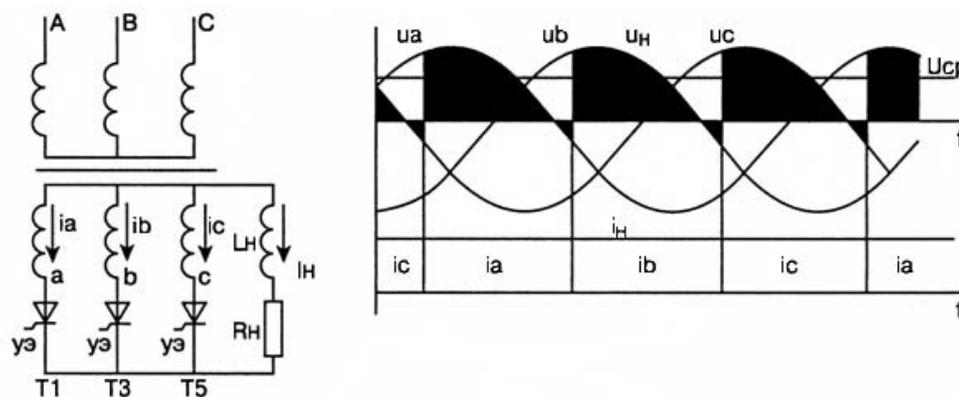


Рис.2.7 Трёхфазный однополупериодный УВ

При активно-индуктивной нагрузке кривая выпрямленного тока будет иметь незначительные пульсации, и без больших погрешностей ток нагрузки можно считать непрерывным и идеально сглаженным (рис. 2.7). При  $\alpha > 0$  так же, как и в однофазных схемах, кривая выпрямленного напряжения имеет отрицательные значения. Это объясняется возможностью тиристора пропускать ток при отрицательном напряжении на обмотке данной фазы за счет накопленной энергии в магнитном поле индуктивности нагрузки.

В трехфазном мостовом выпрямителе (рис.2.8.) последовательно соединены два трехфазных однополупериодных выпрямителя: анодный (на тиристорах Т1, Т3, Т5) и катодный (на тиристорах Т2,Т4,Т6). Каждая из этих групп повторяет работу трехфазного однополупериодного выпрямителя.

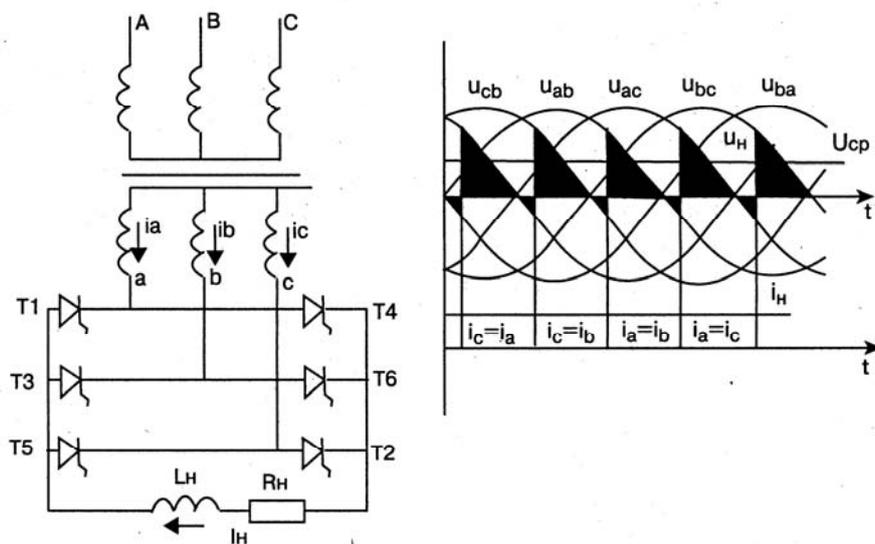


Рис.2.8 Трехфазный двухполупериодный ВВ

При активно – индуктивной нагрузке ток в цепи нагрузки получается идеально сглаженным и непрерывным практически во всем диапазоне регулирования (рис. 2.8).

В общем случае для  $m$ -фазного управляемого выпрямителя выражение для  $U_{cp}$  может быть получено при непрерывном токе путем интегрирования фазного напряжения на интервале проводимости  $\frac{2\pi}{m}$ , где  $m$  определяется как произведение числа фаз на количество полупериодов.

$$U_{cp} = \frac{m}{2\pi} \int_{-(\pi/m-\alpha)}^{\pi/m+\alpha} U_m \cos \omega t d\omega t = \frac{m}{2\pi} U_m \left[ \sin\left(\frac{\pi}{m} + \alpha\right) + \sin\left(\frac{\pi}{m} - \alpha\right) \right] = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m U \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = U_{cp.max} \cos \alpha, \quad (2.4)$$

где 
$$U_{cp.max} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m U \sin \frac{\pi}{m}. \quad (2.5)$$

Рассмотрим работу управляемых выпрямителей при  $\alpha \geq 90^\circ$ . Во всех схемах при  $\alpha = 90^\circ$  и достаточной индуктивности в цепи нагрузки

$U_{cp} = 0$  (рис. 2.5). При  $90^0 < \alpha < 180^0$  в соответствии с (2.4) это напряжение должно изменить знак.

Отрицательное напряжение  $U_{cp}$  не в состоянии создать ток в нагрузке, так как вентили им запираются. Вот почему на характеристике рис. 2.5 этот участок совпадает с осью абсцисс.

Положение меняется, если нагрузка имеет собственный источник ЭДС. Если ЭДС имеет полярность, совпадающую с выходным напряжением УВ, то на участке  $90^0 < \alpha < 180^0$  ток принимает значение

$$I_{cp} = \frac{E - U_{cp}}{R_H}, \quad (2.6)$$

то есть ток протекает под действием нагрузки, преодолевая напряжение  $U_{cp}$  выпрямителя.

При этом вентили остаются открытыми, так как ток в них течёт в проводящем направлении, а энергия передается от нагрузки в сеть.

Рассмотренные процессы в нагрузке с источником ЭДС относятся к установившемуся режиму работы. Подобная же картина может иметь место в переходном режиме и при отсутствии источника ЭДС, когда угол  $\alpha$  резко возрастет ( $U_{cp}$  уменьшится и может стать отрицательным).



Рис.2.9 Выходное напряжение УВ

Режим работы УВ, когда ток нагрузки протекает навстречу выпрямленному напряжению под действием ЭДС, называется инверторным. На рис. 2.9 показана зависимость относительного среднего напряжения на выходе УВ при наличии в цепи нагрузки индуктивности и ЭДС. В этом случае при  $90^0 < \alpha < 180^0$  УВ работает в инверторном режиме, возвращая энергию нагрузки в сеть.

В электроприводе постоянного тока обычно применяются реверсивные управляемые выпрямители (рис. 2.10), состоящие из двух УВ, соединенных встречно - параллельно нагрузке.

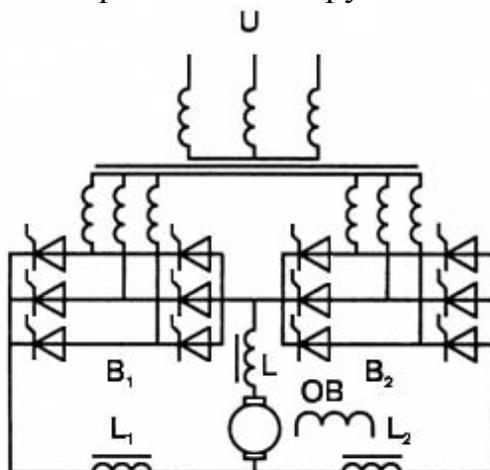


Рис 2.10 Реверсивный УВ

В этом случае один управляемый выпрямитель работает в режиме выпрямителя, а другой в режиме инвертора. Момент на валу двигателя определяется средним током на выходе УВ. Поэтому в первом приближении УВ можно считать непрерывным регулируемым источником напряжения. Среднее напряжение этого источника определяется выражением (2.4), а внутреннее сопротивление этого источника определяется из уравнения [5]

$$R_{\text{ув}} = \sqrt{(mfL_{\phi})^2 + (R_{\phi})^2}, \quad (2.7)$$

где  $f$  — частота сети,  $L_{\phi}, R_{\phi}$  — индуктивность и активное

сопротивление фазной обмотки трансформатора в цепи питания УВ.

Динамические характеристики УВ, при его представлении непрерывным звеном, представляются апериодическим звеном с постоянной времени  $\tau_{\text{ув}}$

$$\tau_{\text{ув}} = \frac{2\pi}{m\omega} = \frac{1}{mf}. \quad (2.8)$$

Регулировочная и механические характеристики системы «УВ-машина постоянного тока» показаны на рис. 2.11 применительно к схеме (рис. 2.10). Существует два способа управления вентильными группами В1 и В2 — совместное и раздельное. При совместном управлении целесообразно линейное согласование углов управления  $\alpha_1 + \alpha_2 = \pi$ . При этом необходимо ограничить минимальное значение углов управления. Регулировочная и механические характеристики для случая со-

вместного управления показаны на рис. 2.11 а, б. Недостатком совместного управления является протекание уравнивающих токов между вентиляльными группами В1 и В2. Для уменьшения этих токов в схему включаются дополнительные индуктивности L1 и L2 (рис. 2.10). При раздельном управлении импульсы подаются только на одну вентиляльную группу в зависимости от полярности входного сигнала. Раздельное управление исключает появление уравнивающих токов. Механические характеристики для этого случая показаны на рис. 2.11 в. Разрыв механических характеристик определяется появлением режима прерывистых токов при малых моментах.

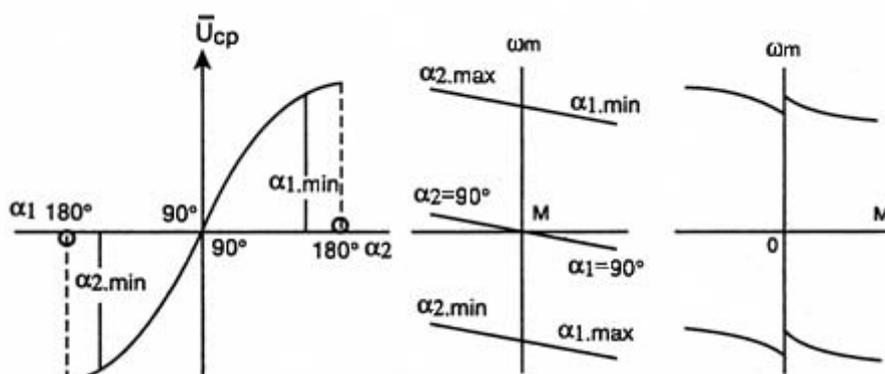


Рис. 2.11 Регулировочные и механические характеристики реверсивного ВВ

Энергетические характеристики управляемого выпрямителя, определяются следующими параметрами:

- средним выходным напряжением на холостом ходу, отнесенным к эффективному фазовому напряжению на входе ( $\frac{U_{cp}}{U_1}$ );

- количеством пульсаций выходного напряжения на периоде частоты сети ( $m$ );

- пульсацией выходного напряжения ( $\frac{U_{cp}}{U_{max}}$ );

- средним и эффективным током тиристора, отнесенным к среднему току нагрузки ( $\frac{I_{T,cp}}{I_H}, \frac{I_T}{I_H}$ );

- установленной мощностью трансформатора и полной потребляемой мощностью из сети, отнесенными к средней мощности в нагрузке:

$$\left( \frac{S_{тр}}{U_{cp} I_{cp}}, \frac{S_1}{U_{cp} I_{cp}} \right).$$

Эти параметры рассчитываются в предположении, что ток нагрузки идеально сглажен. В таблице 2.1 приведены выражения для расчета основных энергетических характеристик наиболее употребляемых схем управляемых выпрямителей [16].

Таблица 2.1

*Основных энергетических характеристик управляемых выпрямителей*

Схема УВ	$U_{cp}/U_1$	$U_{cp}/U_{max}$	$m$	$I_{Tcp}/I_H$	$I_T/I_H$	$S_{Tр}/U_{cp}I_{cp}$	$S_1/U_{cp}I_{cp}$
Трехфазная, двух-полупериодная	2,34	0,042	6	0,333	0,577	1,05	1,05
Трехфазная, одно-полупериодная	1,17	0,183	3	0,333	0,577	1,35	1,21
Однофазная, двух-полупериодная	0,9	0,482	2	0,5	0,707	1,11	1,11

Управляемый выпрямитель отрицательно влияет на питающую сеть переменного тока. Во-первых, он потребляет из сети несинусоидальный ток. Во-вторых, он сдвигает фазу потребляемого тока относительно питающего напряжения. Несинусоидальность тока может быть охарактеризована коэффициентом гармоник (THD — Total Harmonic Distorsion)

$$THD = \frac{\sqrt{I_1^2(2) + I_1^2(3) + I_1^2(n)}}{I_1(1)} = \frac{I_\Sigma}{I_1(1)}, \quad (2.9)$$

где  $I_1(l) \dots I_1(N)$  — эффективные значения тока первой и т. д. гармоник,  $I_\Sigma$  — эффективный ток всех высших гармоник.

Фазовый сдвиг зависит от угла управления управляемым выпрямителем и несинусоидальностью тока потребления. Поэтому коэффициент мощности УВ определяется следующим образом. Первую гармонику тока можно разложить на активную  $I_{1a}(l)$  и реактивную  $I_{1p}(l)$  составляющие. Если принять, что напряжение сети синусоидально, тогда отдельные составляющие мощности для трехфазных схем определяются следующими выражениями:

- полная мощность, потребляемая из сети  $S_1 = 3U_1I_1$  (2.10)

- полная мощность по первой гармонике  $S_1(1) = 3U_1I_1(1)$  (2.11)

- активная мощность по первой гармонике  $P_1(1) = 3U_1I_{1a}(1)$  (2.12)

- реактивная мощность по первой гармонике  $Q_1(1) = 3U_1I_{1p}(1)$  (2.13)

- мощность искажений  $D = 3U_1I_\Sigma$  (2.14)

Коэффициент мощности УВ определяется из выражения:

$$\lambda_{yb} = \frac{S_1(1)}{S_1} \cos \alpha. \quad (2.15)$$

### 2.3. 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 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].

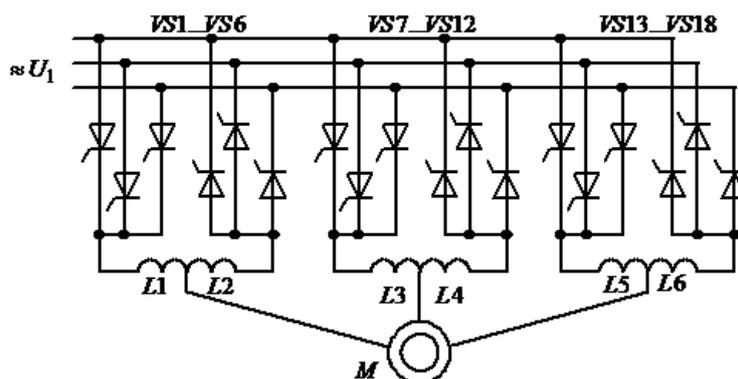


Рис. 2.12. Система непосредственный преобразователь частоты – асинхронный двигатель

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.

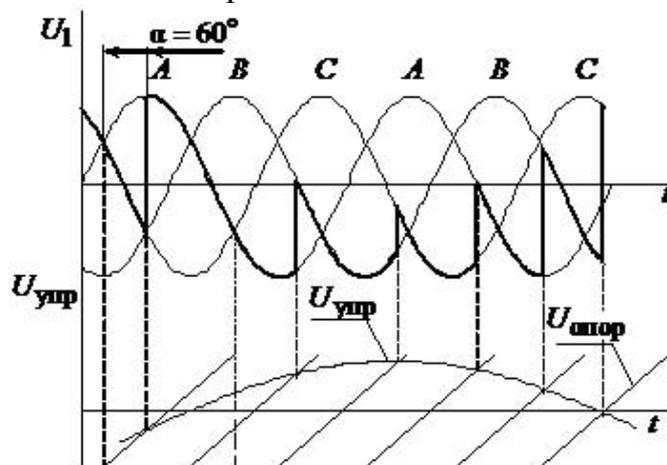


Рис. 2.13. Выходное однофазное напряжение непосредственного преобразователя частоты

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  $\alpha$ . 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.

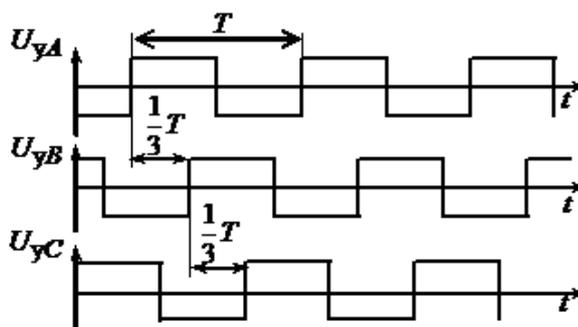


Рис. 2.14. Трехфазная система управляющих напряжений прямоугольной формы

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".

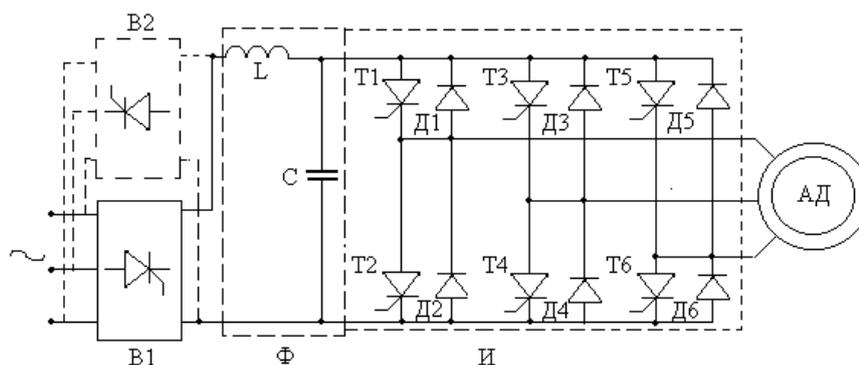


Рис. 2.15. Схема инвертора напряжений

Структура входных цепей и режим переключения тиристорov (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 энергии 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  $\omega_k$  (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  $\Phi$  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.

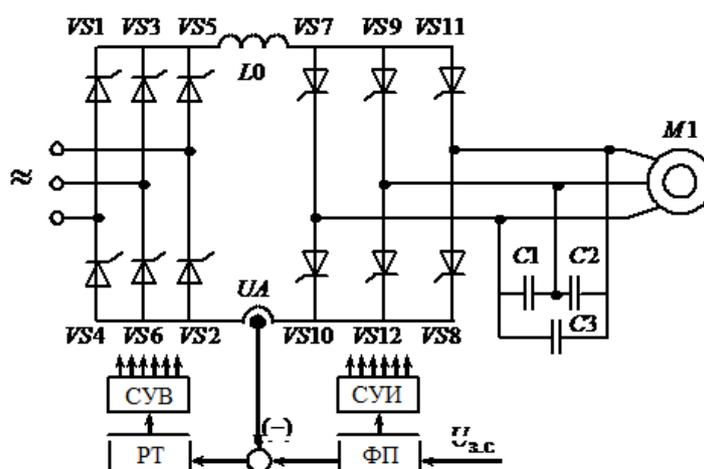


Рис. 2.16. Схема силовых цепей трехфазного мостового инвертора тока  
 СУВ – схема управления выпрямителем; РТ – регулятор тока;  
 СУИ – схема управления инвертором; ФП – функциональный преобразователь.

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  $120^\circ$  электрических градусов. Переключение производится с периодичностью  $60^\circ$  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.

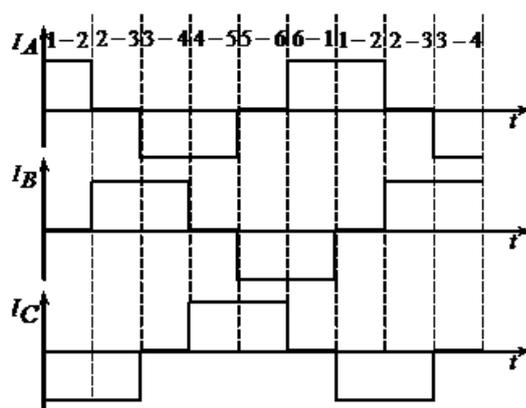


Рис. 2.17. Диаграммы токов для каждой из фаз инвертора

При переходе двигателя, питаемого от автономного инвертора тока, в генераторный режим изменяется направление противо-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

### 2.3.1. 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.

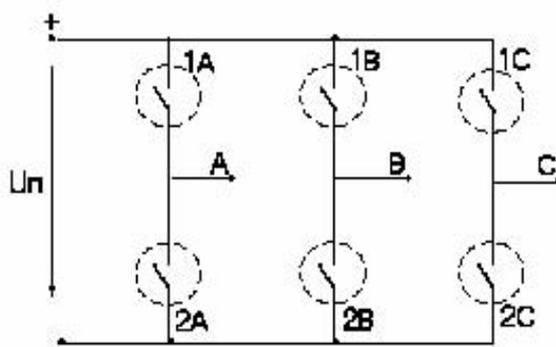


Рис. 2.18. Обобщенная схема замещения силовой части вентильного преобразователя

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  $180^\circ$ -й проводимостью (или  $\alpha=180^\circ$ ). В этом случае в течение  $1/6$  периода выходного напряжения включены три вентиляльных ключа: два нечетных и один четный или, наоборот, один нечетный и два четных. Цикл коммутации состоит из шести тактов, продолжительность каждого составляет  $60^\circ$ . Каждый ключ открыт в течение трех тактов или ( $180^\circ$ ). 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  $120^\circ$  и  $150^\circ$ -й проводимостью ключей.  $120^\circ$ -ный закон управления вентилями характеризуется открытым состоянием в любой момент времени двух ключей. Продолжительность одного такта при этом составляет  $60^\circ$ , а ключ открыт непрерывно в течение двух тактов, т. е.  $120^\circ$ . За счет ЭДС самоиндукции и наличия обратных диодов в силовой части инвертора во всех фазах двигателя протекает ток так же, как и при  $180^\circ$ -законе управления.

$150^\circ$ -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  $30^\circ$ , а поэтому ключ находится в открытом состоянии 5 тактов (т. е.  $150^\circ$ ).

Если принять за *базовый закон коммутации*  $180^\circ$ -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 ( $60^\circ$ -ной зоне) включены три ключа: один в анодной группе вентиляей, 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.

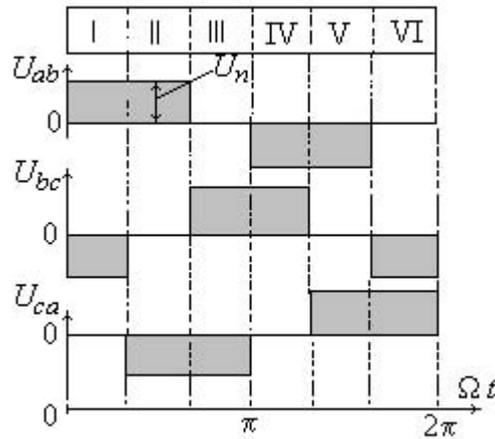


Рис. 2.20. Графики линейных напряжений

Тогда можно записать следующие соотношения между напряжениями на выходе и входе инвертора:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= F_{ab} \cdot U_{\Pi}; \\ U_{bc} &= F_{bc} \cdot U_{\Pi}; \\ U_{ca} &= F_{ca} \cdot U_{\Pi}; \end{aligned} \quad (2.17)$$

где  $F_{ab}$ ,  $F_{bc}$ ,  $F_{ca}$  – коммутационные функции линейных напряжений, представляющие собой прямоугольники единичной амплитуды в моменты, когда проводят противоположные ключи соответствующих фаз; и нулевые участки, когда проводят однополярные ключи.

График же линейного напряжения, например  $u_{\text{л}}(\vartheta)$ , описывается выражением 2.18., где  $\vartheta = \Omega t$  – время в угловых единицах, определяемых частотой  $\Omega$  выходного напряжения инвертора.

$$u_{\text{л}}(\vartheta) = u_{ab}(\vartheta) = \begin{cases} +U_{\Pi} & \text{при } 0 < \vartheta < 2\pi/3; \\ 0 & \text{при } 2\pi/3 < \vartheta < \pi; \\ -U_{\Pi} & \text{при } \pi < \vartheta < 5\pi/3; \\ 0 & \text{при } 5\pi/3 < \vartheta < 2\pi, \end{cases} \quad (2.18)$$

В случае соединения обмотки трехфазного двигателя в звезду, к фазе нагрузки прикладывается половина напряжения звена постоянного тока, так как для каждого состояния инвертора две фазы двигателя с помощью ключей соединены параллельно и подключены к источнику питания последовательно с третьей фазой. Поэтому соотношения между

выходными фазными напряжениями инвертора и напряжением на его входе можно записать в виде [21]

$$\begin{aligned} U_a &= F_a \cdot 1 / 2U_{\Pi}; \\ U_b &= F_b \cdot 1 / 2U_{\Pi}; \\ U_c &= F_c \cdot 1 / 2U_{\Pi}; \end{aligned} \quad (2.19)$$

где  $F_a, F_b, F_c$  – коммутационные функции фазных напряжений инвертора.

Графики напряжений на фазах нагрузки в этом случае имеют следующий вид рис. 2.21.

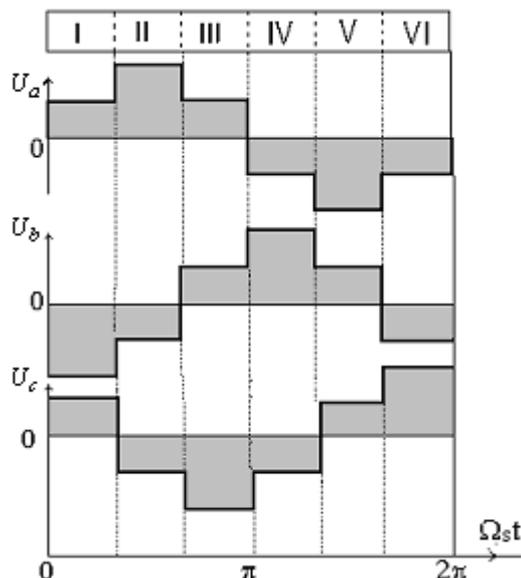


Рис. 2.21. Графики фазных напряжений

Они представляют собой знакопеременные импульсные функции, где одна треть величины напряжения приходится на каждую из параллельно включенных фаз и две трети – на последовательно включенную фазу. Происходит это потому, что токи в параллельно включенных фазах в два раза меньше, чем в последовательно включенной с ними фазе. Поэтому значение напряжения нагрузки, например на фазе А, можно определить следующим образом [25]:

$$u_{\phi}(\vartheta) = u_a(\vartheta) = \begin{cases} +\frac{1}{3}U_{\Pi} & \text{при } 0 < \vartheta < \pi/3; \\ +\frac{2}{3}U_{\Pi} & \text{при } \pi/3 < \vartheta < 2\pi/3; \\ +\frac{1}{3}U_{\Pi} & \text{при } 2\pi/3 < \vartheta < \pi; \end{cases} \quad (2.20)$$

Анализ графиков линейных и фазных напряжений на нагрузке (рис. 2.20. и 2.21.) показывает, что коммутационные функции этих напряжений представляют:

- $F_{ab}, F_{bc}, F_{ca}$  – прямоугольники единичной амплитуды в моменты, когда проводят противоположные ключи соответствующих фаз, и нулевые участки, когда проводят однополярные ключи;

- $F_a, F_b, F_c$  – единичные ступенчатые функции, которые в моменты переключения фаз нагрузки изменяют свои значения от  $-1/2$  до  $1/2$ , а при переключении противоположных ключей изменяют амплитуду импульса до  $2/3$  единицы.

При моделировании автономных инверторов коммутационные функции фазных напряжений при  $180^\circ$ -м управлении можно представить в виде [21]:

$$\begin{aligned}
 F_A(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin k\varphi; \\
 F_B(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin k\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right); \\
 F_C(\varphi) &= \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \sin k\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right);
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

где  $k = 2p + 1$  – коэффициент гармоники,  $p = 0, 1, 2, 3, 4$  и т. д. – натуральный ряд чисел.

Тогда коммутационные функции линейных напряжений можно определить как

$$F_{AB}(\varphi) = F_A(\varphi) - F_B(\varphi), \quad F_{BC}(\varphi) = F_B(\varphi) - F_C(\varphi), \quad F_{CA}(\varphi) = F_C(\varphi) - F_A(\varphi). \tag{2.22}$$

Временные графики линейных и фазных напряжений автономного инвертора несинусоидальные, поэтому их можно представить в виде суммы гармонических составляющих, не содержащих гармоник, кратных двум и трем [25].

### **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 парама. 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.

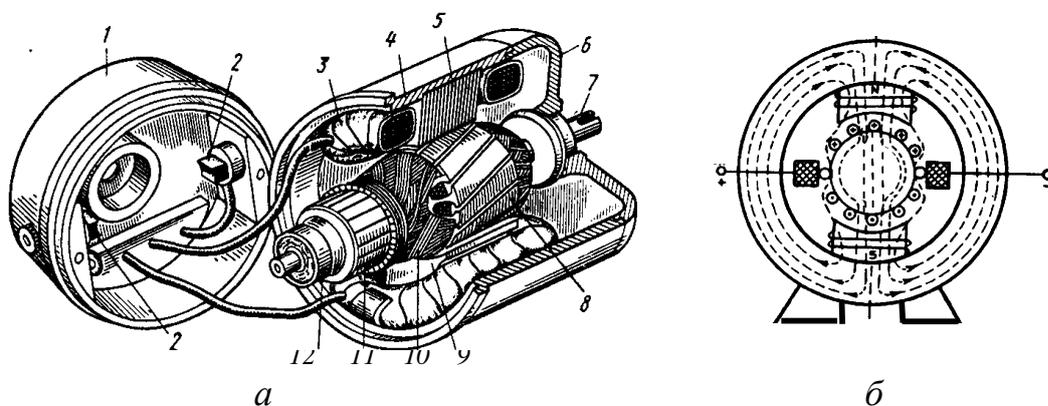


Рис. 3.1. Внешний вид конструкции и схематическое устройство двигателя постоянного тока

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.

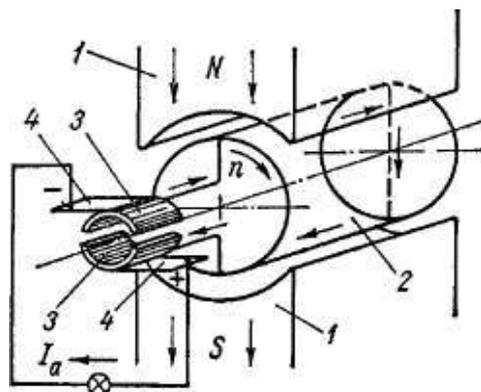


Рис. 3.2. Устройство простейшей машины постоянного тока

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 (ядро 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 ядро снова к северному полюсу. Сердечники полюсов и ядро 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,  $\Phi$  – 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]:

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

где  $D_a$  – диаметр якоря,  $I_a$  – ток в проводнике обмотки якоря,  $F_{\text{пр}} = B l I_a$  – 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

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

где  $c_m = \frac{pz}{2\pi a}$  – коэффициент момента, зависящий от конструктивных данных машины,  $I_{\text{я}}$  – 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  $I_{\text{я}}$  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. Определение параметров двигателя постоянного тока

При аналитических расчетах электроприводов постоянного тока и при составлении их математических моделей необходимо знать параметры двигателей постоянного тока. Рассмотрим расчет параметров двигателей постоянного тока по каталожным и номинальным данным [1, 15, 18, 24].

В каталогах на двигатели постоянного тока приводятся следующие технические данные:

$P_n$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_n$  – номинальное напряжение обмотки якоря, В;

$I_{ян}$  – номинальный ток обмотки якоря двигателя, А;

$R_{оя}$  – сопротивление обмотки якоря двигателя при 15°С, Ом;

$R_{дп}$  – сопротивление дополнительных полюсов двигателя при 15°С, Ом;

$R_{ко}$  – сопротивление компенсационной обмотки двигателя при 15°С, Ом;

$L_{дв}$  – индуктивность обмотки якоря двигателя, Гн;

$\eta_{дв.н}$  – номинальный коэффициент полезного действия, %;

$n_{дв.н}$  – номинальная частота вращения, об/мин;

$J_{дв}$  – момент инерции якоря, кг·м<sup>2</sup>.

В тех случаях, когда в каталогах необходимые параметры двигателя не приводятся, их можно определить по следующим формулам:

Номинальный ток двигателя

$$I_{ян} = \frac{P_n}{\eta_{дв.н} \cdot U_n}. \quad (3.5)$$

Номинальная угловая скорость

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_{дв.н}}{30}. \quad (3.6)$$

Сопротивления двигателя приводятся в каталогах при температуре  $15^{\circ}\text{C}$ . В нагретом состоянии при рабочей температуре сопротивление двигателя

$$R_{\text{дв.гор}} = [1 + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1)] \cdot (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}), \quad (3.7)$$

где  $\alpha = 0,0039 \div 0,0041$  - температурный коэффициент сопротивления меди (обычно принимается  $\alpha = 0,004$ );  $\theta_2$  - рабочая температура обмотки машины;  $\theta_1$  - температура, при которой указываются сопротивления в каталогах.

При температуре  $\theta_2$  равной  $75^{\circ}\text{C}$  и  $\theta_1$  равной  $15^{\circ}\text{C}$ , при  $\alpha = 0,004$

$$R_{\text{дв.гор}} = 1,24 \cdot (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}). \quad (3.8)$$

Если в каталогах сопротивление двигателя не приведено, то его ориентировочно определяют, принимая, что половина всех потерь в двигателе при номинальной нагрузке связана с потерями в меди якоря [24, 48]. Определенное таким образом сопротивление соответствует нагретому двигателю

$$R_{\text{дв.гор}} = (R_{\text{оя}} + R_{\text{дп}} + R_{\text{ко}}) = 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{дв.н}}/100) \cdot U_{\text{н}}/I_{\text{ян}}. \quad (3.9)$$

Индуктивность цепи обмотки якоря двигателя [4,17]

$$L_{\text{дв}} = k_l \frac{U_{\text{н}}}{2 \cdot p \cdot n_{\text{дв.н}} \cdot I_{\text{ян}}}, \quad (3.10)$$

где  $p$  - число пар полюсов двигателя;  $k_l = 6 - 8$  для быстроходных некомпенсированных машин;  $k_l = 8 - 12$  для нормальных некомпенсированных машин;  $k_l = 5 - 6$  для компенсированных машин.

Коэффициент связи ЭДС и электромагнитного момента при номинальном потоке возбуждения

$$c = \frac{U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{дв.гор}}}{\omega_{\text{н}}}, \quad (3.11)$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{н}} = c \cdot I_{\text{дв.н}} \quad (3.12)$$

Номинальный момент двигателя на валу

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{1000 \cdot P_{\text{н}}}{\omega_{\text{н}}} \quad (3.13)$$

Электромеханическая постоянная времени двигателя

$$T_{\text{М}} = \frac{J_{\text{дв}} R_{\text{оя}} \omega_{\text{н}}^2}{(U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} R_{\text{оя}})^2} \quad \text{или} \quad T_{\text{М}} = \frac{J_{\text{дв}} R_{\text{я}} \omega_{\text{н}}^2 I_{\text{я}}^2}{P_{\text{н}}^2}$$

Двигательный режим работы электрических машин постоянного тока характеризуется двумя характерными точками:

- скоростью двигателя, соответствующей нулевому току якоря, называемую *угловой скоростью идеального холостого хода* при допущении  $U_H = E$ :

$$\omega_0 = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} = \frac{U}{c}. \quad (3.14)$$

- вторая точка соответствует скорости двигателя равной нулю т. е. при *токе короткого замыкания обмотки якоря двигателя*

$$I_{кз} = \frac{U_H}{R_{яц}}. \quad (3.15)$$

Допустимый пусковой ток обмотки якоря не должен превышать четырехкратной величины

$$I_{доп} = 4 \cdot I_{ян} \quad (3.16)$$

Пусковой момент двигателя можно определить по выражению

$$M_{п} = c \cdot I_{кз} \quad (3.17)$$

### 3.3. Схемы включения и характеристики двигателей постоянного тока

Схемы включения двигателей постоянного тока в систему электропривода и их характеристики определяются в первую очередь типом двигателей, которые в зависимости от способа возбуждения магнитного потока подразделяются на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения рис. 3.3 [15, 22, 24].

Где  $I_B$ ,  $I_я$ ,  $I_a$  – соответственно ток в обмотке возбуждения (ОВ), ток в обмотке якоря (ОЯ), ток потребляемый двигателем постоянного тока,  $E = c_e \omega_H \Phi_H$  – установившееся значение ЭДС обмотки якоря при номинальной угловой скорости якоря и номинальном значении магнитного потока,  $U_H$ ,  $U_B$  – номинальные значения напряжений, подводимых от соответствующих источников питания к обмотке якоря (ОЯ) и к обмотке возбуждения (ОВ).

На рис. 3.3, а схематически показан двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Систему уравнений, с помощью которой описываются электромагнитные и электромеханические процессы в этом двигателе, можно представить в виде [12, 15, 24]:

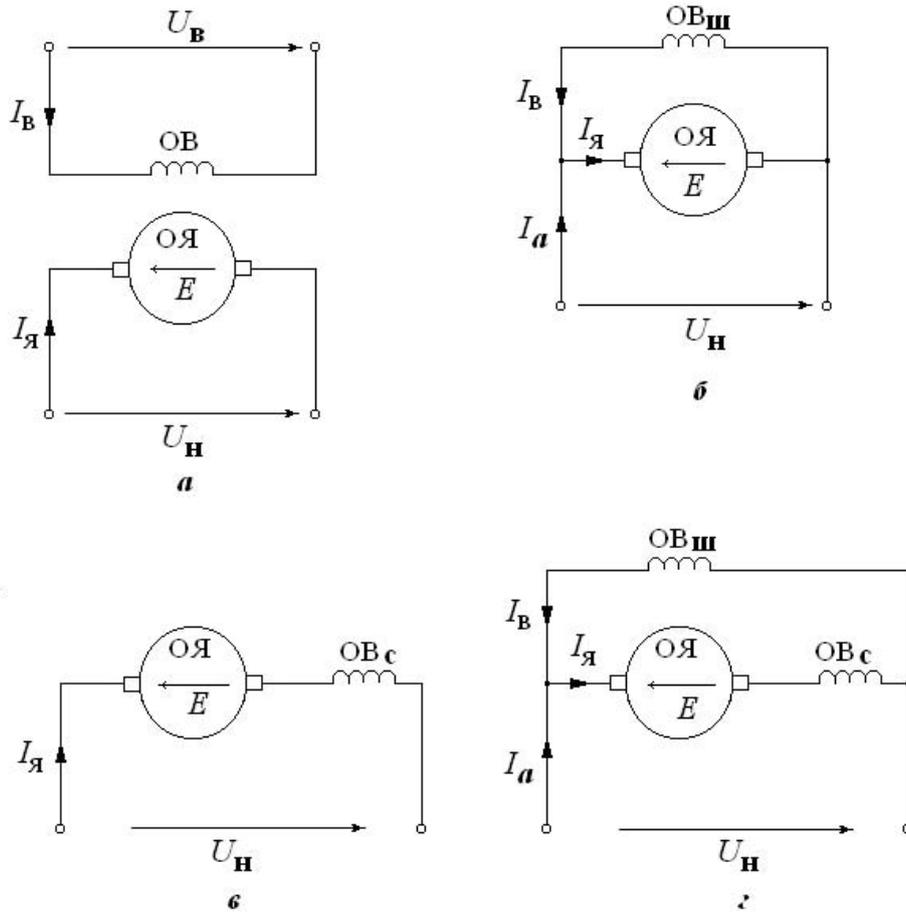


Рис. 3.3. Схемы соединения обмоток возбуждения и якоря двигателей постоянного тока

$$\begin{aligned}
 u_B &= L_B \frac{di_B}{dt} + R_B i_B, \\
 u_я &= L_я \frac{di_я}{dt} + R_я i_я + e_я, \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_{\text{нп}}, \\
 \Phi_B &= k_\Phi i_B, \\
 e_я &= c_E \omega \Phi_B, \\
 M &= c_M i_я \Phi_B.
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

где  $L_B$ ,  $L_я$  – индуктивности обмоток ОВ и ОЯ,  $R_B$ ,  $R_я$  – сопротивления обмоток ОВ и ОЯ соответственно,  $M$ ,  $M_{\text{нп}}$  – электромагнитный момент, развиваемый двигателем, полный момент сопротивления на-

грузки, приведенный к валу двигателя, коэффициенты  $k_\Phi$ ,  $c_E$ ,  $c_M$  являются конструктивными постоянными.

Ток в обмотке якоря двигателя независимого возбуждения является током, потребляемым двигателем от источника питания.

На рис. 3.3, б схематически показан двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Систему уравнений, с помощью которой описываются электромагнитные и электромеханические процессы в этом двигателе, можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{я}} &= L_{\text{В}} \frac{di_{\text{В}}}{dt} + R_{\text{В}} i_{\text{В}}, \\
 u_{\text{я}} &= L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + e_{\text{я}}, \\
 J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_{\text{нп}}, \\
 \Phi_{\text{В}} &= k_\Phi i_{\text{В}}, \\
 e_{\text{я}} &= c_E \omega \Phi_{\text{В}}, \\
 M &= c_M i_{\text{я}} \Phi_{\text{В}}.
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

При этом следует отметить, что к параллельной (шунтовой) обмотке возбуждения (ОВ<sub>ш</sub>) и обмотке якоря (ОЯ) подведено от источника питания напряжение  $u_{\text{я}}$ .

Ток, потребляемый от источника питания  $i_a$ , имеет две составляющие – это ток обмотки якоря  $i_{\text{я}}$  и ток в обмотке ОВ<sub>ш</sub>  $i_{\text{В}}$ . В установившемся режиме работы двигателя при номинальной нагрузке ток  $I_{\text{В}} = 2 \div 5\% I_{\text{ян}}$ . Поэтому делают допущение при анализе установившегося режима работы двигателя, что  $I_a = I_{\text{я}}$ .

На рис. 3.3, б схематически показан двигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Систему уравнений, с помощью которой описываются электромагнитные и электромеханические процессы в этом двигателе, можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
u_{\text{я}} &= (L_{\text{я}} + L_{\text{В}}) \frac{di_{\text{я}}}{dt} + (R_{\text{я}} + R_{\text{В}})i_{\text{я}} + e_{\text{я}}, \\
J \frac{d\omega}{dt} &= M - M_{\text{НП}}, \\
\Phi_{\text{В}} &= k_{\Phi} i_{\text{я}}, \\
e_{\text{я}} &= c_{\text{Е}} \omega \Phi_{\text{В}}, \\
M &= c_{\text{М}} i_{\text{я}} \Phi_{\text{В}}.
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Особенность двигателя последовательного возбуждения – это ток обмотки якоря, ток обмотки возбуждения и потребляемый от источника ток один и тоже ток.

При анализе электромагнитных и электромеханических процессов в двигателе постоянного тока в установившемся режиме работы пользуются обычно следующей системой уравнений, которую можно получить для любого типа двигателя постоянного тока из соответствующих систем уравнений (3.18, 3.19, 3.20)

$$\begin{aligned}
U &= E + IR; \\
E &= k\Phi\omega; \\
M &= k\Phi I,
\end{aligned} \tag{3.21}$$

где  $R = R_{\text{я}} + R_{\text{д}}$  – полное сопротивление цепи якоря, Ом;  $\Phi$  – магнитный поток, Вб;  $U$  – подводимое к якорю напряжение, В;  $c_{\text{Е}} \approx c_{\text{М}} = k = pN / 2\pi a$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $p$  – число пар полюсов;  $N$  – число активных проводников обмотки якоря;  $a$  – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Качество работы электропривода постоянного тока в установившемся режиме и его производительность полностью определяют *электромеханические и механические* характеристики двигателя.

Уравнения данных характеристик получают из решения системы уравнений (3.21)

*Электромеханической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость его угловой скорости  $\omega$  от тока якоря двигателя  $I$ :

$$\omega = \frac{U}{c_{\text{Е}} \cdot \Phi} - I \frac{R}{c_{\text{Е}} \cdot \Phi}. \tag{3.22}$$

Независимо от типа двигателя постоянного тока его *механическая характеристика (внешняя характеристика)* представляет собой функциональную зависимость угловой скорости якоря  $\omega$  от момента  $M$ :

$$\omega = \frac{U}{c_E \cdot \Phi_B} - \frac{R}{c_E^2 \cdot \Phi_B^2} \cdot M . \quad (3.23)$$

При этом выделяют естественные и искусственные характеристики двигателей.

*Естественной механической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости двигателя  $\omega$  от момента его  $M$ , полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. *Все остальные характеристики называют искусственными.* С помощью искусственных характеристик можно оценить возможности регулирования скорости двигателей постоянного тока.

На рис. 3.4 представлены естественные электромеханические и механические характеристики для двигателей схемы, которых приведены на рис. 3.3. Вид естественных электромеханических и механических характеристик зависит от схемы соединения обмоток возбуждения и якоря между собой и влияния реакции якоря машин постоянного тока.

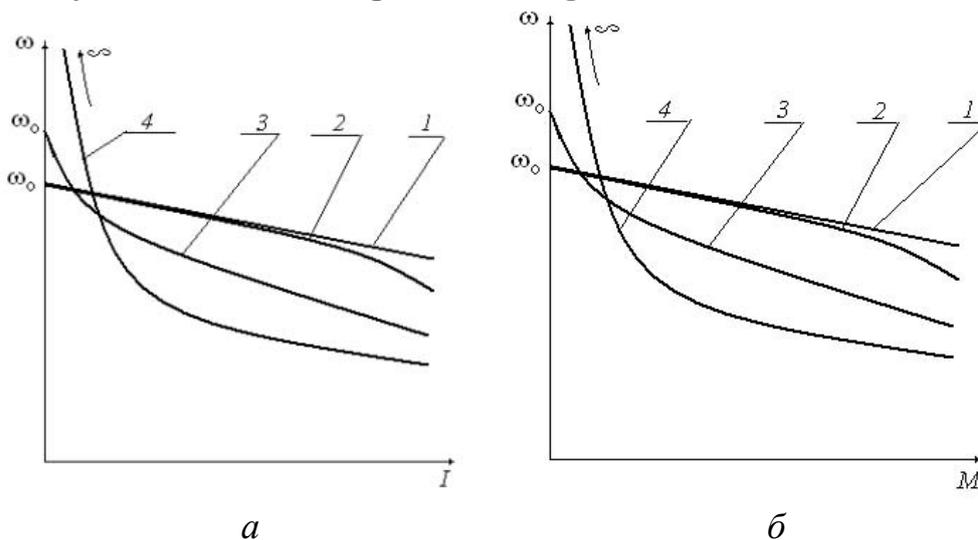


Рис. 3.4. Естественные электромеханические **а** и механические **б** характеристики

1. характеристики двигателя независимого возбуждения;
2. характеристики двигателя параллельного возбуждения;
3. характеристики двигателя смешанного возбуждения;
4. характеристики двигателя последовательного возбуждения;

В соответствии естественным и искусственным электромеханическими и механическими характеристикам двигателей последовательного возбуждения при полном отсутствии нагрузки двигатель может

«пойти в разнос» ( $M \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty$ ). Это объясняется тем, что ток нагрузки двигателя  $I$  является током обмотки возбуждения.

Двигатель смешанного возбуждения имеет за счет параллельной обмотки возбуждения точку идеального холостого хода ( $\omega_0$ ) [15].

### 3.4. Регулирование скорости двигателей постоянного тока

Выражения для электромеханической и механической характеристик (3.22, 3.23) указывают на принципиальные возможности регулирования скорости двигателей постоянного тока (ДПТ) независимо от их типа. Эти возможности сводятся к изменению суммарного потока возбуждения  $\Phi$ , подводимого к якорной цепи, напряжения  $U$  и изменением добавочного активного сопротивления  $R_d$  в цепи обмотки якоря двигателя [1, 5, 22, 23].

*Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения*

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения с помощью резисторов в цепи обмотки якоря осуществляется по следующей схеме рис.3.5.

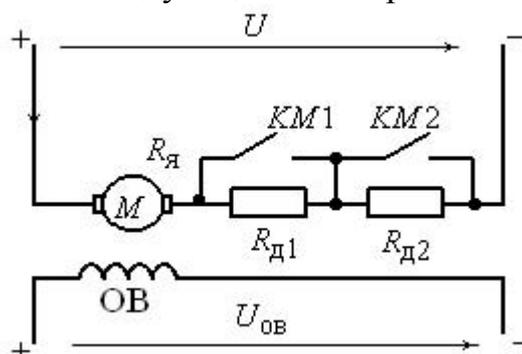


Рис. 3.5. Схема силовых цепей двигателя при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря

Искусственные электромеханические характеристики при данном способе регулирования относительно базовой естественной характеристики приведены на рис. 3.6.

Скорость идеального холостого хода не зависит от добавочного сопротивления якорной цепи и для данного способа регулирования скорости остается постоянной. Следовательно, все искусственные электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения выходят на оси ординат из одной точки с координатами  $I = 0; \omega_0$ .

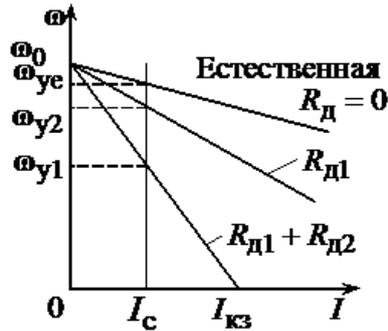


Рис. 3.6. Реостатные характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

При скорости равной нулю  $\omega = 0$  по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = \frac{U}{R_{я} + R_{д}}$ . Ток короткого замыкания

обратно пропорционален сопротивлению цепи обмотки якоря и уменьшается с увеличением этого сопротивления. Этим свойством пользуются для ограничения бросков тока якоря при пусках двигателя независимого возбуждения в релейно-контакторных схемах управления.

Реостатное регулирование скорости, как правило, *ступенчатое* и только с двигателями малой мощности возможно плавное регулирование скорости при включении в цепь якоря двигателя переменного реостата. Регулирование скорости производится под нагрузкой. Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{уст}$  под нагрузкой  $I_a$  уменьшаются с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря. Диапазон регулирования скорости при номинальной нагрузке  $D = 1 : (3 \div 4)$ . Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях цепи обмотки якоря.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря возможно в том случае, когда обмотка якоря питается от отдельного преобразователя (П) рис. 3.7.

Преобразователь может иметь любую физическую природу, то есть может быть электромашинным, электромагнитным, полупроводниковым выходные напряжения и токи, которых изменяются в соответствии с требованиями технологического процесса [14, 15, 16, 17, 20, 21]. Как любой источник питания преобразователь характеризуют ЭДС  $E_{П}$ , внутреннее сопротивление  $R_{П}$ , коэффициент передачи (коэффициент усиления)  $k_{П}$ .

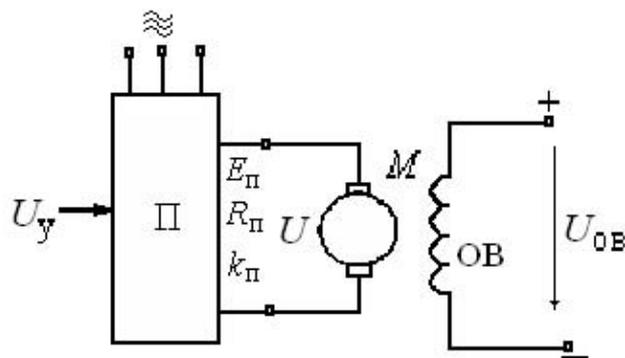


Рис. 3.7. Схема силовых цепей двигателя при регулировании скорости изменением напряжения в цепи обмотки якоря

Обмотка возбуждения (ОВ) двигателя питается от отдельного источника постоянного напряжения  $U_{0B}$  и создает номинальный поток  $\Phi_H$ . Напряжение на выходе преобразователя определяется уравнением:

$$U_{\Pi} = E_{\Pi} - I \cdot R_{\Pi}, \quad (3.24)$$

где  $E_{\Pi}$  – ЭДС преобразователя, В;  $R_{\Pi}$  – внутреннее сопротивление преобразователя, Ом.

Так как обмотка якоря двигателя включена непосредственно на выход преобразователя, то напряжение на обмотке якоря равно напряжению на выходе преобразователя:

$$U = U_{\Pi}, \quad (3.25)$$

где напряжение  $U$  в свою очередь можно выразить через ЭДС двигателя и падение напряжения на обмотке якоря при  $R_d = 0$  и записать в виде:

$$U = k \cdot \Phi_H \cdot \omega + I \cdot R_{я}. \quad (3.26)$$

Тогда получим следующее равенство

$$E_{\Pi} - I \cdot R_{\Pi} = k \cdot \Phi_H \cdot \omega + I \cdot R_{я},$$

решив которое относительно  $\omega$  получим уравнение электромеханической характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения, работающего в системе преобразователь – двигатель:

$$\omega = \frac{E_{\Pi}}{k \cdot \Phi_H} - I \frac{R_{я} + R_{\Pi}}{k \cdot \Phi_H}. \quad (3.25)$$

Электромеханические характеристики для данного способа регулирования ДПТ с независимым возбуждением приведены на рис. 3.8.

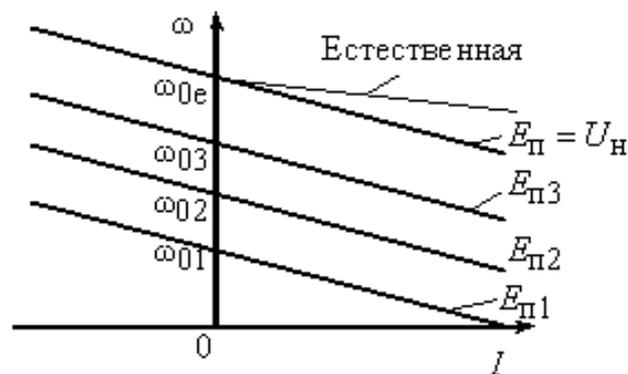


Рис. 3.8. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения

Анализ характеристик показывает, что скорость идеального холостого хода  $\omega_0 = \frac{E_{\Pi}}{k \cdot \Phi_H}$  изменяется пропорционально ЭДС преобразователя  $E_{\Pi}$ , а жесткость характеристик уменьшается по отношению к естественной характеристике, так как коэффициент  $\frac{R_{я} + R_{\Pi}}{k \cdot \Phi_{\Pi}}$  при аргументе  $I$  увеличивается из-за добавочного сопротивления преобразователя  $R_{\Pi}$ .

Электромеханические и механические характеристики в относительных единицах совпадают.

Электромеханические характеристики параллельны друг другу, большему ЭДС преобразователя соответствует большая скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ .

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря плавное, коэффициент плавности  $\varphi_{пл} \rightarrow 1$ .

Диапазон регулирования скорости в замкнутых системах регулирования  $D = 1:10000$  и более.

Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  снижаются с уменьшением напряжения обмотки якоря.

Погрешность регулирования скорости возрастает с уменьшением напряжения обмотки якоря и на нижних регулировочных характеристиках может достигать  $0,3 \div 0,4$  относительных единиц.

Регулирование скорости производится с высоким КПД, достигающим значений  $0,9 \div 0,95$  в электроприводах с транзисторными и тиристорными силовыми преобразователями.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения осуществляется в маломощной цепи обмотки возбуждения, что облегчает и удешевляет аппаратуру управления. При использовании данного способа регулирования поток обмотки возбуждения необходимо уменьшать, так как номинальный поток  $\Phi_n$  создаваемый обмоткой возбуждения близок к потоку насыщения магнитной цепи электродвигателя. Поэтому увеличение тока намагничивания в обмотке не приводит к увеличению потока, а рост напряжения на обмотке возбуждения выше номинального может привести к пробое изоляции обмотки.

Схема силовых цепей электропривода при регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения приведена на рис. 3.9

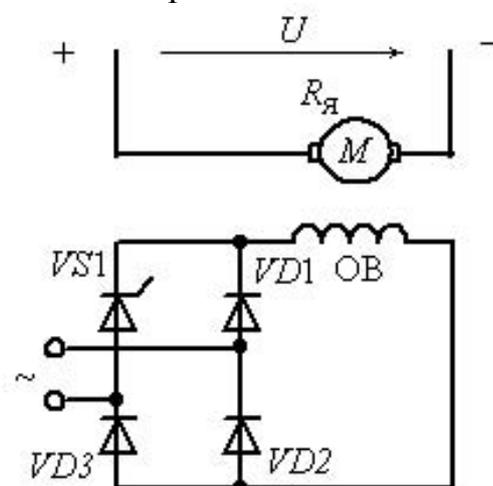


Рис. 3.9. Схема силовых цепей электропривода при регулировании скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения

Обмотка якоря двигателя  $M$  питается от отдельного источника напряжения  $U$ . Обмотка возбуждения  $OB$  двигателя подключена к полупроводниковому выпрямителю, состоящему из диодов  $VD1...VD3$  и тиристора  $VS1$ . Такая схема регулирования напряжения обмотки возбуждения применяется для двигателей мощностью до 100 кВт.

Искусственные электромеханические и механические характеристики при данном способе регулирования приведены на рис. 3.10.

Для искусственных электромеханических характеристик (рис.3.10, а) относительно базисной естественной электромеханической характеристики можно выделить две характерные точки. Это скорость идеального холостого хода  $\omega_0$  и ток короткого замыкания  $I_{кз}$ .

Скорость идеального холостого хода обратно пропорциональна потоку возбуждения:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi} \equiv \frac{1}{\Phi}.$$

Таким образом, с уменьшением потока возбуждения скорость идеального холостого хода будет увеличиваться.

Ток короткого замыкания при скорости равной нулю остается постоянным:

$$I_{кз} = \frac{U}{R_{я}}.$$

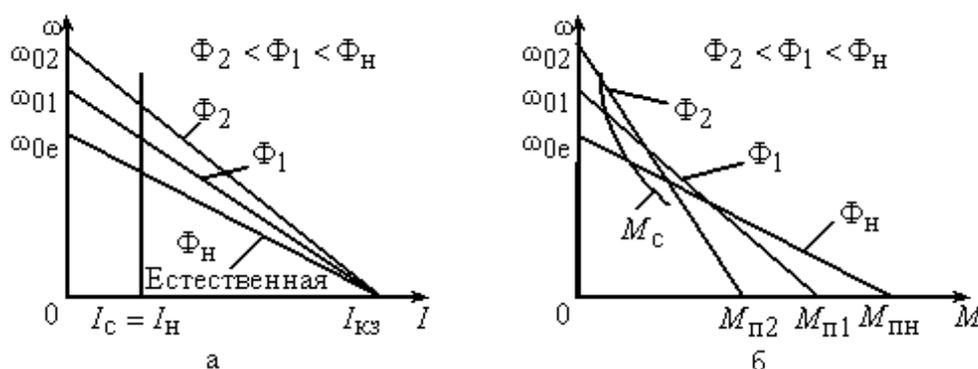


Рис. 3.10. Характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения при регулировании скорости изменением потока возбуждения: а – электромеханические; б – механические

Пусковой момент двигателя, определяемый по выражению

$$M_{п} = k \cdot \Phi \cdot I_{кз}$$

будет уменьшаться с уменьшением потока возбуждения.

Искусственные механические характеристики приведены на рис. 3.10,а. Там же отмечены точки установившейся работы при номинальном токе якоря. Регулирование скорости идет *вверх* от естественной характеристики с постоянной мощностью на валу двигателя. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  увеличиваются с уменьшением напряжения на обмотке возбуждения. Регулирование скорости плавное, коэффициент плавности  $\phi_{пл} \rightarrow 1$ . Диапазон регулирования скорости небольшой  $D = 1,3:1$ .

Регулирование скорости производится с высоким КПД, так как потребление энергии при регулировании скорости уменьшается за счет снижения напряжения на обмотке возбуждения.

*Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения*

В общем случае схема силовой цепи двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведена на рис. 3.11.

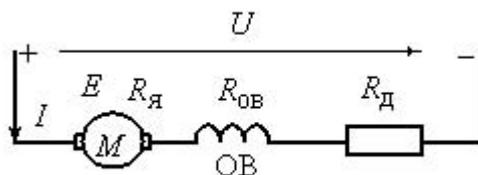


Рис. 3.11. Схема силовой цепи двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Уравнение электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения, так же как и для двигателя независимого возбуждения определяется выражением:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi},$$

где  $R_{яц} = R_{дв} + R_{ов} + R_{я}$  – сопротивление цепи обмотки якоря, состоящее из сопротивления обмотки якоря, дополнительных полюсов, обмотки возбуждения и добавочного сопротивления цепи обмотки якоря.

При изменении нагрузки на валу двигателя угловая скорость будет изменяться, как за счет падения напряжения на сопротивлениях якорной цепи, так и за счет увеличения потока возбуждения  $\Phi$ . У двигателя постоянного тока последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, поэтому ток обмотки якоря является одновременно и током обмотки возбуждения. Зависимость потока возбуждения от тока возбуждения двигателя представлена универсальной кривой намагничивания на рис. 3.12, зависимость 1.

Кривая намагничивания не имеет точного аналитического выражения и в расчетах обычно ее аппроксимируют отрезками прямых. Как вариант, на рис. 22 кривая намагничивания аппроксимирована двумя прямыми отрезками 2:

$$\Phi = k_H \cdot I \quad \text{при } 0 < I < I_H \quad (3.26)$$

$$\Phi = \Phi_1 \quad \text{при } I > I_H, \quad (3.27)$$

где  $k_H$  – коэффициент пропорциональности между током и потоком кривой намагничивания;  $\Phi_1$  – поток насыщения кривой намагничивания двигателя.

Подставим (3.26) в (3.27), получим уравнение электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения при линейной зависимости потока возбуждения от тока якоря

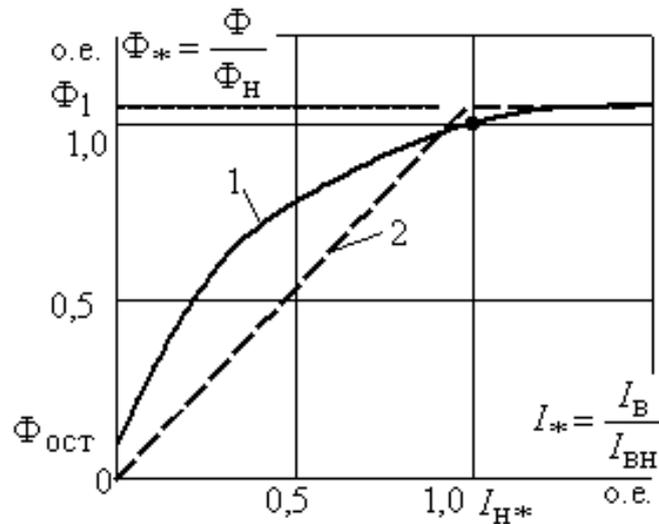


Рис.3.12. Универсальная кривая намагничивания двигателя постоянного тока

$$\omega = \frac{U}{k \cdot k_H \cdot I} - \frac{R_{яц}}{k \cdot k_H}. \quad (3.28)$$

Данная зависимость (3.28) носит гиперболический характер.

При токах якоря двигателя больших номинального тока при принятом законе аппроксимации поток двигателя стабилизируется и становится равным  $\Phi_1$ . На этом участке работы электродвигателя его электромеханическая характеристика описывается уравнением:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi_1}. \quad (3.29)$$

Это уравнение является уравнением прямой линии. Поэтому при больших нагрузках зависимость между угловой скоростью двигателя и током обмотки якоря линейная.

Электромагнитный момент двигателя постоянного тока определяется зависимостью

$$M = k \cdot \Phi \cdot I, \quad (3.30)$$

Подставив в (3.30) выражение для потока (3.26), и решив полученное уравнение относительно тока якоря  $I$ , будем иметь:

$$I = \sqrt{\frac{M}{k \cdot k_H}}. \quad (3.31)$$

Совместное решение (3.28) и (3.29) позволяет получить уравнение механической характеристики двигателя последовательного возбуждения при малых нагрузках на валу двигателя:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{k \cdot k_H} \cdot \sqrt{M}} - \frac{R_{яц}}{k \cdot k_H}. \quad (3.32)$$

При больших нагрузках, когда поток ограничивается на уровне  $\Phi_1$ , механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения определяется выражением:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - M \frac{R_{яц}}{(k \cdot \Phi_1)^2} \quad (3.33)$$

Анализ уравнений электромеханических и механических характеристик, показывает, что они носят гиперболический характер при малых нагрузках.

Особенность электромеханической и механической характеристик двигателя последовательного возбуждения является то, что

- они нелинейные при малых нагрузках и становятся практически линейными при нагрузках больших, чем номинальная нагрузка;
- теоретически они не имеют скорости идеального холостого хода. На практике за счет остаточного потока намагничивания  $\Phi_{ост}$  скорость идеального холостого хода существует и определяется уравнением:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_{ост}}, \quad (3.34)$$

однако она достаточно велика, поэтому двигатели последовательного возбуждения нельзя включать без нагрузки во избежание их разрушения от центробежных сил.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения с помощью резисторов в цепи обмотки якоря

Схема силовых цепей двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря приведена на рис. 3.13

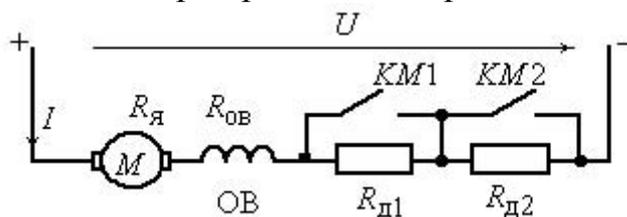


Рис. 3.13. Схема силовых цепей двигателя при регулировании скорости изменением сопротивления в цепи обмотки якоря

Схема содержит обмотку якоря двигателя  $M$ , обмотку возбуждения  $OB$  и два последовательно включенных добавочных сопротивления

$R_{д1}$  и  $R_{д2}$ , которые шунтированы замыкающими контактами  $KМ1$  и  $KМ2$ .

Семейство реостатных электромеханических характеристик приведено на рис. 3.14.

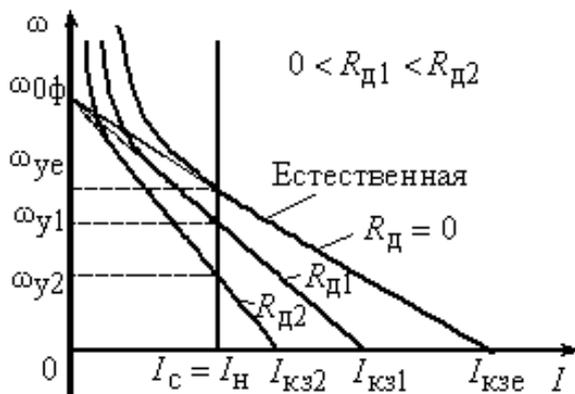


Рис. 3.14. Реостатные характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Электромеханические характеристики двигателя последовательного возбуждения описываются соответственно уравнениями (3.33 и 3.29). Таким образом, искусственные электромеханические характеристики нелинейные при малых нагрузках ( $0 < I < I_n$ ) и не имеют скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . При больших нагрузках ( $I > I_n$ ) искусственные характеристики аналогичны реостатным характеристикам двигателя независимого возбуждения. То есть, линейная их часть сходится на оси ординат в одной точке – фиктивной скорости идеального холостого хода  $\omega_{0ф}$ , которая определяется пересечением продолжения линейной части естественной электромеханической характеристики с осью абсцисс.

При скорости равной нулю  $\omega = 0$  по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = \frac{U}{R_{вд} + R_{д}}$ . Ток короткого замыкания обратно пропорционален суммарному сопротивлению цепи обмотки якоря и уменьшается с увеличением этого сопротивления. Этим свойством пользуются для ограничения бросков тока якоря припусках двигателя последовательного возбуждения в релейно-контакторных схемах управления.

Реостатное регулирование скорости, как правило, *ступенчатое* и регулирования скорости осуществляют *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости  $\omega_{yi}$  уменьшаются с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Диапазон регулирования скорости при номинальной нагрузке  $D = 1 : (3 \div 4)$ . Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях цепи обмотки якоря.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением напряжения.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением напряжения обмотки якоря производится при питании двигателя от отдельного преобразователя П рис. 3.15.

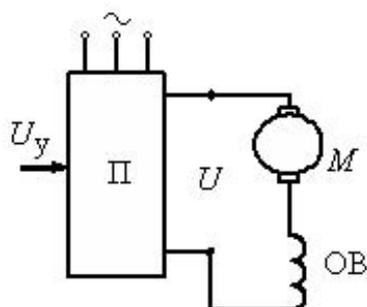


Рис. 3.15. Схема силовых цепей двигателя последовательного возбуждения при регулировании скорости изменением напряжения

Напряжение на выходе преобразователя регулируется напряжением управления  $U_y$ . Так как двигатель последовательного возбуждения включен непосредственно на выход преобразователя, то напряжение на двигателе равно напряжению преобразователя.

Электромеханические характеристики двигателя последовательного возбуждения описываются уравнениями (3.28)

$$\omega = \frac{U}{k \cdot k_H \cdot I} - \frac{R_{яц}}{k \cdot k_H}, \text{ при } 0 < I < I_H,$$

и (3.29):

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_1} - I \frac{R_{яц}}{k \cdot \Phi_1}, \text{ при } I > I_H.$$

Таким образом, искусственные электромеханические характеристики нелинейные при малых нагрузках ( $0 < I < I_H$ ) и не имеют скорости идеального холостого хода  $\omega_0$ . При больших нагрузках ( $I > I_H$ ) искусственные характеристики аналогичны искусственным характеристикам двигателя независимого возбуждения при изменении напряжения обмотки якоря. То есть, при уменьшении напряжения скорость двигателя снижается, а линейная их часть смещается параллельно линейной части естественной характеристики.

При скорости равной нулю  $\omega = 0$  по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = \frac{U}{R_{дв} + R_{п}}$ . Ток короткого замыкания двигателя пропорционален напряжению обмотки якоря и уменьшается с уменьшением этого напряжения.

Семейство электромеханических характеристик двигателя последовательного возбуждения при регулировании скорости изменением напряжения приведено на рис. 3.16.

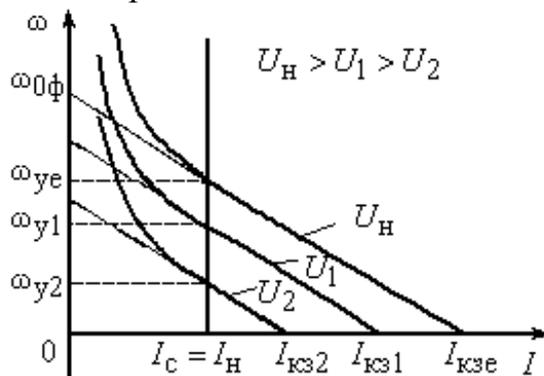


Рис. 3.16. Электромеханические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения при регулировании скорости напряжением

Показатели регулирования двигателя последовательного возбуждения близки к показателям двигателя независимого возбуждения, однако диапазон регулирования скорости существенно меньше и редко превышает  $D \leq 1:100$  даже в замкнутых системах автоматического регулирования

Двигатель последовательного возбуждения успешно применяется в электроинструментах, включаемых в сеть однофазного переменного тока: электродрелях, электрорубанках, электропилах и др.

### 3.5. Принцип электромеханического преобразования энергии в электрических машинах переменного тока

Своим появлением электропривод переменного тока обязан двум наиболее значительным открытиям:

1. Феррарис и Тесла открыли явление вращающегося магнитного поля;
2. русский ученый М. Д. Доливо-Добровольский открыл и исследовал в 1888-90 гг. трехфазную систему переменного тока.

Работы Доливо-Добровольского по разработке трехфазного тока и ее элементов – трансформатора и двигателя – составили целую эпоху в истории отечественной и мировой электротехники. Асинхронный элек-

тродвигатель обладает целым рядом преимуществ перед двигателем постоянного тока (простота, экономичность, надежность, меньший вес и габариты) и давно нашел самое широкое применение в электроприводах, не требующих плавного регулирования скорости, а в настоящее время в автоматизированных приводах переменного тока.

Принцип электромеханического преобразования энергии в электрических машинах переменного тока связан с вращающимся магнитным полем, создаваемым с помощью многофазных обмоток статора. Для создания кругового вращающегося магнитного поля необходимыми и обязательными условиями являются [11, 15]:

- равенство намагничивающих сил (НС) фаз обмоток статора;
- равенство углов  $\gamma$  и  $\beta$ , где  $\gamma$  определяет пространственное расположение магнитных осей обмоток статора и  $\beta$  временной фазовый сдвиг напряжений источника питания.

В случае несоблюдения одного из этих условий создается эллиптическое вращающееся магнитное поле, и машина переменного тока работает в несимметричном режиме. Этим свойством машин переменного тока пользуются при управлении двухфазными двигателями.

Исследования и проектирование машин переменного тока, в частности асинхронного двигателя в течение более чем сто лет, показали, что эффективное максимальное преобразование электромагнитной энергии в механическую энергию осуществляется при условии выполнения следующего равенства [11, 15, 21]

$$\frac{\alpha}{p} = \beta = \frac{\pi}{2}, \quad (3.35)$$

где  $\gamma = \frac{\alpha}{p}$ , а  $\alpha$  – угол, указывающий на смещение в пространстве магнитных осей обмоток электродвигателя (эл. град.),  $p$  – число пар полюсов,  $\beta$  – фазовый сдвиг напряжений источника питания, подводимых к фазам обмотки статора.

Вторым условием для эффективного преобразования энергии двигателями переменного тока является синусоидальное распределение в пазах магнитопровода статора витков фаз обмотки статора. Такое выполнение обмотки статора позволяет сформировать синусоидальное распределение магнитной индукции по его расточке [5, 12, 21]. Это условие из-за сложности технологической реализации до настоящего времени при изготовлении обмотки статора не выполняется.

В электрических машинах переменного тока вращающееся магнитное поле обмоток статора при угловой частоте тока статора  $\omega_1 = 2\pi f_1$

вращается с частотой вращения  $\Omega_1$ , значение которой определяется следующим соотношением:

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p}. \quad (3.36)$$

Вектор этого поля  $\Phi_1$  показан на рис. 3.17

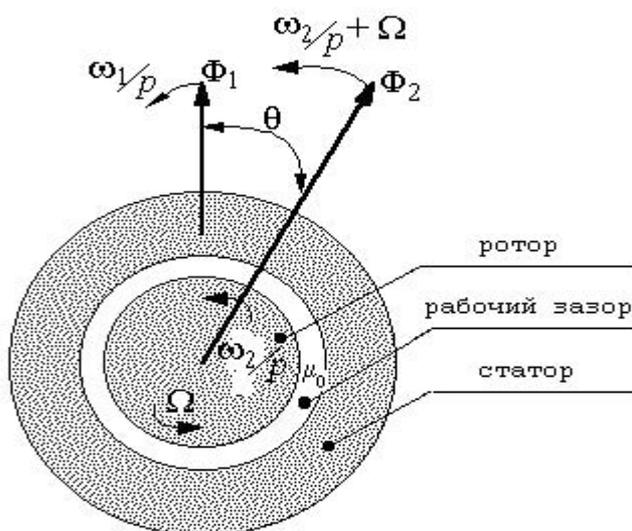


Рис. 3.17. Взаимное расположение потоков ротора и статора во вращающемся магнитном поле машины

Ток, протекающий по обмотке ротора, изменяется с частотой  $\omega_2 = 2\pi f_2$ , а магнитное поле ротора вращается относительно ротора с частотой вращения

$$\Omega_2 = \frac{\omega_2}{p}. \quad (3.37)$$

Ротор двигателя вращается в расточке статора с частотой вращения  $\Omega$ , а магнитное поле, созданное обмоткой ротора вращается соответственно с частотой вращения, определяемой в виде следующей суммы  $\Omega + \Omega_2$ .

Учитывая условие однонаправленного преобразования энергии, получаем следующее равенство [11, 15]

$$\frac{\omega_2}{p} + \Omega = \frac{\omega_1}{p}. \quad (3.38)$$

Это равенство указывает, что оба магнитных поля вращаются относительно статора с одной и той же скоростью  $\omega_1/p = \Omega_1$ , а вектор поля ротора отстает от поля статора на угол  $\theta$  как показано на рис 3.17.

Таким образом, в рабочем зазоре электрической машины существует единое вращающееся магнитное поле, которое можно охарактеризовать суммарным вектором

$$\Phi = \sqrt{\Phi_1^2 + \Phi_2^2 + 2\Phi_1\Phi_2 \cos(\theta)} \quad (3.39)$$

Частоту вращения ротора двигателя из выражения (1.4) можно представить в виде

$$\Omega = \frac{2\pi(f_1 - f_2)}{p}, \quad (3.40)$$

где  $f_2$  – частота ЭДС и тока в обмотке ротора, которая связана с частотой питающей сети соотношением [10, 14, 16]  $f_2 = f_1 s$ .

В асинхронной машине ток в обмотке ротора возникает благодаря скольжению ротора  $s$  в магнитном поле воздушного зазора. Вследствие этого частота тока  $f_2$  зависит от скорости вращения ротора и нагрузки на валу асинхронного двигателя.

Если в обмотку ротора подать напряжение  $U_2$  (в общем случае многофазное) заданной частоты  $f_2$ , то частота тока в обмотке будет задана, как и скольжение  $s$ , а скорость ротора не будет зависеть от величины нагрузки. В такой машине переменного тока (*машина двойного питания*) частота вращения ротора находится в строгом соответствии с разностью частот сети  $f_1$  и тока ротора  $f_2$ .

Если обмотку ротора подключить к постоянному напряжению ( $f_2 = 0$ ), то в этом случае частота вращения ротора  $\Omega_2$  будет равна частоте вращения магнитного поля  $\Omega_1$  в соответствии с (3.37). Такую машину переменного тока, частота вращения ротора у которой находится в строгом соответствии с частотой сети, называют *синхронной*

Энергия магнитного поля в рабочем зазоре может быть выражена через суммарный вектор:

$$W_M = \frac{\Phi^2}{2\mu_0} \quad (3.41)$$

а электромагнитный момент через энергию магнитного поля определяют в виде [10, 16]:

$$M = \frac{dW_M}{d\theta}. \quad (3.42)$$

Подставляя (3.39) в (3.41), а затем, произведя дифференцирование согласно (3.42), получают выражение для электромагнитного момента:

$$M = \frac{p\Phi_1\Phi_2}{\mu_0} \sin(\theta). \quad (3.43)$$

Из (3.43) видно, что момент зависит от угла "рассогласования" между векторами потоков статора и ротора и увеличивается при увеличении этого угла до определенных пределов.

Физически наличие двух векторов  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  в едином магнитном поле можно представить как искривление магнитных силовых линий в рабочем зазоре машины, причем это искривление увеличивается с увеличением нагрузки (момента). Таким образом, передачу энергии (момента) от вращающегося магнитного поля к ротору машины в двигательном режиме можно объяснить натяжением магнитных силовых линий, причем при увеличении этой энергии это напряжение за счет искривления в рабочем зазоре увеличивается.

Вращающееся магнитное поле обладает определенной мощностью, которую можно выразить через электромагнитный момент

$$P_{ЭМ} = \frac{\omega_1}{p} M. \quad (3.44)$$

Электрическую и механическую мощности ротора можно соответственно выразить в виде [11, 21]

$$P_{ЭП} = \frac{\omega_2}{p} M, \quad P_{Мех} = \Omega M \quad (3.45)$$

Помножив выражение (3.38), связывающее частоты вращения полей статора и ротора, на  $M$  получим,  $\frac{\omega_2}{p} M + \Omega M = \frac{\omega_1}{p} M$ , откуда

$$P_{ЭМ} = P_{ЭП} + P_{Мех}. \quad (3.46)$$

Электромагнитная мощность  $P_{ЭМ}$  представляет собой полную мощность, передаваемую вращающимся полем в ротор машины. Часть этой мощности  $P_{ЭП}$  выделяется в виде теплоты в электрической цепи ротора, а оставшаяся часть преобразуется в механическую мощность  $P_{Мех}$ .

Коэффициент полезного действия (КПД) электрической машины на этапе электромагнитного преобразования энергии определяется потерями в роторе и может быть представлен в виде

$$\eta = \frac{P_{Мех}}{P_{ЭМ}} = 1 - \frac{P_{ЭП}}{P_{ЭМ}}. \quad (3.47)$$

В общем случае КПД двигателей переменного тока зависит от суммарных потерь мощности в роторе и статоре машины и может быть представлен в виде [10, 16]

$$\eta = \frac{P_{Мех}}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{m_1 U I \cos(\varphi_1)} \quad (3.48)$$

где  $\cos(\varphi_1)$  – коэффициент мощности машин переменного тока, определяющий соотношение между полезно преобразуемой мощностью и пол-

ной мощностью, потребляемой машиной от источника переменного тока,  $\sum p$  – сумма потерь в меди и стали ротора и статора [10].

$$\cos(\varphi_1) = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}. \quad (3.49)$$

### 3.6. Определение параметров в электрических машинах переменного тока

Параметры электрических машин — это коэффициенты перед независимыми переменными в уравнениях, описывающих процесс электромеханического преобразования энергии. Как правило, параметрами являются активные сопротивления, взаимные индуктивности, индуктивности рассеяния и полные индуктивности обмоток. Параметром машины является также момент инерции.

Активные и реактивные (индуктивные) сопротивления электрических машин переменного тока определяют в основном в виде параметров схем замещения, пользуясь справочными и каталожными данными.

В общепромышленных электроустановках основное применение находят электроприводы с асинхронными двигателями, поэтому рассмотрим, как определяют параметры асинхронных двигателей.

*Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным*

В справочниках [48] по асинхронным двигателям приведены следующие физические величины, необходимые для определения параметров его схемы замещения:

$P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$\eta_H$  – коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), о.е.;

$R_1'$  – активное сопротивление обмотки статора, о.е.;

$X_{1\sigma}'$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, о.е.;

$R_2''$  – активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о.е.;

$X_{2\sigma}''$  – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, о.е.;

$X_m'$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания (главное индуктивное сопротивление), о.е.

В этом случае нахождение параметров схемы замещения асинхронного двигателя не представляет сколько-нибудь заметных трудностей и выполняется в следующей последовательности.

Определяется номинальный ток статора двигателя

$$I_{1H} = \frac{P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}, \quad (3.50)$$

Вычисляется базисное сопротивление

$$Z_{\sigma} = \frac{U_{1H}}{I_{1H}}. \quad (3.51)$$

Находятся параметры схемы замещения двигателя в физических величинах:

Активное сопротивление обмотки статора

$$R_1 = R_1' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (3.52)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$X_{1\sigma} = X_{1\sigma}' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (3.53)$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R_2' = R_2'' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (3.54)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, приведенное к обмотке статора:

$$X_{2\sigma}' = X_{2\sigma}'' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (3.55)$$

Индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_m = X_m' \cdot Z_{\sigma}, \text{ Ом.} \quad (3.56)$$

Найденные параметры схемы замещения позволяют рассчитать статические характеристики асинхронного двигателя, например, по формуле Клосса, то есть без учета насыщения зубцов от полей рассеяния и вытеснения тока в стержнях беличьей клетки.

*Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным*

В каталожных данных на асинхронные двигатели приводятся следующие технические данные:

$P_H$  – номинальная мощность двигателя, кВт;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$n_H$  – номинальная частота вращения, об/мин или

$s_H$  – номинальное скольжение, о.е.;

$\eta_H$  – коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности (100%-я нагрузка), %;

$\cos \varphi_H$  – коэффициент мощности в режиме номинальной мощности, о.е.;

$I_{\Pi}/I_{1H} = k_i$  – кратность пускового тока, о.е.;

$M_{\Pi}/M_H = k_{\Pi}$  – кратность пускового момента, о.е.;

Эти данные позволяют определить параметры схемы замещения при следующих основных допущениях:

- магнитные и механические потери в двигателе составляют  $0,02 P_H$ ;
- активные сопротивления статорной и роторной обмоток полагаются независимыми от режима работы двигателя, т.е. эффекты вытеснения не учитываются.

Определяется ток холостого хода асинхронного двигателя [21]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}}, \quad (3.57)$$

где  $I_{1H}$  – номинальный ток статора двигателя, А;

$s_H = (n_0 - n_H) / n_0$  – номинальное скольжение, о.е.;

$n_0$  – синхронная частота вращения, об/мин;

$U_{1H}$  – номинальное фазное напряжение, В;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{m_1 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} - \quad (3.58)$$

ток статора двигателя при частичной нагрузке, А;  $\cos \varphi_{p_*}$  – коэффициент мощности при частичной нагрузке, о.е.;  $\eta_{p_*}$  – КПД при частичной нагрузке, о.е.;  $p_* = P/P_H$  – коэффициент загрузки двигателя, о.е.;

$P$  – мощность двигателя при частичной нагрузке, кВт.

Коэффициенты мощности и КПД при частичной нагрузке в технической литературе приводятся редко, а для целого ряда серий электрических машин такие данные в справочной литературе отсутствуют. Эти параметры можно определить, руководствуясь следующими соображениями:

- современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при нагрузке на 10–15% меньшей номинальной [1]. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и нагрузке  $p_* = 0,75$  практически равны между собой, т.е.

$$\eta_H \approx \eta_{0,75}$$

- коэффициент мощности при той же нагрузке  $p_* = 0,75$  сильно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя и для известных серий асинхронных двигателей с достаточной для практики точностью подчиняется зависимости, приведенной на рис. 3.18.

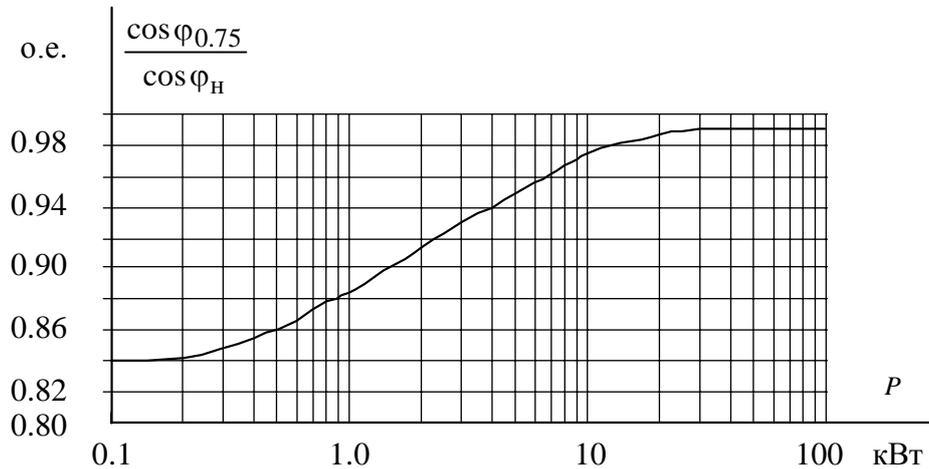


Рис. 3.18. Зависимость  $\cos \varphi_{0,75} / \cos \varphi_H$  от мощности асинхронного двигателя

Из формулы Клосса определим выражение для расчета критического скольжения

$$s_k = s_H \frac{k_{\max} + \sqrt{(k_{\max})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)}, \quad (3.59)$$

где  $\beta$  – вспомогательный коэффициент (на начальном этапе принимаем  $\beta = 1$ , в дальнейшем  $\beta$  может принимать диапазон значений от 0,6 до 2,5).

Затем необходимо определить ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = \frac{I_0}{2k_T I_{1H}} + 1; \quad (3.60)$$

$$A_1 = 3U_{\Phi H}^2 \frac{1 - s_H}{2C_1 k_{\max} P_H}; \quad (3.61)$$

$$A_0 = \frac{I_{1H} \cos \varphi_H - I_0 \cos \varphi_0}{U_{\Phi H}}; \quad (3.62)$$

$$B = \frac{1}{s_H} + \frac{1}{s_{кр}} - A_0 2 \frac{A_1}{s_H}; \quad (3.63)$$

$$C = \frac{1}{s_H s_{кр}} - \left( \frac{1}{s_{кр}^2} + \frac{1}{s_H^2} \right) A_1 A_0. \quad (3.64)$$

где  $\cos \varphi_0$  – коэффициент мощности АД в режиме холостого хода.

Затем по найденным значениям проверяем величину заданного в начале расчёта коэффициента  $\beta$

$$\beta_p = \left| \frac{-B}{2} + \sqrt{\frac{B}{2} - C} \right| \quad (3.65)$$

При  $\beta_p > \beta$  необходимо уменьшить начальное значение коэффициента  $\beta$  и повторить расчёт ещё раз. При  $\beta_p < \beta$  необходимо увеличить начальное значение коэффициента  $\beta$ .

Если разница между  $\beta_p$  и  $\beta$  не превышает установленной погрешности расчёта ( $\approx 0,001$ ) можно переходить к непосредственному определению параметров машины.

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1/s_K) C_1, \text{ Ом.} \quad (3.66)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно найти по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta, \text{ Ом.} \quad (3.67)$$

Определим параметр  $\gamma$ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания  $X_{кн}$ :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_K^2) - \beta^2}. \quad (3.68)$$

Очевидно, что при отрицательном подкоренном выражении (5.29) первоначально принятое значение  $\beta$  необходимо изменить.

Тогда индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2'. \quad (3.69)$$

Для того, чтобы выделить из индуктивного сопротивления короткого замыкания  $X_{кн}$  сопротивления рассеяния фаз статора  $X_{1\sigma H}$  и ротора  $X_{2\sigma H}'$ , воспользуемся соотношениями [15,21,24], которые справедливы для серийных асинхронных двигателей.

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано по уравнению

$$X_{2\sigma H}' = 0,58 \cdot X_{кн} / C_1, \text{ Ом.} \quad (3.70)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки может быть определено по следующему выражению:

$$X_{1\sigma H} = 0,42 \cdot X_{KH}, \text{ Ом.} \quad (3.71)$$

Согласно векторной диаграмме, ЭДС ветви намагничивания  $E_m$ , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_{mH} = \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_{1H} - R_1 \cdot I_{1H})^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{1H}} + X_{1\sigma H} \cdot I_{1H})^2}, \quad (3.72)$$

тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_{mH} = E_{mH} / I_0. \quad (3.73)$$

Приведенная методика дает удовлетворительное схождение расчетных механических характеристик и механических характеристик, построенных по трем паспортным точкам на рабочем участке механической характеристике, то есть при изменении скольжения  $s$  от 0 до  $s_k$ .

### 3.7. 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).

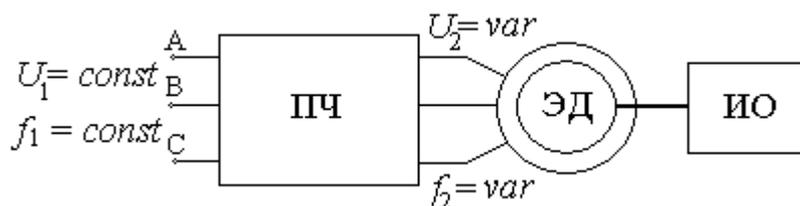


Рис. 3.19.. Силовая часть электропривода переменного тока

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  $\omega_1$ , 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.

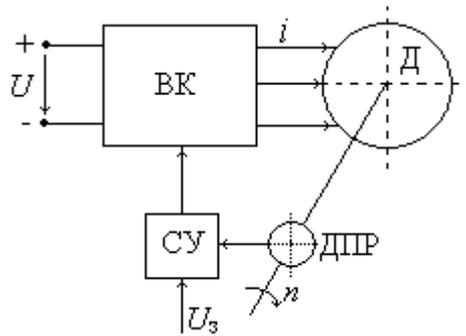


Рис. 3.21. Схема вентильного двигателя

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.

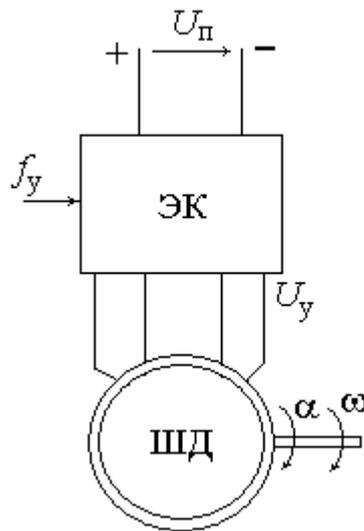


Рис. 3.22. Схема шагового двигателя

### 3.8. Регулировочные и механические характеристики

По отношению к источнику электрической энергии электродвигатели являются нагрузкой, а с другой стороны – это источники механической энергии. Поэтому основная часть требований предъявляемых к электроприводу, как к электромеханической системе, определяется свойствами электродвигателя, как объекта управления, т.е. его управляемостью.

Под управляемостью электродвигателя следует понимать возможность непосредственного воздействия на его внутренние переменные, формирующие параметры механической энергии. При вращательном движении вала параметрами механической энергии являются электромагнитный момент  $M$  и частота вращения ротора  $\omega$ , а при поступательном – электромагнитная сила  $F$  и линейная скорость  $V$ . Момент  $M$  и частота вращения  $\omega$ , электромагнитная сила  $F$  и линейная скорость  $V$  – это взаимосвязанные величины. Их взаимосвязь принято называть электромеханической связью, и определяется она электромагнитными и механическими процессами, протекающими в двигателе одновременно [17, 19, 25]. Количественную и качественную оценку электромеханической связи определяют по электромеханическим и механическим характеристикам, а именно: регулировочной для скорости (скоростной), регулировочной для момента (моментной или силовой) и механической.

В зависимости от режимов работы электродвигателя различают статические и динамические электромеханические и механические характеристики.

*Статические характеристики* – это характеристики при установившемся режиме работы двигателя, когда частота вращения вала постоянна. В этом случае, как следует из основного закона движения, момент, развиваемый двигателем  $M$ , равен приведенному к валу двигателя моменту нагрузки  $M_H$ . Установившееся значение момента  $M$  и токов  $i_{куст}$  в обмотках в этом случае однозначно определяется частотой вращения  $\omega$ , параметрами двигателя и вторичного источника электрической энергии.

При этом следует отметить, что в качестве вторичных источников питания в электроприводах переменного тока используют регулируемые источники напряжения (ЭДС) и регулируемые источники тока.

Таким образом, для установившегося режима работы имеют место следующие зависимости:

- для электромеханических характеристик (регулируемых по скорости при вторичном источнике напряжения (ЭДС))

$$\omega = f(z, U_k, f_1) \text{ при } M_H = \text{const}; \quad (3.74)$$

- для электромеханических характеристик (регулируемых по моменту при вторичном источнике напряжения (ЭДС))

$$M = f(z; U_k; f_1) \text{ при } \omega = 0; \quad (3.75)$$

- для электромеханических характеристик (регулируемых характеристик по скорости и по моменту при вторичном источнике тока)

$$\omega = f(z, I_k, f_1) \text{ при } M_H = \text{const}; M = f(z; I_k; f_1) \text{ при } \omega = 0 \quad (3.76)$$

- для механических характеристик (источник напряжения (ЭДС))

$$M = f(\omega, z, U_k, f_1). \quad (3.77)$$

- для механических характеристик (источник тока)

$$M = f(\omega, z, I_k, f_1). \quad (3.78)$$

Здесь  $z$  – параметры двигателя;  $U_k, f_1$  – напряжение и частота на выходе источника напряжения (ЭДС),  $I_k, f_1$  – ток и частота на выходе источника тока.

Регулируемая характеристика представляет собой зависимость установившейся скорости вала ИД от сигнала управления на входе ИД при моменте нагрузки  $M_{н.д} = M_{д} = 0$ .

Регулируемые характеристики для скорости большинства ИД имеют линейный (или линеаризуемый) и нелинейный участки. Регулируемые характеристики ИД для скорости могут определяться теоретически и экспериментально. Теоретическое определение характеристик основывается на приближенном аналитическом описании свойств каждого конкретного типа ИД. Точное определение аналитическими методами параметров регулируемой характеристики для скорости затруд-

нено. Поэтому основное значение приобретают экспериментальные методы определения регулировочных характеристик.

Регулировочная характеристика ИД для момента (моментная или силовая) представляет собой зависимость момента (усилия), развиваемого на валу заторможенного ИД, от сигнала управления.

На рис. 3.23 приведена регулировочная характеристика ИД для момента: типичная для двухфазных асинхронных ИД. Методы определения регулировочных характеристик ИД для момента принципиально не отличаются от методов определения регулировочных для скорости.

Механическая характеристика представляет собой семейство кривых, зависящих от параметров управляющего воздействия.

При выборе ИД и оценке его пригодности с энергетической точки зрения нет необходимости рассматривать все семейство механических характеристик. Вполне достаточно принять во внимание только предельную характеристику ИД, соответствующую максимальному значению сигнала управления  $u = u_{\max}$  и определяющую максимальную располагаемую мощность ИД.

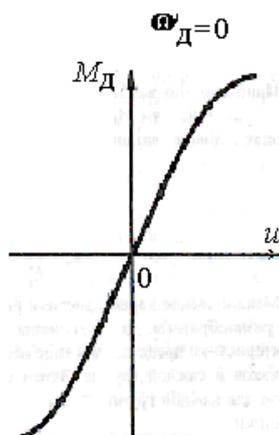


Рис. 3.23. Регулировочная характеристика ИД переменного тока

Механическая характеристика ИД представляет собой зависимость установившейся угловой скорости его вала от сигнала управления и от момента, развиваемого ИД и равного моменту нагрузки от действия внешних сил, приведенному к валу ИД.

Механические характеристики различных типов ИД отличаются большим разнообразием. Однако, взяв за основу общность признаков, всю совокупность характеристик различных ИД можно разбить на несколько групп. Для каждой группы характеристик, используя результаты аппроксимации, можно получить аналитические выражения механических характеристик.

Для линеаризации механических характеристик приближенно определяют их жесткость и эластичность. Жесткость механических характеристик при этом определяют как отношение максимальных значений развиваемого момента к скорости холостого хода:

$$k_{\text{д}}^* \approx \frac{M_{\text{д max}}}{\omega_{\text{дх}}} \quad (3.79)$$

Эластичность механической характеристики величина обратная жесткости и ее приближенно определяют в виде:

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{k_{\text{д}}^*} \approx \frac{\omega_{\text{дх}}}{M_{\text{д max}}} \quad (3.80)$$

Тогда наиболее точное приближение к реальным характеристикам имеют механические характеристики, которые аппроксимируются следующими аналитическими выражениями.

1. Линейная механическая характеристика

$$\omega_{\text{д}} = \omega_{\text{дх}} - \frac{1}{k_{\text{д}}^*} M_{\text{д}} \quad (3.81)$$

где  $k_{\text{д}} = \frac{1}{k_{\text{д}}^*} = \frac{\omega_{\text{дх}}}{M_{\text{д max}}}$  – эластичность линейной механической характеристики,  $\omega_{\text{дх}} = \omega_{\text{дх}}(u)$ ,  $0 \leq |u| \leq |u_{\text{max}}|$ .

2. Параболическая механическая характеристика

$$\omega_{\text{д}}^2 = \omega_{\text{дх}}^2 - \frac{1}{k_{\text{д}}^*} M_{\text{д}}, \quad (3.82)$$

где  $k_{\text{д}} = \frac{1}{k_{\text{д}}^*} = \frac{\omega_{\text{дх}}^2}{M_{\text{д max}}}$ ;  $\omega_{\text{дх}} = \omega_{\text{дх}}(u)$ ,  $0 \leq |u| \leq |u_{\text{max}}|$ .

3. Гиперболическая механическая характеристика

$$\omega_{\text{д}} = \sqrt{\frac{k_1 u^2}{M_{\text{д}}} - k_2}, \quad (3.83)$$

где  $k_1, k_2$  – постоянные коэффициенты;  $0 \leq |u| \leq |u_{\text{макс}}|$ .

4. Эллиптическая механическая характеристика

$$\frac{\omega_{\text{д}}^2}{\omega_{\text{дх}}^2} + \frac{M_{\text{д}}^2}{M_{\text{д max}}^2} = 1, \quad (3.84)$$

где  $\omega_{\text{дх}} = \omega_{\text{дх}}(u)$ ;  $0 \leq |u| \leq |u_{\text{max}}|$ .

Механические характеристики являются обобщенными характеристиками ИД. В них содержится информация о скоростной, моментной и

энергетической способности ИД. Кроме того, механические характеристики позволяют при заданном моменте инерции ротора определить электромеханическую постоянную времени.

### 3.9. Влияние частоты и напряжения питающей сети на свойства электрических машин переменного тока

При реализации амплитудного, частотного и фазового принципов управления двигателями переменного тока приходится для получения требуемых статических и динамических характеристик привода изменять или величину питающего напряжения, тока или частоту приложенного к обмоткам двигателя напряжения. Как показывает практика, самыми эффективными оказываются способы управления, когда одновременно изменяют напряжение и частоту или ток и частоту питающей сети в соответствии с определенным законом.

Такие способы управления называют частотными и частотно-токовыми. Для выявления свойств электродвигателя при частотном и частотно-токовом управлении предполагают, что преобразователь обладает неограниченной мощностью, а выходное напряжение или ток преобразователя симметричны и синусоидальны. Поэтому напряжения или ток на выходе преобразователя, представляют в виде обобщенного вектора [3, 4], а именно:

$$\dot{U}_S = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m e^{j2\pi f_1 t}; \quad (3.85)$$

$$\dot{I}_S = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m e^{j2\pi f_1 t}; \quad (3.86)$$

где  $U_m$  – амплитуда напряжения источника напряжения;  $I_m$  – амплитуда тока источника тока;  $f_1$  – частота на выходе источника питания.

Возможности по регулированию частоты вращения вала электродвигателя при частотном управлении можно определить из анализа следующих выражений:

- для асинхронных электродвигателей

$$\omega = \omega_0 (1 - s) = \frac{2\pi f_1}{p} (1 - s); \quad (3.87)$$

- для синхронных электродвигателей

$$\omega = \omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}; \quad (3.88)$$

где  $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$  – частота вращения магнитного поля обмотки статора

машины переменного тока;  $\Omega$  – частота вращения вала двигателя.

При этом необходимо отметить отличительную особенность синхронных электродвигателей, состоящую в том, что поле ротора неподвижно относительно ротора и вращается синхронно с ним, взаимодействуя при этом с вращающимся полем статора. Кроме этого поле ротора постоянно и создается в машинах с электромагнитным возбуждением обмоткой возбуждения, а в машинах с магнитоэлектрическим возбуждением постоянными магнитами.

Таким образом, согласно выражениям (3.87), (3.88), изменение частоты источника питания приводит к изменению частоты вращения магнитного поля статора и, соответственно, к изменению частоты вращения вала электродвигателя.

Наряду с частотой вращения вала регулируемого электропривода качество механической энергии оценивают по развиваемому электродвигателем моменту. Величина электромагнитного момента в электрических машинах, в общем случае без учета особенностей принципа работы и конструктивного исполнения, зависит от магнитного потока, сосредоточенного в воздушном зазоре машины и от токов, протекающих в обмотке, так называемого индуктора [7].

Анализ процессов, протекающих при частотном управлении в электродвигателе, и основные соотношения для токов и параметров осуществляют с использованием схемы замещения. В качестве такой исходной схемы на (рис. 3.24) приведена схема замещения асинхронного двигателя при частотном управлении.

На схеме замещения введены следующие обозначения:

$\alpha = \frac{f_1}{f_{1H}}$  – относительная частота напряжения (тока) статора;

$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{1H}} = \frac{f_2}{f_{1H}}$  – абсолютное скольжение или относительная частота вращения ротора.

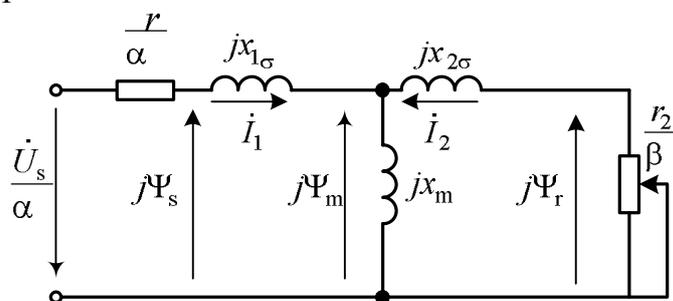


Рис. 3.24. Схема замещения АД с короткозамкнутым ротором в установившемся режиме

Схема замещения (рис 3.24) позволяет получить основные соотношения для параметров электродвигателя при частотном управлении, оценить влияние частоты на величину магнитного потока и получить формулу для момента двигателя при частотном управлении.

Так модуль комплексного сопротивления обмотки ротора АД можно выразить в виде:

$$Z'_{2\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r'_2}{\beta}\right)^2 + (x'_{2\sigma H})^2} \alpha, \quad (3.89)$$

а модуль комплексного сопротивления обмотки статора АД в виде:

$$Z_{1\alpha} = \sqrt{\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + (x_{1\sigma H})^2} \alpha. \quad (3.90)$$

Эквивалентное сопротивление параллельно соединенных контуров намагничивания и схемы замещения обмотки ротора можно представить в виде следующего выражения:

$$Z_{\text{экв}\alpha} = \alpha \frac{x_{mH} \sqrt{\left(\frac{r'_2}{\beta}\right)^2 + (x'_{2\sigma H})^2}}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{\beta}\right)^2 + (x'_{2\sigma H} + x_{mH})^2}}. \quad (3.91)$$

Тогда полное сопротивление схемы замещения АД можно представить в виде [12]:

$$Z_{\text{общ}} = \alpha \frac{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{\beta} \frac{r_1}{\alpha} - \sigma x_S x_R\right)^2 + \left(\frac{r_1}{\alpha} x_R + \frac{r'_2}{\beta} x_S\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{r'_2}{\beta}\right)^2 + (x_R)^2}}, \quad (3.92)$$

где  $x_S = x_{1\sigma H} + x_{mH}$  – полное индуктивное сопротивление статора при номинальной частоте  $f_{1H}$  питающей сети;  $x_R = x_{2\sigma H} + x_{mH}$  – приведенное полное индуктивное сопротивление ротора при номинальной частоте

$f_{1H}$  питающей сети;  $\sigma = 1 - \frac{x_{mH}^2}{x_S x_R}$  – рассеяния по Блонделю;  $x_{1\sigma H}$  и  $x_{2\sigma H}$

– индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора.

Для упрощения записи выражений для основных переменных, характеризующих процессы в электродвигателе при частотном управлении, введем следующие обозначения:

$$A(\alpha, \beta) = \left( \frac{r_2'}{\beta} \frac{r_1}{\alpha} - \sigma x_S x_R \right)^2 + \left( \frac{r_1}{\alpha} x_R + \frac{r_2'}{\beta} x_S \right)^2;$$

$$B(\beta) = \left( \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + (x_R)^2;$$

$$D(\beta) = \left( \frac{r_2'}{\beta} \right)^2 + (x_{2\sigma H}')^2.$$

Тогда действующие значения тока статора можно рассчитать по выражению:

$$I_1 = \frac{U_{SH} \gamma}{\alpha} \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (3.93)$$

а приведенное значение тока ротора по выражению:

$$I_2' = \frac{U_{SH} \gamma}{\alpha} \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}. \quad (3.94)$$

Ток контура намагничивания в этом случае определяют по выражению

$$I_m = \frac{U_{SH} \gamma}{\alpha} \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}. \quad (3.95)$$

ЭДС, наводимую в обмотке статора вращающимся магнитным полем можно представить в виде:

$$E_s = I_m x_m \alpha = c f_{1H} \alpha \Phi \quad (3.96)$$

где  $c = 4,44 W_1 k_{об1}$ , а  $\gamma = \frac{U_1}{U_{1H}}$ .

Значение магнитного потока в воздушном зазоре электродвигателя в общем, виде можно записать:

$$\Phi = \frac{U_{SH} \gamma x_m \sqrt{D(\beta)}}{c f_{1H} \alpha \sqrt{A(\alpha, \beta)}}. \quad (3.97)$$

Значение электромагнитной мощности электродвигателя при частотном управлении можно определить по выражению

$$P_{\text{эм}} = m_S I_2'^2 \frac{r_2' \alpha}{\beta} = m_S U_{S\text{H}}^2 x_m^2 \frac{r_2' \gamma^2}{\beta \alpha} \frac{1}{A(\alpha, \beta)}. \quad (3.98)$$

Тогда электромагнитный момент, развиваемый электродвигателем при частотном управлении, в общем случае, будет иметь следующий вид:

$$M = P_{\text{эм}} \frac{p}{2\pi f_1} = K \frac{r_2'}{\beta} \left(\frac{\gamma}{\alpha}\right)^2 \frac{1}{A(\alpha, \beta)}, \quad (3.99)$$

где коэффициент пропорциональности  $K$  можно представить в виде соотношения

$$K = \frac{m_S p U_{S\text{H}}^2}{2\pi f_{1\text{H}}} x_{m\text{H}}^2,$$

где  $m_s$  – число фаз обмотки статора;  $p$  – число пар полюсов.

Максимальный критический момент в данном случае равен

$$M_{\text{кр}} = \frac{K}{2x_R} \left(\frac{\gamma}{\alpha}\right)^2 \frac{1}{\sqrt{\left(\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + x_S^2\right) \left(\left(\frac{r_1}{\alpha}\right)^2 + \sigma^2 x_S^2\right)} \pm \frac{r_1}{\alpha} x_S (1 - \sigma)},$$

а критическая относительная частота токов ротора

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{r_2'}{x_R} \frac{\sqrt{r_1^2 + (\alpha x_S)^2}}{\sqrt{r_1^2 + (\alpha \sigma x_S)^2}}.$$

При частотно-токовом управлении, когда ток обмотки статора формируется источником питания (источником тока) и является величиной известной, основные соотношения имеют следующий вид:

- приведенный ток обмотки ротора

$$I_2' = I_1 \frac{x_m}{\sqrt{B(\beta)}}; \quad (3.100)$$

- ток контура намагничивания

$$I_m = I_1 \sqrt{\frac{D(\beta)}{B(\beta)}}; \quad (3.101)$$

- ЭДС статора

$$E_S = \alpha I_S x_m \sqrt{\frac{D(\beta)}{B(\beta)}}; \quad (3.102)$$

- электромагнитный момент, развиваемый в данном случае электродвигателем

$$M = K_1 I_1^2 \frac{x_m^2 r_2'}{\beta} \frac{1}{B(\beta)}, \quad (3.103)$$

где  $K_1 = \frac{m_s P}{2\pi f_{1H}}$ ;

- значение магнитного потока в воздушном зазоре электродвигателя

$$\Phi = \frac{x_m}{c f_{1H}} I_m \sqrt{\frac{D(\beta)}{B(\beta)}}. \quad (3.104)$$

Потери в электродвигателе при изменении частоты и величины питающего напряжения определяют по следующим выражениям, а именно [4, 5, 9]:

- потери в меди статора

$$P_{1M} = m_s r_s I_1^2 = m_s r_s \frac{U_{sH}^2 \gamma^2}{\alpha^2} \frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}; \quad (3.105)$$

- потери в меди ротора

$$P_{2M} = m_r r_r' I_2'^2 = m_r r_r' \frac{U_{sH}^2 \gamma^2}{\alpha^2} \frac{x_m^2}{A(\alpha, \beta)}; \quad (3.106)$$

- потери в стали

$$P_{ст} = \Phi^2 f_{1H} \alpha (k_{\Gamma} + k_{BT} f_{sH} \alpha), \quad (3.107)$$

где  $\Phi^2 = \frac{U_{sH}^2 \gamma^2}{c^2 f_{1H}^2 \alpha} \frac{x_m^2 \sqrt{D(\beta)}}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}$

Коэффициенты потерь на гистерезис и вихревые токи определяют из эмпирических соотношений  $k_{\Gamma} + k_{BT} = 0,19 \div 0,22$ ;  $k_{BT}/k_{\Gamma} = 0,12 \div 0,6$  при частоте  $f_{1H} = 50$  Гц.

Анализ приведенных соотношений показывает, что режим работы электродвигателя (момент, скорость, ток, потери) однозначно определяется, если установлены три величины из восьми. При этом момент на валу определяется нагрузкой, все остальные величины можно определить, если при известной частоте заданы поток двигателя и абсолютное скольжение или ток статора и абсолютное скольжение.

Поэтому основной задачей, которую необходимо решить при построении управляемой электромеханической системы переменного тока, это выбор системы обратных связей. При этом входные управляющие воздействия  $\gamma$  и  $\alpha$  должны изменяться в соответствии с искомым законом управления, при возмущающем воздействии момента нагрузки, для обеспечения требуемых статических и динамических характеристик при минимальных потерях в двигателе.

## 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.

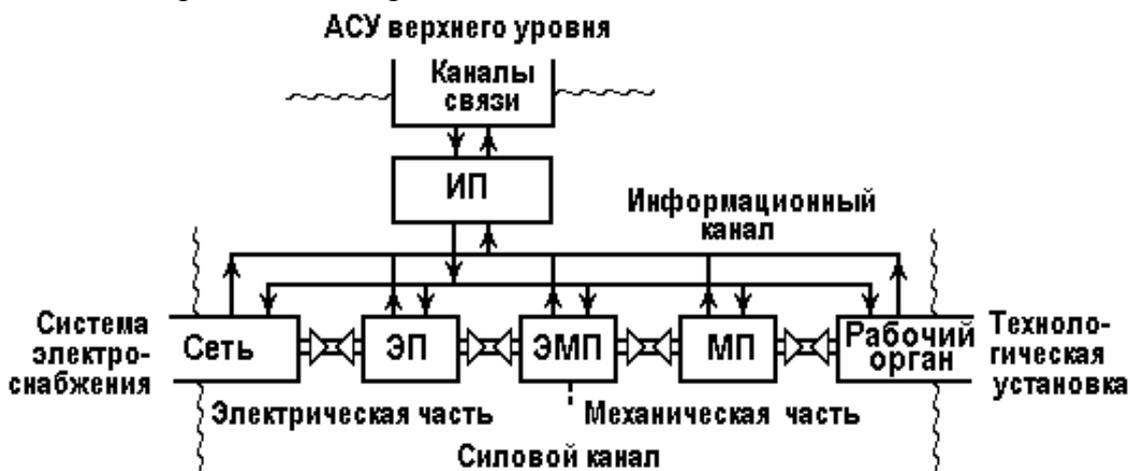


Рис. 4.1. Общая структура электропривода

*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 электропитания.

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  $\Delta P$  в каждом элементе силового канала.

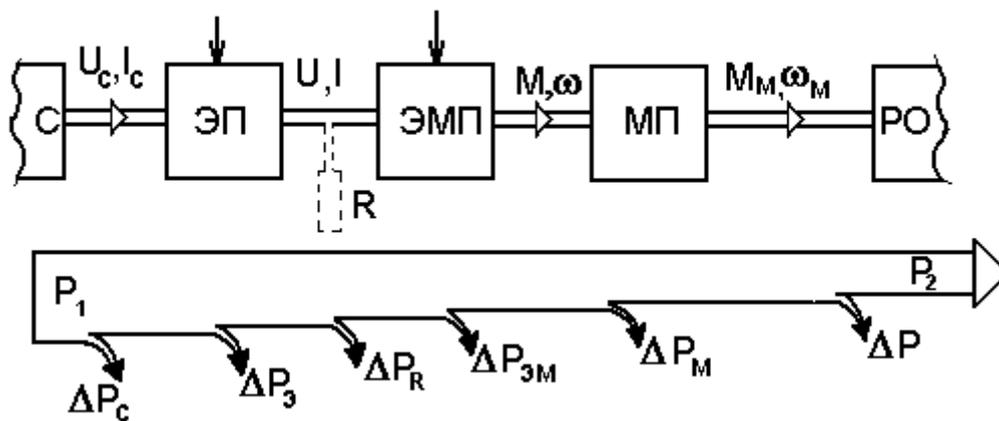


Рис.4. 2. Энергетический канал

Функция *электрического преобразователя ЭП* (если он используется) состоит в преобразовании электрической энергии, поставляемой источником (сетью) и характеризующейся напряжением  $U_c$  и током  $I_c$  сети, в электрическую же энергию, требуемую двигателем и характеризующуюся 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 ( $M, \omega$ ) 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  $\omega$  двигателя с моментом  $M_m$  (усилием  $F_m$ ) и скоростью  $\omega_m$  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  $\Delta P$*  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  $J_\Sigma$ . 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  $M_c = \text{const}$ .

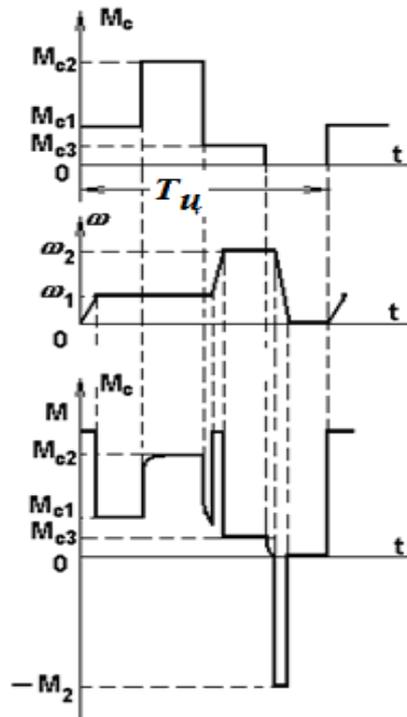


Рис. 4.3. Нагрузочные диаграммы механизма

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  $\omega_{\max}$ , если регулирование однозонное вниз от основной скорости, или  $\omega_{\min}$ , если регулирование однозонное вверх от основной скорости. По найденным таким образом величинам  $M_H$  и  $\omega_H$  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.

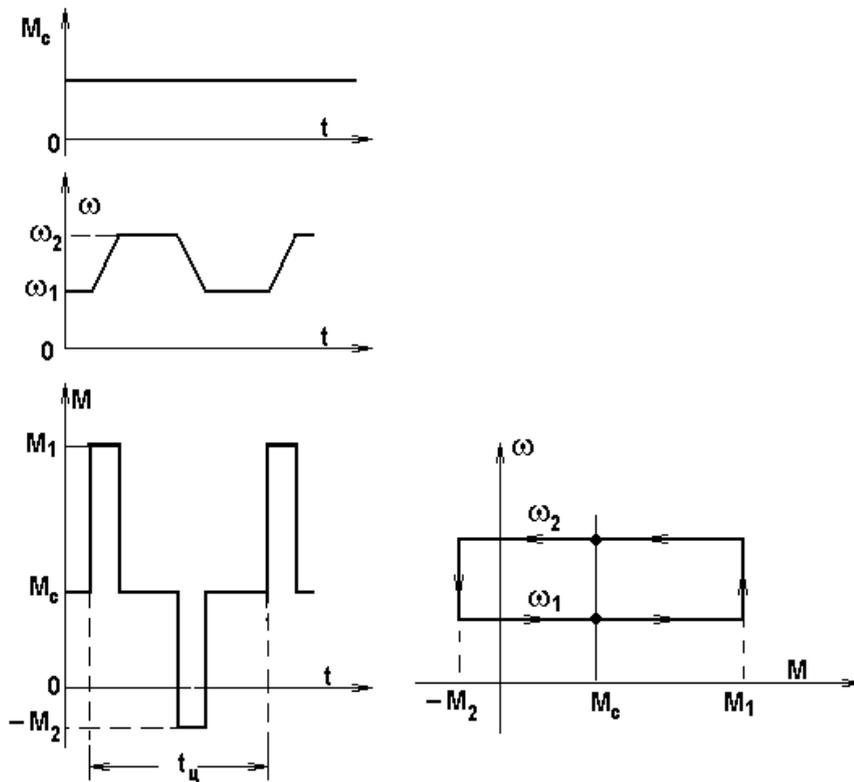


Рис. 4.4. Нагрузочная диаграмма двигателя при  $M_c = const$  и  $\omega = var$

#### 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  $\Phi$  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.

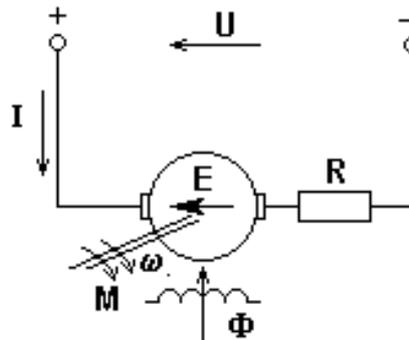


Рис. 4.5. Схема электропривода с двигателем постоянного тока

Взаимодействие тока  $I$  в обмотке якоря с магнитным потоком  $\Phi$ , 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  $\omega$  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 соответствии 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  $\Delta M$ , 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  $\Phi$ , 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.

#### 4.5. Номинальный режим. Допустимые значения координат

Режимы работы любого электропривода определяются техническими ограничениями, играющие решающую роль в любых практических задачах. Оценить эти ограничения можно по допустимым значениям основных координат привода – тока, момента и скорости.

В основе всех этих оценок лежат *номинальные данные двигателя*, указываемые обычно на заводском шильдике или в паспорте двигателя. К таким данным для двигателей постоянного тока, предназначенных для работы в продолжительном режиме, относятся номинальные значения:

- напряжение  $U_n$ , В;
- ток  $I_n$ , А;
- мощность на валу  $P_n$ , кВт;
- частота вращения  $n_n$ , об/мин ( $\omega_n = \frac{\pi n_n}{30}$  1/с);
- КПД  $\eta_n$ ;
- напряжение возбуждения  $U_{вн}$ , В;
- ток возбуждения  $I_{вн}$  (для двигателей независимого возбуждения),
- момент инерции  $J_n$ , кгм<sup>2</sup>,
- исполнение двигателя IP.

Другие сведения обычно в паспорте не приводятся.

Номинальные данные соответствуют одной точке в плоскости  $\omega - M$  с допустимыми и благоприятными значениями всех основных величин в оговоренном (в нашем случае, продолжительном) режиме, хотя в действительности электропривод работает в любых точках и совсем не при номинальных данных.

Номинальные данные используются для построения основных естественных – характеристик двигателя, служащих, основой для получения искусственных характеристик при регулировании координат.

В электроприводах с двигателями независимого возбуждения все механические и электромеханические характеристики – прямые линии и для их построения достаточно двух точек, например, точки идеального

холостого хода ( $M = 0, \omega = \omega_0$ ) и номинального режима ( $M = M_H, \omega = \omega_H$ ). Две из указанных координат ( $M_H$  и  $\omega_0$ ) должны быть определены по номинальным данным, причем  $\omega_0 = \frac{U_H}{c\Phi_H}$  и  $M_H = c\Phi_H I_H$  т.е. нужно знать величину  $c\Phi_H$ . Для ее определения удобно воспользоваться уравнением (6) с номинальными величинами, откуда получим:

$$c\Phi_H = \frac{U_H - I_H R_{я}}{\omega_H}, \quad (4.8)$$

здесь неизвестно сопротивление якорной цепи  $R_{я}$  – обмотки якоря, щеточного контакта, дополнительных обмоток, если они используются.

Лучше всего иметь надежную оценку  $R_{я}$ , однако часто это связано с трудностями. Тогда прибегают к грубой (иногда – очень грубой) оценке, построенной на предположении, что половина номинальных потерь  $\Delta P_H$  – это потери в меди обмотки:

$$0,5\Delta P_H = I_H^2 R_{я},$$

откуда

$$R_{я} \approx \frac{0,5\Delta P_H}{I_H^2} = \frac{0,5U_H}{I_H} (1 - \eta_H). \quad (4.9)$$

Номинальный электромагнитный момент  $M_H$ , определенный как  $M_H = c\Phi_H I_H$ , больше номинального момента на валу  $M_{Hвал} = \frac{P_H}{\omega_H}$

на величину  $\Delta M$ , что следует иметь в виду при расчетах.

Естественные характеристики двигателей при питании от источника тока строятся на основании изложенных соображений по определению параметра  $R_{я}$  и оценке  $M_H$ .

Естественные характеристики двигателей постоянного тока очень часто строятся с использованием универсальных характеристик в относительных величинах.

Так, приняв за базовые величины  $U_H, I_H, \omega_H, c\Phi_H = \frac{U_H}{\omega_0}$  и  $R_H = \frac{U_H}{I_H}$ , получим после преобразований:

$$\omega^* = \frac{U^* - I^* R^*}{\Phi^*}$$

и

$$\omega^* = \frac{U^*}{\Phi^*} - \frac{M^* R^*}{(\Phi^*)^2},$$

где все относительные величины определены как  $X^* = \frac{X}{X_6}$ .

Тогда, приняв  $U^*$  и  $\Phi^* = 1$ , получим:

$\omega^* = 1 - I^* R^*$  или при  $I^* = 1$  (при номинальном токе)

$$\omega^* = 1 - R^*. \quad (4.10)$$

Последнее соотношение позволяет очень просто строить характеристику при заданном значении  $R$  или, наоборот, определять  $R$ , если известна характеристика.

Отметим, что обычно относительное сопротивление собственно якорной цепи очень невелико:  $R_{я}^* = 0,02 - 0,05$ , и жесткость естественной характеристики ( $R = R_{я}$ ) весьма высокая:

$$k_{\beta} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_1 - M_2}{\omega_1 - \omega_2} = (-50) - (-20) \quad (4.11)$$

Рассмотрим теперь допустимые (безопасные) пределы изменения основных координат.

*Магнитный поток* также ограничен номинальной величиной, поскольку при ее длительном превышении ток возбуждения, превышающий номинальный, может вызвать недопустимый перегрев обмоток. Кратковременное (до минуты) двукратное увеличение тока возбуждения, используемое, например, в электроприводах с питанием якорной цепи от источника тока, допустимо, однако вследствие насыщения магнитный поток при этом увеличивается незначительно. При форсировках, ускоренном нарастании магнитного потока, допустимо кратковременное 2–3 - кратное превышение номинального напряжения возбуждения.

*Скорость* по условиям механической прочности нормально ограничена номинальным значением с небольшим 20–30% допустимым превышением; специальные двигатели, предназначенные для работы с ослабленным полем, допускают 3–4 -кратное превышение номинальной скорости.

*Ток якоря* - координата, определяющая надежность работы электропривода. В продолжительном режиме ток на всех скоростях не должен превышать номинального значения при независимом охлаждении двигателя – сплошные линии со штриховкой на рис.4.6.

В двигателях, охлаждаемых собственным вентилятором, в продолжительном режиме необходимо снижать ток на 30-40% при низких скоростях – пунктир на рис. 6 во избежание недопустимого перегрева. Кратковременные (секунды) перегрузки по току ограничиваются условиями коммутации машины; допустимые перегрузки обычно не превышают  $(2-3)I_n$  – линии с двойной штриховкой на рис.6. Из изложенного

следует недопустимость пуска электропривода постоянного тока (кроме микроприводов) прямым включением на номинальное напряжение. Момент при полном потоке имеет те же ограничения, что и ток якоря.

Таким образом, зона допустимых значений  $\omega^*$ ,  $I^*$  и  $M^*$  сравнительно невелика, и рис. 4.6 даёт о ней некоторое представление: внутренняя область относится к продолжительному режиму, внешняя - к кратковременным (секунды) перегрузкам.

Электропривод постоянного тока в зоне допустимых значений работает в двигательном режиме и трех тормозных режимах, а именно рекуперативное торможение, торможение противовключением и динамическое торможение.

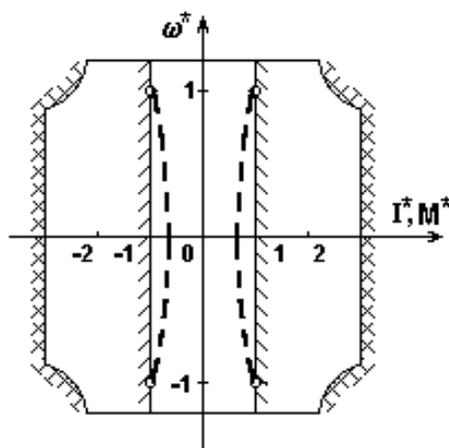


Рис.4. 6. Область допустимых нагрузок электропривода постоянного тока

#### 4.6. Номинальные режимы электропривода переменного тока

В настоящее время в связи с развитием микропроцессорной и силовой полупроводниковой техники на смену электроприводу постоянного тока пришел электропривод переменного тока, где в качестве электро-механического преобразователя энергии используют часто асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Стандартная схема силовых цепей включения короткозамкнутого асинхронного двигателя приведена на рис. 4.7.

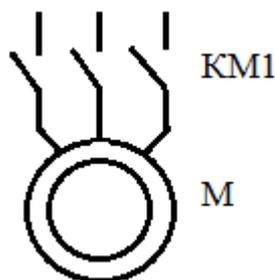


Рис. 4.7. Схема включения короткозамкнутого асинхронного двигателя с контактным пускателем

Для расчета характеристик асинхронного двигателя пользуются его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения.

На шильдике или в паспорте асинхронного двигателя обычно указаны номинальные линейные напряжения при соединении обмоток в звезду и треугольник  $U_{1Y} / U_{1\Delta}$ , токи  $I_{1Y} / I_{1\Delta}$ , частота  $f_{1H}$ , мощность на валу  $P_H$ , частота вращения  $n_H$  КПД  $\eta_H$ ,  $\cos \varphi$ .

Для двигателей с короткозамкнутым ротором в каталоге приводят кратности пускового тока  $k_i = I_{\Pi} / I_H$ , пускового момента  $k_M = M_{\Pi} / M_H$ , критического момента  $k_K = M_K / M_H$ , иногда типовые естественные характеристики.

Для двигателей с фазным ротором указывается ЭДС на разомкнутых кольцах заторможенного ротора  $E_{2H}$  при  $U_{1H}$  и номинальный ток ротора  $I_{2H}$ .

Приводимых в каталоге данных недостаточно, чтобы определить по ним параметры схемы замещения и пользоваться ей при всех расчетах, однако по каталожным данным можно построить естественную электромеханическую  $\omega = f(I)$  и механическую  $\omega = f(M)$  характеристики, воспользовавшись несколькими опорными точками рис. 4.8.

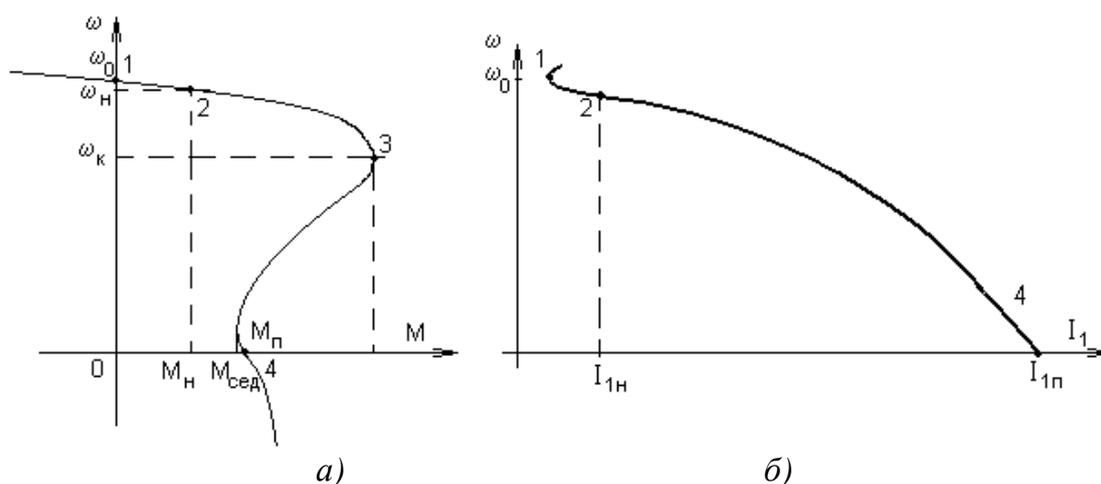


Рис. 4.8. К построению естественных характеристик асинхронного двигателя с к.з. ротором

Точка 1 ( $\omega = \omega_0, M = 0, I_1 = I_{xx} \approx 0,35I_H$ ) получится из ряда  $n_0=3000, 1500, 1000, 750, 600$  об/мин как ближайшая большая к  $n_n$ ; где  $n_0 = \frac{60f}{p}$ , а

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}.$$

Точка 2 – номинальная ( $\omega = \omega_H, M = M_H$ ).

Для определения точки 3 ( $\omega = \omega_K, M = M_K$ ) нужно рассчитать  $M_H = \frac{P_H}{\omega_H}$ , определить  $M_K = \lambda M_H$  и вычислить  $s_K$  по

$$M = \frac{2M_K}{\frac{s}{s_K} - \frac{s_K}{s}}, \text{ подставив в это уравнение } M_H \text{ и } s_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0}$$

Точка 4 ( $\omega = 0, I_1 = I_{1П}, M = M_{1П}$ ) рассчитывается непосредственно по каталожным данным.

Современные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируют так, чтобы иметь повышенный пусковой момент  $M_{1П}$ , и в некоторых каталогах указывают так называемый “седловой” момент  $M_{сед}$  - рис. 4.8 а.

Некоторое представление о характеристиках современных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором можно получить из следующих данных:

$s_H = 0,01 - 0,05$  (меньшие значения у двигателей большей мощности – сотни кВт);

$$k_i = 5 - 7;$$

$$k_M = 1,3 - 1,6;$$

$$k_K = 1,8 - 3$$

Как следует из этих данных, естественные свойства асинхронных двигателей весьма неблагоприятны: малый пусковой момент, большой пусковой ток и самое главное - ограниченные возможности управления координатами.

Естественные характеристики асинхронных двигателей, как двигателей постоянного тока, можно построить с использованием универсальных характеристик в относительных величинах. Для этого за условные базовые единицы принимают,  $U_6 = U_{1Н}, I_6 = I_{1Н}, \omega_6 = \omega_H, M_6 = M_H$  а так же вводят понятие базового сопротивления  $Z_6 = \frac{U_{1Н}}{I_{1Н}}$ .

Значением базового сопротивления широко пользуются при математическом моделировании асинхронных двигателей при разработке моделей, переводя параметры машины в относительные единицы. Относительные значения параметров машин различных мощностей, напряжений и скоростей вращения колеблются в относительно узких пределах, поэтому можно эти машины сравнивать между собой.

У асинхронных двигателей нормального исполнения относительные значения активных сопротивлений  $R_1^* \approx R_2^* = 0,01 - 0,08$ . Здесь

высшие значения относятся к машинам мощности (около 0,6 кВт), меньшие значения к машинам большой мощности (до тысячи киловатт и более)

Для машин малой мощности при  $P_H = 0,4 - 0,03$  кВт  $R_1^* = 0,12 - 0,20$ ;  $R_2^* = 0,08 - 0,12$ .

При этом относительные значения приведенного активного сопротивления ротора  $R_2^* \approx s_H$  при номинальной нагрузке. Если  $R_1^*$  разделить на  $\cos \varphi$ , значение которого указано на шильдике или в паспорте двигателя, то можно получить примерно электрические потери в статорной обмотке в долях от номинальной первичной мощности  $P_{1H} = m_1 U_{1H} I_{1H} \cos \varphi$

Обычные относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния  $X_1^* \approx X_2^* = 0,08 - 0,14 (0,09 - 0,12)$  (наиболее часто встречающиеся значения поставлены в круглых скобках) здесь большие значения относятся к машинам с большим числом полюсов, а для короткозамкнутых двигателей с глубокими пазами или двойной беличьей клеткой на роторе  $X_2^* \approx (1,1 - 1,7) X_1^*$ .

Асинхронный электропривод, как и электропривод постоянного тока, может работать в двигательном и трех тормозных режимах с таким же, как в электроприводе постоянного тока распределением потоков энергии рис 4.9.

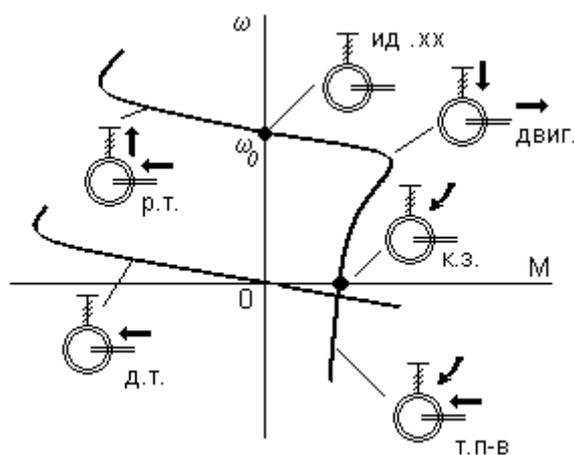


Рис. 4.9. Энергетические режимы асинхронного электропривода

Рекуперативное торможение (р.т.) осуществляется при вращении двигателя активным моментом со скоростью  $\omega > \omega_0$ . Этот же режим будет иметь место, если при вращении ротора со скоростью  $\omega$  уменьшить

скорость вращения поля  $\omega_0$ . Роль активного момента здесь будет выполнять момент инерционных масс вращающегося ротора.

Для осуществления торможения противовключением (т. п-в) необходимо поменять местами две любые фазы статора - рис. 4.10. При этом меняется направление вращения поля, машина тормозится в режиме противовключения, а затем реверсируется.

Специфическим является режим динамического торможения, которое представляет собою генераторный режим отключенного от сети переменного тока асинхронного двигателя, к статору которого подведен постоянный ток  $I_{\Pi}$ . Этот режим применяется в ряде случаев, когда после отключения двигателя от сети требуется его быстрая остановка без реверса.

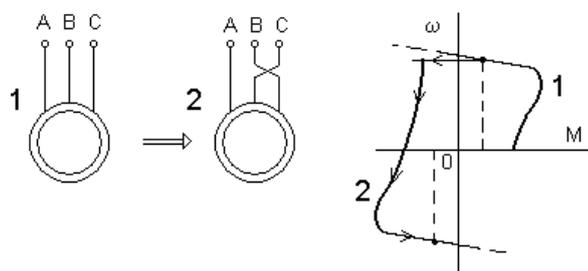


Рис. 4.10. Реверс асинхронного двигателя

Постоянный ток, подводимый к обмотке статора, образует неподвижное в пространстве поле. При вращении ротора в его обмотке наводится переменная ЭДС, под действием которой протекает переменный ток. Этот ток создает также неподвижное поле.

Складываясь, поля статора и ротора образуют результирующее поле, в результате взаимодействия с которым тока ротора возникает тормозной момент. Энергия, поступающая с вала двигателя, рассеивается при этом в сопротивлениях роторной цепи.

В режиме динамического торможения поле статора неподвижно скольжение записывается как

$$s = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (4.12)$$

и справедливы соотношения для механической характеристики

$$M = \frac{2M_{km}}{\frac{s}{s_{km}} - \frac{s_{km}}{s}}, \quad (4.13)$$

$$M_{km} = \frac{3I_{\text{эКВ}}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0(X_{\mu} + X_2')}, \quad (4.14)$$

где  $I_{\text{эКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{\text{П}}$  при соединении обмоток статора в звезду

и  $I_{\text{эКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_{\text{П}}$  при соединении обмоток статора в треугольник;

$$s_{km} = \frac{R_2'}{X_{\mu} + X_2'} \quad (4.15)$$

Так как при ненасыщенной машине,  $X_{\mu} \gg X_2'$  критическое скольжение в режиме динамического торможения  $s_{km}$  существенно меньше  $s_k$ .

#### 4.7. Регулирование координат в электроприводах переменного тока

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором - самые распространенные электрические машины - до недавнего времени использовались лишь в нерегулируемом электроприводе поскольку практически единственная возможность эффективно регулировать скорость - изменять частоту напряжения, приложенного к статорным обмоткам, была технически трудно реализуема. Сейчас, благодаря успехам электроники, ситуация кардинально изменилась, и частотно-регулируемый электропривод - рис. 4.11, стал основным типом регулируемого электропривода.

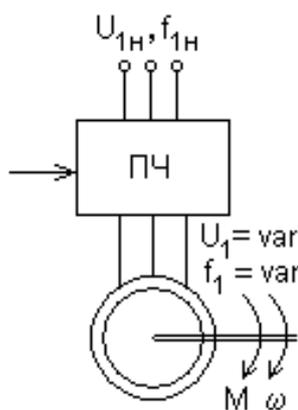


Рис. 4.11. Схема частотно-регулируемого электропривода

Область работы электропривода в общем случае задается в 2-х (неревверсивный электропривод) или 4-х (реверсивный электропривод) квадрантах плоскости координат: угловая скорость вращения  $\omega$ , рад/с, – момент  $M$ , Нм, и ограничена максимальными значениями скорости вращения  $\omega_{\text{эп.макс}}$  и момента  $M_{\text{эп.макс}}$  электропривода. Для 4-квadrантного электропривода и реактивного характера нагрузки допустимая область работы представлена на рис. 4.12.

- область длительной работы (заштрихованная область) ограничена максимальной скоростью электропривода  $\omega_{\text{эп.макс}}$ , рад/с, и интервалом изменения момента полезной нагрузки (приведенным к валу двигателя) в длительном режиме работы  $M_{\text{с.мин}} \div M_{\text{с.макс}}$ , Нм;

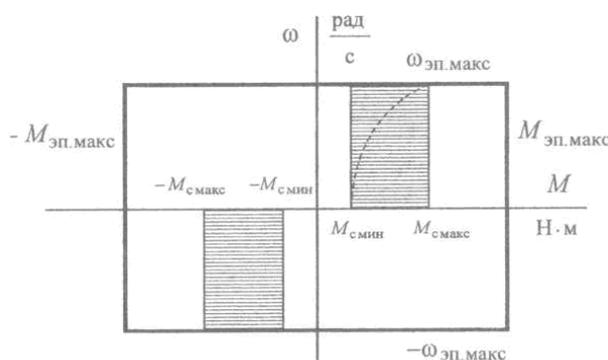


Рис.4.12. Заданная область работы однофазного электропривода

- область кратковременной работы ограничена максимальной скоростью электропривода  $\omega_{\text{эп.макс}}$ , рад/с и значением максимального момента электропривода на валу двигателя в пуско-тормозных режимах  $M_{\text{эп.макс}}$ , Нм.

Длительный режим работы электропривода происходит в первом и третьем квадрантах (в заштрихованной области на рис. 4.12), а втором и четвертом квадрантах имеют место только кратковременно протекающие процессы электрического торможения. Момент сопротивления  $M_c$  может быть постоянным по значению при изменении скорости, а может представлять собой зависимость от скорости  $M(\omega)$ , например, для механизмов с вентиляторным характером нагрузки (на рис. 4.12, показана пунктирной линией).

Как следует из выражения  $\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}$ , скорость холостого хода пропорциональна частоте  $f_1$  и не зависит для данной машины от каких-

либо других величин. Вместе с тем, изменяя  $f_1$ , следует заботиться об амплитуде напряжения, так как:

$$\Phi = \frac{U_1}{4,44k_{об}W_1f_1} \equiv \frac{U_1}{f_1}. \quad (4.16)$$

Поэтому при уменьшении  $f_1$  для сохранения магнитного потока на некотором, например, номинальном уровне следует изменять  $U_1$  так, чтобы

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1Н}}{f_1} = const$$

При увеличении частоты вверх от номинальной при  $U_1 = U_{1Н}$  поток в соответствии с (16) будет уменьшаться, и система управления электропривода реализуется как двухзонная. Механические характеристики при таком частотном регулировании имеют следующий вид рис.4.13.

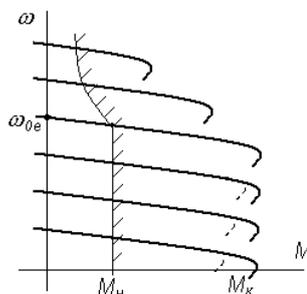


Рис. 4.13. Механические характеристики частотно-регулируемого электропривода

Заданную допустимую область работы электропривода при двухзонном регулировании можно представить в виде рис. 14.

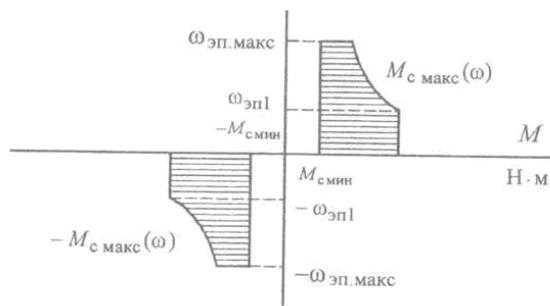


Рис. 4.14. Заданная область работы электропривода при двухзонном регулировании.

Выбор асинхронных электродвигателей по мощности и скорости для конкретных механизмов производится с учетом режима и характеристик допустимого длительного и кратковременного моментов двигателя в интервале заданного диапазона регулирования скорости. Электродвигатели по мощности выбираются методами эквивалентных величин: эквивалентного тока при переменном потоке и эквивалент-

ного момента при постоянном потоке двигателя в зоне регулирования скорости. Характеристика допустимого длительного момента учитывает условия охлаждения, а характеристика допустимого кратковременного момента - перегрузочную способность двигателя конкретного конструктивного исполнения при изменении скорости вращения. Регулирование скорости вращения асинхронных электродвигателей в системе «преобразователь частоты - электродвигатель» может производиться как в первой зоне ниже номинальной скорости вращения двигателя, так и во второй зоне выше номинальной скорости.

## Глава 5. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Безвозвратно теряемая энергия в электродвигателях преобразуется в тепло и способствует нагреванию отдельных их частей и элементов. Для хорошей надежности работы и достижения продолжительного срока службы нагревание электродвигателей должно обязательно ограничиваться. Самыми чувствительными частями в отношении нагрева являются изоляционные материалы. Именно их качеством обуславливается предельно допустимые уровни нагрева электродвигателей. Главное значение имеет создание благоприятных условий охлаждения электродвигателей и отвода от них излишнего тепла. Имеющиеся потери энергии в электрической машине становятся больше с увеличением механической нагрузки, которая оказывается на оси данного электродвигателя, а вместе с этим увеличивается и общее нагревание всей электрической машины. По этой причине максимальная мощность нагрузки на электродвигатель, что допускается для данной электрической машины, изначально определяется в основном вполне допустимой степенью ее теплового нагревания, а также имеющейся механической прочностью различных частей электрической машины, условиями съема тока на контактах и т.д.

### 5.1. Потери энергии в установившихся и переходных процессах электропривода

Анализ потерь энергии в различных режимах электропривода важен как с точки зрения анализа экономичности работы системы, так и для оценок теплового состояния двигателей при выборе при проверке их по условиям нагрева.

Активная доля потерь в электроприводе – это потери в электродвигателе. В общем случае мощность потерь энергии в двигателях удобно представлять в виде суммы постоянных потерь  $\Delta P_C$ , не зависящих от нагрузки, и переменных потерь  $\Delta P_V$ , которые пропорциональны нагрузке двигателей:

$$\Delta P = \Delta P_C + \Delta P_V. \quad (5.1)$$

К постоянным потерям  $\Delta P_C$  относятся: потери в стали  $\Delta P_{СТ}$ , механические потери  $\Delta P_{мех}$  (потери от трения в подшипниках и вентиляционные потери).

Для ДПТ независимого возбуждения и синхронных двигателей потери в обмотках возбуждения

$$\begin{aligned}\Delta P_B &= I_B \cdot R_B; \\ \Delta P_C &= \Delta P_{CT} + \Delta P_{Mex} + \Delta P_B.\end{aligned}\quad (5.2)$$

Строго говоря, постоянные потери в действительности не являются неизменными, а зависят от скорости двигателя, амплитуды и частоты питающего напряжения.

Однако, так как постоянные потери изменяются незначительно, они обычно принимаются неизменными и равными номинальным постоянным потерям

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}.\quad (5.3)$$

Под переменными понимаются потери, выделяемые в обмотках двигателей при протекании по ним тока, зависящего от механической нагрузки ЭП:

- для двигателей постоянного тока (ДПТ)

$$\Delta P_V = I_{я}^2 \cdot R_{я},\quad (5.4)$$

- для асинхронных двигателей (АД)

$$\Delta P_V = 3I_1^2 \cdot R_1 + 3(I_2')^2 \cdot R_2'.\quad (5.5)$$

Для АД при небольшом диапазоне изменений токов, когда  $I_{\mu(0)} \approx const$ , при малых скольжениях

$$\Delta P_V = 3(I_1^2) \cdot R_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) = 3(I_2')^2 \cdot (R_2' + R_1).\quad (5.6)$$

При токах, соответствующих номинальным режимам двигателей при работе на естественных характеристиках, переменные потери можно определить по данным двигателя.

Запишем общее выражение для переменных потерь в виде

$$\Delta P_V = \Delta P_{V'} \cdot k_i^2,\quad (5.7)$$

где  $k_i$  - кратность тока двигателей.

$$\begin{aligned}\text{ДПТ} - k_i &= \frac{I_{я}}{I_{яH}}; \\ \text{АД} - k_i &= \frac{I_2'}{I_2'_{H}}; \\ \text{СД} - k_i &= \frac{I_1}{I_{1H}}.\end{aligned}$$

Вводя отношение постоянных потерь к номинальным переменным

$$\alpha = \frac{\Delta P_C}{\Delta P_{vH}},$$

суммарные потери можно представить следующим выражением:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{vH} (\alpha + k_i^2). \quad (5.8)$$

Значение коэффициента  $\alpha = 0,5 \div 2$  – зависит от номинальной мощности, скорости и исполнения двигателя.

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения и асинхронного двигателя переменные потери могут быть определены через электромагнитный момент и относительную скорость двигателя:

Потребляемая мощность ДПТ независимого возбуждения

$$P_1 = U \cdot I = M \cdot \omega_0. \quad (5.9)$$

Электромагнитная механическая мощность

$$P_{\omega} = M \cdot \omega; \quad (5.10)$$

$$\Delta P_v = P_1 - P_{\omega} = M \cdot \omega_0 - M \cdot \omega = M(\omega_0 - \omega) \cdot \frac{\omega_0}{\omega_0} = m_1 \cdot \frac{\Delta \omega}{\omega_0};$$

$$\Delta P_H = U_H \cdot I_H - P_H,$$

либо через  $\eta_H$

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H},$$

где  $\Delta \omega$  - перепад угловой скорости, обусловленный моментом  $M$ ,  
 $\omega_0$  - скорость идеального х.х.

Для АД:

$$\Delta P_v = M \omega_0 \cdot s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = \Delta P_{vp} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right); \quad (5.11)$$

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H},$$

где  $\Delta P_{vp}$  - переменные потери в роторе,

$$\Delta P_{vp} = M \omega_0 - M \cdot \omega = M \cdot \omega_0 \cdot s;$$

Полученные выше соотношения относились к статическим установившимся режимам работы двигателей.

Возникшие при пуске, реверсе, торможении, изменении скорости, сбросе и набросе нагрузки токи, как правило, превышают номинальный уровень. По этой причине выделяющиеся в двигателе и других элементах ЭП потери могут быть весьма значительными и существенно влиять на энергетические показатели работы ЭП.

Особенно большое значение определение потерь электроэнергии в переходных процессах имеет для ЭП, у которых динамический режим является основным. К ним относятся, например, ЭП прокатных станков, строгальных станков, лифтов и т.д.

В общем случае потери энергии за время переходного процесса  $t_{п.п.}$  определяются следующим выражением:

$$\Delta A_{п.п.} = \int_0^{t_{п.п.}} \Delta P(t) \cdot dt = \int_0^{t_{п.п.}} [\Delta P_C(t) + \Delta P_V(t)] dt = \Delta A_C + \Delta A_V \quad (5.12)$$

Суммарные потери энергии в переходном процессе определяются выражением:

$$\Delta A_{п.п.} = \int_0^{t_{п.п.}} \Delta P(t) \cdot dt = \int_0^{t_{п.п.}} [\Delta P_C(t) + \Delta P_V(t)] dt = \Delta A_{п.п.С} + \Delta A_{п.п.V}$$

Так как по сравнению с переменными постоянные потери в переходном процессе малы, то в дальнейшем они учитываться не будут.

Для двигателя постоянного тока н.в. потери при пуске равны:

$$\Delta A_{п.} = \int_0^{t_{п.п.}} M(\omega_0 - \omega) dt \quad (5.13)$$

Если пуск совершается вхолостую (при  $M_c=0$ ), то из уравнения движения следует  $dt = J \frac{d\omega}{M}$ , тогда

$$\Delta A_{п.0} = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 - \omega) dt,$$

или

$$\Delta A_{п.0} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (5.14)$$

Следовательно, потери энергии при пуске двигателя вхолостую определяются запасом кинетической энергии, накопленной массами привода к концу пуска, Полезная работа (затраченная на пуск привода), произведенная двигателем за время пуска вхолостую, также равна запасу кинетической энергии, накопленной массами за этот период:

Расход электрической энергии из сети равен:

$$A_{эл} = J \cdot \omega_0^2. \quad (5.15)$$

При пуске двигателя под нагрузкой в предположении, что  $M_c = \text{const}$ , потери энергии

$$\Delta A_{п.} = \int_0^{t_{п.}} M(\omega_0 - \omega) dt = \int_0^{t_{п.}} (M_{дин} + M_c)(\omega_0 - \omega) dt. \quad (5.16)$$

Так как  $dt = \frac{J d\omega}{M_{дин}}$ , то после преобразований

$$\Delta A_{\Pi} = \int_0^{\omega_c} J(\omega_0 - \omega) d\omega + M_C \int_0^{t_{\Pi}} (\omega_0 - \omega) dt,$$

или

$$\Delta A_{\Pi} = J \left( \omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_C \left( \omega_0 t_{\Pi} - \int_0^{t_{\Pi}} \omega \cdot dt \right). \quad (5.17)$$

Первый член выражения (5.17) представляет собой потери энергии в якорной цепи, обусловленные разгоном инерционных масс привода ( $\Delta A_{\text{дин}}$ ), а второй – потери, вызванные наличием момента нагрузки ( $\Delta A_{\text{П.С}}$ ).

Выражение (5.17) можно записать так:

$$\Delta A_{\Pi} = \Delta A_{\text{дин}} + \Delta A_{\text{П.С}}.$$

Если  $\omega_c \approx \omega_0$ , то

$$1. \Delta A_{\text{дин}} = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

$$2. \Delta A_{\text{П.С}} = M_C \left( \omega_0 \cdot t_{\Pi} - \int_0^{t_{\Pi}} \omega dt \right).$$

Подсчет  $\Delta A_{\text{П.С}}$  можно произвести графически, если имеется зависимость  $\omega = f(t)$ .

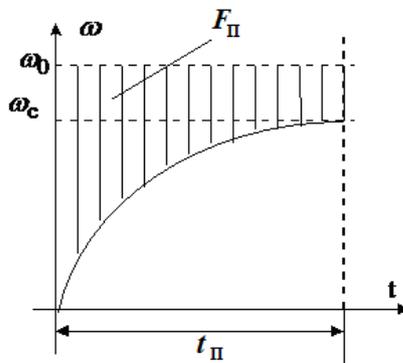


Рис. 5.1. Потери мощности от момента сопротивления

$$\text{Потери в якорной цепи } \Delta A_{\text{.}} = J \left( \omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_C \cdot F_{\Pi}.$$

Потери энергии при торможении противовключением вхолостую определяются по формуле

$$\Delta A_{\text{Т,С0}} = \int_{\omega_0}^0 J(-\omega_0 - \omega) d\omega = \int_0^{\omega_0} J(\omega_0 + \omega) d\omega$$

или

$$\Delta A_{T, \Pi 0} = 3J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (5.18)$$

Таким образом, потери при торможении противовключением вхолостую равны тройному запасу кинетической энергии, т.е. в 3 раза превышают потери энергии при пуске вхолостую.

При торможении противовключением под нагрузкой  $M_C = \text{const}$  потери энергии можно определить по формуле

$$\Delta A_{T, \Pi} = J \left( \omega_0 \cdot \omega + \frac{\omega_c^2}{2} \right) - M_C \int_0^{t_T} (\omega_0 + \omega) dt$$

или

$$\Delta A_{T, \Pi} = J \left( \omega_0 \cdot \omega + \frac{\omega_c^2}{2} \right) - M_C \left( \omega_0 \cdot t_T + \int_0^{t_T} \omega dt \right). \quad (5.19)$$

Аналогично предыдущему можно обозначить

$$\omega_0 \cdot t_T + \int_0^{t_T} \omega dt = F_T.$$

Окончательно

$$\Delta A_{T, \Pi} = J \left( \omega_0 \omega_c + \frac{\omega_c^2}{2} \right) - M_C \cdot F_T. \quad (5.20)$$

Из этого выражения следует, что потери энергии при торможении двигателя под нагрузкой меньше, чем вхолостую. При динамическом торможении якорь двигателя отключается от сети и замкнут на резистор, поэтому кинетическая энергия, запасенная в массах ЭП, превращается в электрическую энергию и выделяется в виде теплоты в якорной цепи.

Потери энергии в якорной цепи двигателя при динамическом торможении вхолостую

$$\Delta A_{T, Д0} = - \int_{\omega_0}^0 J \omega_0 d\omega = \int_0^{\omega_0} J \omega \cdot d\omega,$$

или

$$\Delta A_{T, Д0} = J \frac{\omega_0^2}{2}. \quad (5.21)$$

Если динамическое торможение производится под нагрузкой ( $M_C = \text{const}$ ), то потери энергии в якорной цепи:

$$\Delta A_{T, Д} = J \frac{\omega_c^2}{2} - M_C \int_0^{t_T} \omega dt.$$

Потери энергии в якорной цепи двигателя при реверсировании без нагрузки

$$\Delta A_{p0} = \int_{\omega_0}^{-\omega_0} J(-\omega_0 - \omega) d\omega = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} J(\omega_0 + \omega) d\omega = 4 \frac{J\omega_0^2}{2}. \quad (5.22)$$

Из этого выражения можно видеть, что потери энергии при реверсировании складываются из суммы потерь энергии при торможении противовключением и пуске.

Для определения потерь энергии при реверсировании под нагрузкой можно воспользоваться формулой

$$\begin{aligned} \Delta A_p &= \Delta A_{\Pi} + \Delta A_{T.П.} = \\ &= J \left( \omega_0 \omega_c - \frac{\omega_c^2}{2} \right) + M_c \cdot F_{\Pi} + J \left( \omega_0 \cdot \omega_c + \frac{\omega_c^2}{2} \right) - M_c \cdot F_T \end{aligned} \quad (5.23)$$

Из рассмотренного выше можно сделать следующие выводы:

- При управлении ДПТ независимого возбуждения при  $M_c = 0$  от источника под напряжением потери энергии не зависят от времени переходного процесса, а значит, и от формы механической характеристики двигателя, и определяются только диапазоном изменения скорости в переходном режиме.

- В переходных процессах со статической нагрузкой на валу к мощности потерь, определяемой переходным процессом при холостом ходе, добавляется составляющая, связанная с нагрузкой.

- Потери энергии при  $M_c \neq 0 = \text{const}$  зависят от характера статического момента и формы механической характеристики двигателя.

Пусковые потери в асинхронном двигателе, если пренебречь постоянной составляющей потерь  $\Delta P_c$  и влиянием тока х.х. (т.е считать  $I_1 \approx I_2'$ ) можно определить по формуле:

$$\Delta A_{\Pi} = \int_0^t 3I_2'^2 (R_1 + R_2' + R_{2\text{доб}}') dt, \quad (5.24)$$

при  $M_c = 0 \quad dt = - \left( J \frac{\omega_0}{M} \right) ds.$

Выражая потери мощности в роторной цепи через мощность скольжения, т.е.

$$3I_2'^2 (R_2' + R_{2\text{доб}}') = M \omega_0 \cdot s$$

в результате несложных преобразований получаем:

$$\Delta A_{\Pi} = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} J \omega_0^2 \cdot s \left[ 1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right] ds, \quad (5.25)$$

или, учитывая, что  $s_{\text{нач}} = 1$ ,  $s_{\text{кон}} = 0$

$$\Delta A_{\Pi_0} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2\text{доб}}} \right) \quad (5.26)$$

для АД с к.з.  $R'_{2\text{доб}} = 0$ .

Из (5.26) следует, что потери при пуске состоят из:

- потерь в роторной цепи  $J \frac{\omega_0^2}{2} = \Delta A_{\Pi_0}$ , определяемых запасом кинетической энергии к концу пуска;
- потерь в статорной цепи, зависящих от активных сопротивлений

$$\Delta A_{\Pi_01} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2 + R'_{2\text{доб}}} \right),$$

статора и ротора.

Уменьшение потерь в статоре и роторе вторичного сопротивления объясняется уменьшением пускового тока для АД с к.з.

$$\Delta A_{\Pi_01} = \frac{J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R'_2} \right).$$

За счет применения двигателей со специальной конструкцией к.з. ротора, имеющего повышенное сопротивление, может быть достигнуто уменьшение потерь в статоре.

Это двигатели со сплошным стальным ротором и двигатели с повышенным номинальным скольжением, двигатели, имеющие ротор с глубокими пазами или ротор с двойной беличьей клеткой (двигатели типа Бушера).

Потери в роторной цепи при пуске вхолостую для всех типов двигателей определяются запасом кинетической энергии.

Потери энергии при пуске АД под нагрузкой ( $M_c = \text{const}$ )

$$\Delta A_{\Pi} \approx \Delta A_{\Pi_0} \frac{M_{\Pi\text{ср}}}{M_{\Pi\text{ср}} - M_{\text{ср}}}, \quad (5.27)$$

где  $M_{\Pi\text{ср}} = \frac{(\lambda - \lambda_{\Pi})M_{\text{н}}}{2}$  – средний пусковой момент АД;

$$\lambda = \frac{M_k}{M_{\text{н}}}; \quad \lambda_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{н}}}; \quad M_{\Pi} - \text{пусковой момент (момент к.з.)}$$

Потери энергии в АД при торможении противовключением могут быть найдены по формуле (5.26) при подстановке в нее пределов интегрирования  $s_{\text{нач}} = 2$ ,  $s_{\text{кон}} = 1$

$$\Delta A_{T, \Pi_0} = \frac{3J\omega_0^2}{2} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2' + R_{2\text{доб}}'} \right), \quad (5.28)$$

если под нагрузкой ( $M_C = \text{const}$ )

$$\Delta A_{T, \Pi} = \Delta A_{T, \Pi_0} \frac{M_{T, \text{ср}}}{M_{T, \text{ср}} - M_C}, \quad (5.29)$$

где  $M_{T, \text{ср}}$  – средний момент, развиваемый АД при торможении противовключением.

Потери энергии в роторной цепи в период динамического торможения вхолостую определяются запасом кинетической энергии, которую приобретает привод к началу торможения

$$\Delta A_{T, \text{дин}0_2} = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

Потери в статоре в этом случае:

$$\Delta A_{T, \text{дин}0_1} = 3I_{\text{эkv}}'^2 \cdot R_1 \cdot t_T, \quad (5.30)$$

где  $I_{\text{эkv}}$  – эквивалентный ток статора,  $t_T$  – время динамического торможения.

Если динамическое торможение происходит под нагрузкой ( $M_C = \text{const}$ ), то потери в роторе

$$\Delta A_{T, \text{дин}2} = \Delta A_{T, \text{дин}0_2} \frac{M_{T, \text{дин.ср}}}{M_{T, \text{дин.ср}} + M_C}. \quad (5.31)$$

Потери в статоре для этого случая определяются по предыдущей формуле с учетом того, что время торможения будет меньше при том же значении  $I_{\text{эkv}}$ .

## 5.2. Нагрев и охлаждение двигателей

Анализ теплового состояния двигателей позволяет оценить степень его загрузки по мощности. Если анализ показывает, что нагрев двигателя близок или равен нормативному, значит двигатель хорошо использован по мощности. Электропривод в этом случае имеет высокий КПД и коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ).

Если же нагрев двигателя меньше нормативного, то это свидетельствует о недогрузке двигателя и несоответствии его требуемой мощности.

При проведении анализа теплового состояния двигателя необходимо учитывать класс применяемой в двигателях изоляции.

Изоляция класса А (допустимая предельная температура нагрева  $105^{\circ}$ ), класса Е ( $120^{\circ}$ ), класса Н ( $180^{\circ}$ ), класса В ( $130^{\circ}$ ), класса С ( $180^{\circ}$ ) и класса F ( $155^{\circ}$ ).

Точное исследование процессов нагрева и охлаждения двигателей представляет собой сложную задачу, его обычно в ЭП проводят со следующими допущениями:

1. Двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках.
2. Теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды.
3. Окружающая среда обладает бесконечно большой теплоемкостью, т.е. температура ее не изменяется в процессе нагрева двигателя.
4. Теплоемкость двигателя и его коэффициент теплоотдачи не зависят от температуры двигателя.

Для определения характера изменения температуры двигателя рассмотрим уравнение теплового баланса для двигателя.

$$\Delta P dt = A \cdot \tau \cdot dt + C \cdot d \cdot \tau, \quad (5.32)$$

где  $\Delta P$  - потери мощности в двигателе;  $A$  - теплоотдача двигателя (количество тепла, отдаваемого двигателем в окружающую среду за 1 с при разности температур двигателя и окружающей среды  $1^{\circ}\text{C}$ ) [Дж/с $\cdot^{\circ}\text{C}$ ];  $C$  - теплоемкость двигателя - количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на  $1^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau = t_{\text{Дв}}^{\circ} - t_{\text{о.с}}^{\circ}$  - превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды.

Разделим обе части уравнения на произведение  $A \cdot dt$ , получим

$$\frac{\Delta P}{A} = \tau + \frac{C}{A} \cdot \frac{d\tau}{dt}, \quad (5.33)$$

то есть, тепловые процессы в двигателе описываются при принятых допущениях линейным дифференциальным уравнением 1-го порядка. При постоянных потерях, т.е.  $\Delta P = \text{const}$  его решение будет иметь вид:

$$\tau = (\tau_{\text{нач.}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-t/T_{\text{H}}} + \tau_{\text{уст}}, \quad (5.34)$$

где  $\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A}$  - установившееся превышение температуры двигателя;

$T_{\text{H}} = \frac{C}{A}$  - постоянная времени нагрева двигателя.

Физический смысл постоянной времени нагрева  $T_H$  состоит в том, что она равна времени нагрева двигателя до установившегося превышения температуры  $\tau_{уст}$ , если бы отсутствовала отдача тепла окружающей среде.

Выражение (5.34) может быть использовано для исследования изменения перегрева двигателя как при его нагреве, так и при охлаждении. Необходимо лишь в (5.34) подставлять соответствующие значения  $\tau_{нач.}$  и  $\tau_{уст}$  и постоянной времени. Процессы нагрева и охлаждения некоторых типов двигателей характеризуются различными постоянными времени, так как постоянная времени обратно пропорциональна теплоотдаче двигателя. Количественно ухудшение теплоотдачи характеризуется коэффициентом ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе).

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A}, \quad (5.35)$$

где  $A_0, A$  - теплоотдача при неподвижном двигателе и номинальной скорости.

Примерные значения коэффициента  $\beta_0$  для двигателей с различной системой охлаждения приведены в таблице 2.

Таблица 2

*Коэффициентом ухудшения теплоотдачи*

Исполнение двигателя	$\beta_0$
1. Закрытый с независимой вентиляцией	1
2. Закрытый без принудительного охлаждения	0,95 ÷ 0,98
3. Закрытый самовентилируемый	0,45 ÷ 0,55
4. Защищенный самовентилируемый	0,25 ÷ 0,35

С учетом (5.35) постоянная времени охлаждения при неподвижном двигателе составляет

$$T_0 = C/A_0 = C/(A\beta_0) = T_H/\beta_0. \quad (5.36)$$

Так как  $\beta_0 \leq 1$ , то  $T_0 \geq T_H$ , т.е. охлаждение неподвижного двигателя происходит медленнее, чем нагрев. Обычно постоянная времени нагрева двигателей находится в пределах от нескольких минут до нескольких часов.

Прямой метод проверки двигателя по нагреву предусматривает построение с помощью (5.34) кривой  $\tau(t)$ , определение по ней  $\tau_{\max}$  и проверку условия

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}.$$

Однако практическое применение этого метода затруднено в связи с тем, что при этом необходимо знать основные тепловые параметры двигателя:  $A$ ,  $C$ ,  $T_H$ . Поскольку эти параметры не приводятся в каталоге на двигатели, а расчет их трудоемок и приближителен, то на практике задача проверки двигателей по нагреву решается обычно с помощью косвенных методов. К ним относятся: метод средних потерь и методы эквивалентных величин тока, момента и мощностью. Эти методы можно использовать во всех режимах работы двигателей.

### 5.3. Выбор мощности двигателя при продолжительном режиме работы S1

Выбор электродвигателя, в общем предполагает:

а) *выбор рода тока и номинального напряжения*, исходя из экономических соображений, с учетом того, что самыми простыми, дешевыми и надежными являются асинхронные двигатели, а самыми дорогими и сложными – двигатели постоянного тока.

б) *выбор номинальной частоты вращения*,

в) *выбор конструктивного исполнения двигателя*, учитывая три фактора: защиту его от воздействия окружающей среды, способ и обеспечение охлаждения, и способ монтажа.

В продолжительном режиме правильно выбранный двигатель должен работать сколь угодно долго, не перегреваясь, сверх допустимого значения температуры. Электропривод, работая в продолжительном режиме, может иметь нагрузку:

А) Длительную нагрузку постоянную (механизмы непрерывного действия обладают такой характеристикой);

Б) Длительную переменную (механизмы циклического действия).

#### 5.3.1. Нагрузка длительная и постоянная

1. Если нагрузка длительная и постоянная, то мощность двигателя может быть определена в соответствии с нагрузкой и КПД у механизма:

$$P_{\text{рас}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta}, \quad (5.37)$$

где  $P_{\text{мех}}$  - мощность производственного механизма, которая определяется на основании технических данных или по имеющейся тахограмме и нагрузочной диаграмме.

$$P_{\text{мех}} = M_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{max,мех}} ;$$

$\eta$  – КПД механизма.

По расчетной мощности выбирают по каталогу двигатель с мощностью  $P_{\text{н}} \geq P_{\text{рас}}$ . Т.е. в этом случае выполняется и условие

$$\Delta P_{\text{н}} \geq \Delta P \text{ и } \tau_{\text{max}} = \tau_{\text{уст}} \leq \tau_{\text{доп}},$$

где  $\tau_{\text{доп}}$  – допустимое превышение температуры двигателя.

Поэтому в дальнейшем при постоянной нагрузке не требуется дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя.

Для тяжелых условий пуска дополнительно осуществляется проверка величины пускового момента двигателя так, чтобы он превышал момент сопротивления механизма. Пусковой момент, Нм,

$$M_{\text{п}} = M_{\text{н}} \cdot k_i \text{ а } P_{\text{н}} = M_{\text{н}} \cdot \omega_{\text{н}}$$

**Примеры расчета.** Нагрузка длительная и постоянная, то мощность двигателя определенного технологического процесса может быть определена по расчетным формулам.

**Мощность двигателя для главного привода  
токарного станка**

$$P = \left( F \cdot V \cdot 10^{-3} / \eta_{\text{ст}} \right), \text{ кВт}$$

где  $F$  - сила резания, Н;  $V$  - скорость резания, м/с;  $\eta_{\text{ст}}$  - КПД станка.

**Мощность двигателя для центробежного насоса**

$$P = \left( k \cdot g \cdot \rho \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} / \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{п}} \right), \text{ кВт}$$

$k$  – (1,1 ÷ 1,3) - коэффициент, учитывающий изменение режима работы насоса;

$g$  – 9,81 м/с<sup>2</sup> - ускорение силы тяжести,

$\rho$  - плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$Q$  – количество перекачиваемой жидкости в единицу времени (подача насоса) м<sup>3</sup>/с;

$H$  – общая расчетная высота подачи, м;

$\eta_{\text{нас}}$  - КПД насоса;

$\eta_{\text{п}}$  - КПД передаточного устройства.

**Мощность двигателя для вентилятора**

$$P = \frac{(k \cdot Q \cdot h \cdot 10^{-3})}{\eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{п}}}, \text{ кВт}$$

где  $k$  – коэффициент запаса ( $k = 1,1 \div 1,2$  при  $P > 5$  кВт,  $k = 1,5$  при  $P < 5$  кВт);  $Q$  – количество нагнетаемого воздуха, м<sup>3</sup>/с;  $h$  - давление вентилятора, Па.

### 5.3.2. Нагрузка переменная

Если нагрузка переменная, то в этом случае мощность двигателя определяется по нагрузочным диаграммам, снятым регистрирующими приборами или полученными расчетным путем.

Последовательность выбора двигателя по мощности следующая:

1. На основании нагрузочной диаграммы и тахограммы предварительно рассчитывают мощность и выбирают двигатель. То есть, если  $M_c = f(t)$  известен и имеет переменный характер, то находим  $M_{C_{\text{эkv}}}$

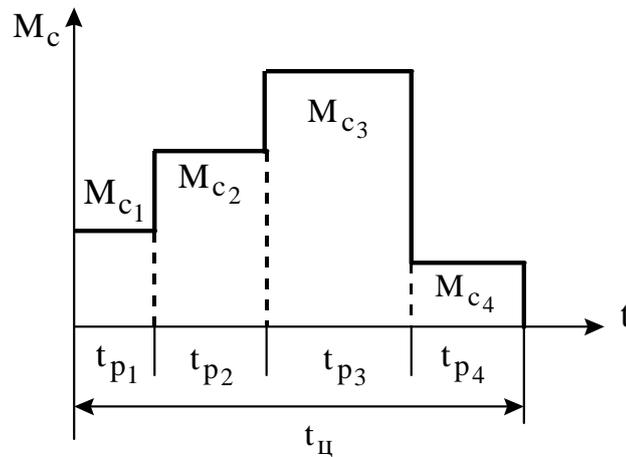


Рис.5.2. Пример нагрузочной диаграммы

$$M_{C_{\text{эkv}}} = \sqrt{\frac{M_{c_1}^2 \cdot t_{p_1} + M_{c_2}^2 \cdot t_{p_2} + M_{c_3}^2 \cdot t_{p_3} + M_{c_4}^2 \cdot t_{p_4}}{t_{p_1} + t_{p_2} + t_{p_3} + t_{p_4}}} \cdot k_{\text{зап}}, \quad (5.38)$$

$$P_{\text{рас}} = (1,1 \div 1,3) \cdot M_{C_{\text{эkv}}} \cdot \omega_{\text{max}},$$

где  $k_3$  - коэффициент, учитывающий возможные динамические нагрузки;  $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{мех}_{\text{max}}} \cdot i$ ;  $i$  - передаточное число редуктора;  $\omega_{\text{мех}_{\text{max}}}$  - максимальная скорость механизма.

Предварительно выбираем двигатель:

$$P_{\text{H}} \geq P_{\text{рас}}$$

$$\omega_{\text{H}} \geq \omega_{\text{max}}$$

2. Рассчитывают переходные процессы и строят нагрузочную диаграмму электропривода.

3. Проверяют предварительно выбранный двигатель по перегрузочной способности и нагреву.

#### 5.4. Проверка двигателей по нагреву методом средних потерь и эквивалентных величин

Так как проверка по нагреву прямым методом затруднена, то пользуются косвенными методами, к которым относятся:

- а) метод средних потерь;
- б) метод эквивалентного тока;
- в) метод эквивалентного момента;
- г) метод эквивалентной мощности.

**Метод средних потерь** является наиболее точным и универсальным из косвенных методов. Сущность этого метода заключается в определении средних потерь мощности  $\Delta P_{cp}$  за цикл работы двигателя с последующим сопоставлением их с номинальными потерями мощности  $\Delta P_H$ , на основании чего делается заключение о нагреве двигателя.

При использовании этого метода рассматривается достаточно удаленный цикл работы двигателя, в котором среднее значение превышения температуры  $\tau_{cp}$  не изменяется.

В этом случае уравнение теплового баланса для цикла имеет вид:

$$\int_0^{t_{ц}} \Delta P \cdot dt = A \cdot \tau_{cp} \cdot t_{ц} ; \quad (5.39)$$

$$\tau_{cp} = \int_0^{t_{ц}} \Delta P \cdot dt / (A \cdot t_{ц}) = \Delta P_{cp} / A ; \quad (5.40)$$

где  $\int_0^{t_{ц}} \frac{\Delta P \cdot dt}{t_{ц}}$  – средние потери мощности за цикл.

Условием правильности выбора по нагреву должно быть условие:

$$\tau_{cp} \leq \tau_{доп}, \text{ т.к. } \tau_{доп} = \frac{\Delta P_H}{A}, \text{ то можно записать, что}$$

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_H; \quad \Delta P_{cp} = \frac{1}{t_{ц}} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot t_i,$$

где  $t_i$  – продолжительность  $i$ -го участка;  $n$  – количество участков цикла;  $\Delta P_i$  - потери мощности на  $i$ -том участке.

То есть, если средняя мощность потерь за цикл не превосходит номинальную мощность потерь, то двигатель выбран правильно и его температура не превысит допустимую.

Если  $\Delta P_{cp} > \Delta P_H$ , то двигатель будет перегреваться, что недопустимо.

Если  $\Delta P_{\text{ср}} \ll \Delta P_{\text{н}}$ , то двигатель будет плохо использовать по нагреву.

В обоих случаях необходимо выбрать другой двигатель, перестроить нагрузочную диаграмму ЭП и вновь проверить двигатель.

На методе средних потерь базируются методы эквивалентных величин.

Если в качестве нагрузочной диаграммы имеются кривые тока в функции времени, то при некоторых условиях можно произвести проверку двигателя по нагреву без вычисления потерь, воспользовавшись методом эквивалентного тока.

*Метод эквивалентного тока* основан на том, что действительная протекающая в двигателе сила тока при различных нагрузках заменяется в расчетах эквивалентной силой тока  $I_{\text{ЭКВ}}$  неизменной величины, создающей в двигателе за рассматриваемый промежуток времени те же потери, что и действительная протекающая сила тока.

$\Delta P_{\text{ср}} = \Delta P_{\text{с}} + I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R$  – потери в двигателе при эквивалентном токе,

$\Delta P_{\text{с}}$  – постоянные потери (механические, вентиляционные, потери в стали зависят от напряжения и скорости).

Подставляя это равенство в формулу для определения средних потерь, получим:

$$\Delta P_{\text{с}} + I_{\text{ЭКВ}}^2 \cdot R = \frac{(\Delta P_{\text{с}} + I_1^2 R) \cdot t_1 + (\Delta P_{\text{с}} + I_2^2 \cdot R) \cdot t_2 + \dots + (\Delta P_{\text{с}} + I_n^2 \cdot R) \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

После преобразований получим:

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + I_2^2 \cdot t_2 + \dots + I_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (5.41)$$

или в общем случае при произвольной форме тока

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} i^2(t) dt}, \quad (5.42)$$

где  $t_{\text{ц}}$  – время цикла.

Величина эквивалентной силы тока сопоставляется с номинальной силой тока выбранного двигателя, т.е.

$$I_{\text{ЭКВ}} \leq I_{\text{н}}.$$

Двигатель также должен быть проверен по допустимой перегрузке из условия

$$\frac{I_{\text{max нагр}}}{I_{\text{н}}} \leq k_i,$$

где  $I_{\max \text{ нагр}}$  – максимальное значение силы тока из графика нагрузки;

$k_i$  - допустимый коэффициент перегрузки двигателя по силе тока.

Метод эквивалентного тока применим в том случае, если потери в стали и механические потери не зависят от нагрузки и величина сопротивления главной цепи двигателя остается постоянной на всех участках заданного графика нагрузки.

В ряде случаев при проверке двигателя по нагреву удобно пользоваться графиком момента, развиваемого двигателем в функции времени.

*Метод эквивалентного момента* Если поток двигателя постоянен, то между током и моментом существует прямая пропорциональность ( $M = c \cdot I$ ). В этих случаях возможна проверка двигателя по эквивалентному моменту, который для ступенчатого графика вычисляется по формуле:

$$M_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots + M_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.43)$$

Если  $M_{\text{экр}} \leq M$ , то двигатель удовлетворяет условиям нагрева. Этот метод применим для проверки синхронных, асинхронных двигателей нормального исполнения и д.п.т. независимого возбуждения при работе с  $\Phi = \Phi_H = \text{const}$ . Выбранный двигатель необходимо проверить на перегрузочную способность и условие пуска:

$$M_{\max_{\text{гп}}} \leq \lambda \cdot M_H \quad \lambda = \frac{M_{\max}}{M_H};$$

$$M_{\text{п,гп}} \leq \lambda_{\text{п}} \cdot M, \quad \lambda_{\text{п}} = \frac{M_{\max}}{M_H}.$$

Если нагрузочная диаграмма двигателя задана в виде графика мощности, то проверка двигателя по нагреву на основе этого графика может быть произведена непосредственно лишь в тех случаях, когда между мощностью и током существует прямая пропорциональность, что имеет место при работе двигателя с постоянным потоком и скоростью.

*Метод эквивалентной мощности.* Для ступенчатого графика эквивалентная мощность определяется:

$$P_{\text{экр}} = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots + P_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (5.44)$$

Если  $P_{\text{экр}} \leq P_H$ , то двигатель выбран верно. Этот метод применим для проверки по нагреву синхронных, асинхронных двигателей нормального исполнения и ДПТ независимого возбуждения с номинальным

потоком и постоянной или мало меняющейся скоростью вращения. Методом эквивалентной мощности можно воспользоваться и в случае переменной угловой скорости, если привести мощность при угловой скорости  $\omega_i$  к эквивалентной мощности при  $\omega = \omega_H$ , используя соотношение  $P_{э_i} = P_i \frac{\omega_H}{\omega_i}$ , тогда формула эквивалентной мощности для случая переменных угловой скорости и теплоотдачи будет иметь вид:

$$P_{э} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( P_i \cdot \frac{\omega_H}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_1 \cdot t_i}}. \quad (5.45)$$

### 5.5. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы S2

При кратковременном режиме работы S2 соотношения между интервалами времени работы и остановки и постоянными времени нагрева и остывания двигателя записывают в виде:

$$t_p \ll 3T_H, \quad t_0 > 3T_0.$$

Для кратковременного режима могут быть выбраны:

- двигатели из серии продолжительного режима работы S1;
- специальные двигатели из серии кратковременного режима S2.

#### 5.5.1. Двигатели из серии продолжительного режима работы

Если выбрать двигатель, рассчитанный на длительную нагрузку, мощностью, равной мощности при кратковременном режиме работы  $P_K$  и с продолжительностью рабочего периода  $t_k = t_p$ , то превышение его температуры за такое время не достигнет допустимого значения, т.е. ( $\tau_{нагр} < \tau_{доп}$ ) (кривая 1) рис. 5.3.

Для полного использования такого двигателя в кратковременном режиме S2 его необходимо загрузить (перегрузить) такой мощностью  $P_K$ , при которой за время работы превышение достигнет допустимого значения (кривая 2) рис. 5.3.

$$\tau'_{доп} = \tau'_{уст} \left( 1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}} \right), \quad (5.46)$$

$$\tau'_{уст} = \frac{\Delta P_K}{A}; \quad \tau'_{доп} = \frac{\Delta P_H}{A}.$$

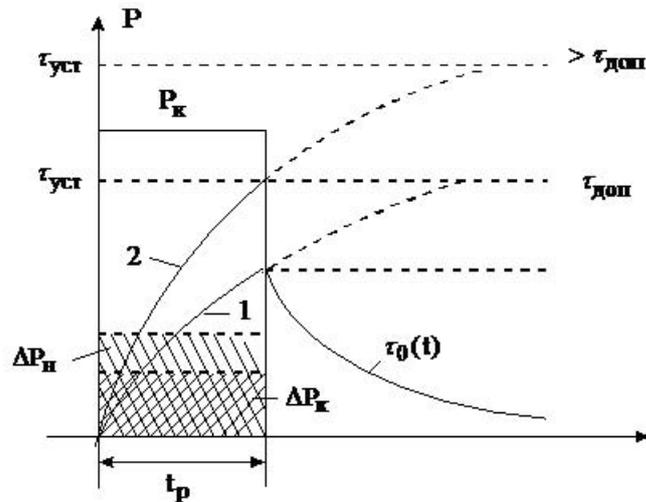


Рис. 5.3. График нагрева двигателя при кратковременном режиме работы двигателя

При соблюдении этого условия двигатель будет работать по мощности с перегрузкой  $P_K > P_H$ , а потери мощности будут больше, чем в длительном режиме за тот же период работы, т.е.  $\Delta P_K > \Delta P_{H(уст)}$ .

Для количественной оценки перегрузки используются коэффициенты термической и механической перегрузки.

Отношение потерь мощности двигателя при кратковременном режиме S2 к номинальным потерям мощности двигателя продолжительного режима работы при условии одинакового допустимого значения превышения температуры двигателя называется коэффициентом термической перегрузки

$$p_v = \frac{\Delta P_K}{\Delta P_H}, \text{ В,}$$

где  $\Delta P_K$  – потери мощности при кратковременной нагрузке;  $\Delta P_{H(уст)}$  – потери мощности при длительной нагрузке.

$$p_\tau = \frac{\tau'_{уст}}{\tau_{доп}}.$$

Продолжительность кратковременной работы  $t_p$  можно определить, если известен коэффициент термической перегрузки двигателя  $P_\tau$ .

$$t_p = T_H \ln \left[ \frac{p_\tau}{(p_\tau - 1)} \right], \quad (5.47)$$

где  $T_H$  – постоянная времени нагрева двигателя.

На практике при расчете мощности двигателя для кратковременного режима применяют еще коэффициент механической перегрузки,

равный отношению мощности при кратковременной нагрузке к номинальной его мощности при длительной нагрузке  $P_H$ , т.е.  $p_M = \frac{P_K}{P_H}$ . При этом превышение температуры не должно быть больше допустимой.

$$p_M = \sqrt{p_\tau(\alpha + 1) - \alpha},$$

где  $\alpha = \frac{\Delta P_{CH}}{\Delta P_{VH}}$  – отношение постоянных потерь к переменным при номинальной нагрузке.

Если  $\alpha = 0$ , т.е. пренебречь постоянными потерями, то

$$p_M = \sqrt{p_\tau} = \sqrt{1 / \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_M}}\right)}. \quad (5.48)$$

Коэффициент механической перегрузки можно получить непосредственно, зная  $\alpha$  и отношение  $\frac{t_{pB}}{T_M}$  (в таблицах, каталогах для двигателей)

$$p_M = \sqrt{\left[\frac{(\alpha + 1)}{\left(1 - e^{-\frac{t_{pB}}{T_M}}\right)}\right] - \alpha}. \quad (5.49)$$

Тогда, зная  $p_M$ , мощность двигателя при кратковременном режиме работы, определяется по следующей формуле:

$$P_K = p_M \cdot P_H = P_H \sqrt{\left[\frac{(\alpha + 1)}{\left(1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}\right)}\right] - \alpha}. \quad (5.50)$$

Из графической зависимости для двигателя  $p_M = f\left(\frac{t_p}{T_H}\right)$  следует, что при  $\frac{t_p}{T_H} \cong 0,35$ ;  $p_M \cong 2,5$ , что соответствует перегрузочной способности большинству двигателей общепромышленного применения.

В реальных условиях при кратковременном режиме работы нагрузка на валу двигателя в течение рабочего периода может изменяться. Поэтому, пользуясь методами эквивалентных величин, реальный график можно привести к эквивалентному графику и использовать для расчета мощности двигателя в кратковременном режиме работы.

Таким образом, выбор мощности двигателей продолжительного режима для работы в кратковременном режиме производится, из допустимых нагрева и перегрузки. При этом номинальные мощности равны

$$P_H = \frac{P_K}{P_\tau}; \quad P_{H \max} = \lambda \cdot \frac{P_M}{P_\tau},$$

где  $\lambda$  – допустимая перегрузочная способность двигателя.

$$\lambda = 2 \div 2,5 - \text{ДПТ},$$

$$\lambda = 1,7 \div 2,2 - \text{АД с к.з. ротором},$$

$$\lambda = 2 \div 2,5 - \text{АД с фазным ротором},$$

$$\lambda = 2 \div 2,5 - \text{СД}.$$

При задании графика нагрузки в виде  $i = f(t)$  или  $M = f(t)$  в расчетные формулы вместо мощности  $P_K$  вводится соответствующее значение тока или момента.

### 5.5.2. Специальные серии двигателей для кратковременного режима работы

Для такого режима работы выпускается специальная серия двигателей кратковременного режима работы длительностью  $N = 10, 30, 60, 90$  мин. Поэтому выбранный по каталогу двигатель может быть загружен номинальной мощностью в течение указанного времени и будет полностью использован по нагреву

$$P_{K \text{ экв}} \leq P_{H \text{ кат}} \quad \text{и} \quad t_p = t_{\text{кат}} = N.$$

Если длительность работы двигателя не совпадает с каталожным значением, то необходимо определить, какую нагрузку может допустить двигатель, не перегреваясь сверх допустимой температуры, за этот промежуток времени.

$$P_K = P_H \sqrt{\left[ \frac{(1 + \alpha) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_{\text{кат}}}{T_H}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{факт}}}{T_H}}\right)} \right] - \alpha}, \quad (5.51)$$

где  $N = t_{\text{кат}}$  - каталожное время работы;  $t_p = t_{\text{факт}}$  - фактическое время работы.

### 5.6. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

При повторно-кратковременном режиме работы соотношения между интервалами времени работы и остановки и постоянными времени нагрева и остывания двигателя записывают в виде:

$$t_p \ll 3T_H \quad t_0 \ll 3T_0$$

Многоступенчатый график нагрузки, характеризующий повторно-кратковременный режим работы S3, приведен на рис. 5.4.

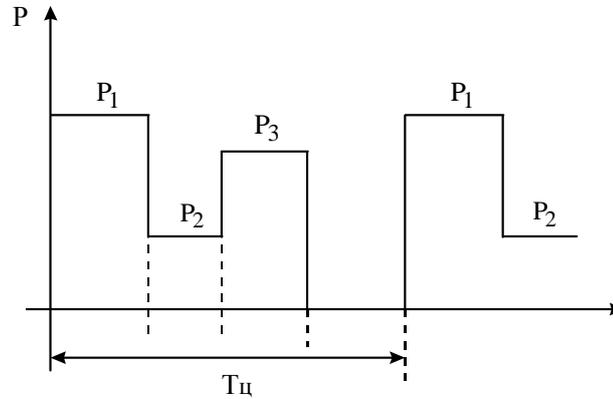


Рис. 5.4. График нагрузки повторно-кратковременного режима работы S3

Более сложные режимы S4, S5 можно привести к эквивалентному одноступенчатому, т.е. к стандартному виду для режима S3, если воспользоваться формулой

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_{p1} + P_2^2 \cdot t_{p2} + \dots + P_n^2 \cdot t_{pn}}{t_{p1} + t_{p2} + \dots + t_{pn}}} \quad (5.52)$$

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( P_i \frac{\omega_H}{\omega_i} \right)^2 \cdot t_{pi}}{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_{pi}}},$$

$$t_{p_3} = \sum_{i=1}^m t_{pi}, \quad t_{0_3} = \sum_{q=1}^n t_{0_q}, \quad \text{ПВ}_3 = \frac{t_{p_3}}{t_{p_3} + t_{0_3}} \cdot 100\%$$

где  $m$  – число рабочих участков в цикле;  $n$  – число пауз в цикле.

При работе двигателя в повторно-кратковременном режиме температура его обмоток достигает квазиустойчивого состояния через  $n$  – циклов при  $t_{ц} > 4T_H$ , а превышение температуры будет колебаться в пределах от  $\tau_{\max}$  до  $\tau_{\min}$  за время паузы. Максимальное превышение температуры при повторно-кратковременном режиме работы двигателя меньше, чем при продолжительной работе с одной и той же перегрузкой. Поэтому мощность двигателя, предназначенного для длительного режима, но используемого для повторно-кратковременной нагрузки, определится:

$$P_{\text{дл.Н}} = P_{\text{п.к}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{[\text{ПВ} + \beta_0(1 + \alpha)(1 - \text{ПВ})]}} , \quad (5.53)$$

если  $P_{\text{дл.Н}} \leq P_{\text{Н}}$ , то двигатель выбран правильно и проходит по нагреву.

#### 5.6.1. Методика выбора мощности двигателя повторно-кратковременного режима

Методику выбора мощности двигателя повторно-кратковременного режима S3 целесообразно рассмотреть на примере двигателя режима S1 номинальной мощности, равной мощности двигателя режима S3.

Мощность двигателя, предназначенного для режима S1, но используемого для режима S3, для графика нагрузки, определяется по следующему выражению:

$$P_{\text{дл.Н}} = P_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{[\text{ПВ} + \beta_0(1 + \alpha)(1 - \text{ПВ})]}} , \quad (5.54)$$

где  $\text{ПВ} = \text{ПВ}_{\text{рас}} = \frac{t_{p_1} + t_{p_2} + t_{p_3}}{t_{p_1} + t_{p_2} + t_{p_3} + t_0} \cdot 100\%$ ,  $\beta_0 = \frac{A_0}{A}$  – коэффициент ухудшения теплоотдачи.

Если  $P_{\text{Н}} \geq P_{\text{дл.Н}}$ , то двигатель выбран правильно и проходит по нагреву.

Или для тока

$$I_{\text{дл.Н}} = I_{\text{Э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{[\text{ПВ} + \beta_0(1 + \alpha)(1 - \text{ПВ})]}} . \quad (5.55)$$

Если  $I_{\text{Н}} \geq I_{\text{дл.Н}}$  – двигатель проходит по нагреву.

Если для повторно-кратковременного режима S3 выбирают специальные двигатели, предназначенные для этого режима, то в каталогах обычно на них указывается номинальная мощность при стандартной (нормативной) продолжительности включения  $\text{ПВ}_{\text{ст}} = \text{ПВ}_{\text{н}} = 15, 25, 40, 60$ .

Длительность цикла для таких двигателей не должна превышать  $t_{\text{ц}} \leq 10$  мин, в противном случае двигатель считается работающим в режиме S1.

Если при повторно-кратковременном режиме работы нагрузка двигателя  $P_0 = P_{\text{с}}$ , время работы и паузы от цикла к циклу не меняются и относительная продолжительность включения  $\text{ПВ}_{\text{расч}}$  равна одному из стандартных значений 15, 25, 40, 60 %, то выбор двигателя по мощности выполняют по соотношениям

$$P_0 \leq P_{\text{н.кат}} \quad \text{и} \quad \text{ПВ}_{\text{расч}} \leq \text{ПВ}_{\text{ст}}$$

Если при повторно-кратковременном режиме работы нагрузка двигателя не меняется, но фактическая ПВ отличается от стандартной, то необходимо пересчитать найденную эквивалентную мощность.  $P_{\text{экв}}$  на ближайшее стандартное значение ПВ.

Пересчет мощности двигателя выполняют на основании метода средних потерь. При этом условие правильности выбора двигателя можно записать:

$$\Delta P_{\text{расч}} \cdot \text{ПВ}_{\text{расч}} \leq \Delta P_{\text{н}} \cdot \text{ПВ}_{\text{ст}}.$$

Проверка двигателя по нагреву может быть сделана сопоставлением номинальных значений тока, момента и мощности с аналогичными эквивалентными величинами, определяемыми по нагрузочным диаграммам. Если в предыдущем выражении потери мощности заменить через постоянные и переменные потери и их отношение обозначить через  $\alpha$ , то после преобразований получим:

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\alpha \cdot (\text{ПВ}_{\text{ст}} - \text{ПВ}_{\text{расч}}) + \text{ПВ}_{\text{ст}}}}. \quad (5.56)$$

При условии постоянства потока за цикл работы можно воспользоваться следующим выражением для оценки нагрева:

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\alpha \cdot (\text{ПВ}_{\text{ст}} - \text{ПВ}_{\text{расч}}) + \text{ПВ}_{\text{ст}}}}. \quad (5.57)$$

При условии постоянства скорости из (57) следует:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\alpha \cdot (\text{ПВ}_{\text{ст}} - \text{ПВ}_{\text{расч}}) + \text{ПВ}_{\text{ст}}}}. \quad (5.58)$$

Если условия (56), (57), (58) выполняются, то температура двигателя не будет превосходить допустимого значения, и двигатель следовательно выбран правильно.

Если  $\text{ПВ}_{\text{расч}}$  незначительно отличается от стандартной величины, то в этом случае произведением  $\alpha \cdot (\text{ПВ}_{\text{расч}} - \text{ПВ}_{\text{ст}}) \approx 0$  и тогда предыдущие уравнения запишутся в следующем виде:

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}}; \quad (5.59)$$

$$M_{\text{н}} \geq M_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{расч}}}{\text{ПВ}_{\text{ст}}}}; \quad (5.60)$$

$$P_H \geq P_{\Sigma} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч}}{ПВ_{ст}}} \quad (5.61)$$

### 5.6.2. Последовательность выбора мощности двигателя при режиме S3

1. Находим расчетную продолжительность включения

$$ПВ_{расч} = \frac{t_{p_{\Sigma}}}{t_{p_{\Sigma}} + t_{0_{\Sigma}}} \cdot 100\% ,$$

где  $t_{p_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^m t_{p_i}$ ;  $t_{0_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n t_{0_i}$ ,  $m$  – число рабочих участков в цикле;  $n$  – число пауз в цикле.

2. Определяем эквивалентные значения момента нагрузки или мощности нагрузки за время работы

$$M_{C_{\Sigma}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_{C_i}^2 \cdot t_{p_i}}{\sum_{i=1}^m t_{p_i}}} .$$

3. Пересчитываем значение эквивалентного момента или мощности на ближайшую стандартную ПВ:

$$M_{расч} = (1,1 \div 1,2) \cdot M_{C_{\Sigma}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{расч}}{ПВ_{ст}}} .$$

4. Определяется расчетная мощность и выбирается двигатель по каталогу

$$P_{расч} = M_{расч} \cdot \omega_{max} ,$$

или выбирается двигатель по каталогу, если нагрузочная диаграмма в мощностях.

5. Рассчитываются установившиеся переходные процессы;

6. Производится проверка двигателя по нагреву и перегрузочной способности.

### 5.6.3. Определение допустимой частоты включений АД с к.з. ротором

При значительной частоте включений АД большое значение приобретают потери в переходных режимах, которые вызывают интенсивный нагрев двигателя и лимитирующие по этой причине количество включений, реверсов и торможений. Это характеризуется допустимым числом включений в час  $h$ . Допустимым числом включений в час счи-

тают такое, при котором среднее превышение температуры после большого числа циклов будет равно допустимому значению.

Предположим, что АД работает по тахограмме, которая приведена на рис. 5.5. Рабочий цикл состоит из периодов пуска, работы с установившейся скоростью при постоянной нагрузке, торможения и паузы, когда АД отключен. Потери энергии за цикл, выделяющиеся в АД, состоят из:

- $\Delta A_{\text{П}}$  - потери энергии за время пуска;
- $\Delta A_{\text{Т}}$  - потери энергии при торможении;
- $\Delta A_{\text{уст}} = \Delta P \cdot t_{\text{уст}}$  - потери энергии при работе с установившейся скоростью.

Потери энергии в окружающую среду равны:

- $\Delta P_{\text{Н}} \cdot t_{\text{уст}}$  - при работе с установившейся скоростью.
- $\Delta P_{\text{Н}} \cdot \beta_0 \cdot t_0$  - во время паузы.
- $\frac{\Delta P_{\text{Н}}(t_{\text{П}} + t_{\text{Т}})(1 + \beta_0)}{2}$  - за время пуска и торможения.

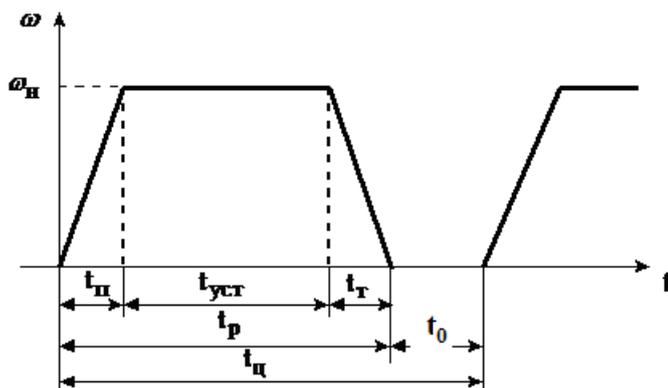


Рис. 5.5. Тахограмма скорости АД.

Принято, что коэффициент ухудшения и теплоотдачи во время пуска и торможения равен среднему значению между начальным и конечным значениями  $\beta$ , т.е.  $\frac{(1 + \beta_0)}{2}$ .

В квазиустановившемся тепловом режиме можно записать:

$$\Delta A_{\text{П}} + \Delta P \cdot t_{\text{уст}} + \Delta A_{\text{Т}} = \Delta P_{\text{Н}}(t_{\text{П}} + t_{\text{Т}}) \cdot \frac{(1 + \beta_0)}{2} + \Delta P_{\text{Н}} \cdot t_{\text{уст}} + \beta_0 \Delta P_{\text{Н}} \cdot t_0, \quad (5.62)$$

т.е. количество выделившихся потерь энергии равно количеству потерь энергии, отданных в окружающую среду.

Так как  $t_{\text{п}} = \frac{3600}{h}$ , то  $t_{\text{уст}} = 3600 \left( \frac{\text{ПВ}}{h} - t_{\text{П}} - t_{\text{Т}} \right)$ ;  $t_0 = \frac{3600(1 - \text{ПВ})}{h}$ .

Подставляя в (62) значения  $t_{\text{уст}}, t_0$  и решая его относительно  $h$ , получим

$$h = \frac{3600 [(\Delta P_H - \Delta P) \cdot \text{ПВ} + \Delta P_H \cdot \beta_0 (1 - \text{ПВ})]}{\Delta A_{\text{П}} + \Delta A_{\text{Т}} - (t_{\text{П}} + t_{\text{Т}}) \cdot \left[ \Delta P + \frac{(1 + \beta_0) \cdot \Delta P_H}{2} - \Delta P_H \right]}. \quad (5.63)$$

Для АД с к.з. ротором в знаменателе 3-м членом можно пренебречь, т.к. он составляет (2÷4)% от  $(\Delta A_{\text{П}} + \Delta A_{\text{Т}})$

$$h = \frac{3600 [(\Delta P_H - \Delta P) \cdot \text{ПВ} + \Delta P_H \cdot \beta_0 (1 - \text{ПВ})]}{\Delta A_{\text{П}} + \Delta A_{\text{Т}}}. \quad (5.64)$$

Если в установившемся режиме АД работает с номинальной мощностью, а  $\Delta P = \Delta P_H$  и формула (64) значительно упрощается.

$$h = 3600 \cdot \frac{\Delta P_H \cdot \beta_0 (1 - \text{ПВ})}{\Delta A_{\text{П}} + \Delta A_{\text{Т}}}. \quad (5.65)$$

Из (65) следует, что допустимое число включений в час зависит от нагрузки ПВ,  $\beta_0$  и потерь энергии в последовательности переключения.

С уменьшением  $\Delta P, \Delta A_{\text{П}}$  и  $\Delta A_{\text{Т}}$   $h \uparrow$ .

Если 1)  $\Delta P_H - \Delta P = \beta_0 \cdot \Delta P_H$   $h$  не зависит от ПВ.

2)  $\Delta P_H - \Delta P > \beta_0 \cdot \Delta P_H$ , то при ПВ  $\uparrow$   $h \uparrow$

С точки зрения отвода тепла работа АД с установившейся скоростью более эффективна, чем в период паузы.

Если  $\Delta P_H - \Delta P < \beta_0 \cdot \Delta P_H$ , то при ПВ  $\uparrow$   $h \downarrow$  из-за менее интенсивного отвода тепла в период работы АД.

Увеличение допустимой частоты включения может быть достигнуто применением независимой вентиляции АД. Существенного увеличения  $h$  можно добиться путем уменьшения потери энергии в переходных процессах, например, используя частотное управление АД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированный электропривод промышленных установок. Под ред. Г.Б. Онищенко.– М.:РАСХН-2001.– 520 с.
2. Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболевская. М.: Энергоатомиздат. 1982. – 150 с.
3. Аристов А.В., Бурулько Л.К., Паюк Л.А. Математическое моделирование в электромеханике: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 145 с.
4. Башарин А.В., Голубев Ф.Н., Кепперман В.Г. Примеры расчетов автоматизированного электропривода. – Л., Энергия, 1971. – 440 с.
5. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982.– 392 с.
6. Бродовский В.Н., Иванов Е.С. Приводы с частотно-токовым управлением. – М.: Энергия, 1974. – 165 с.
7. Булгаков А.А. Частотное управление асинхронными электродвигателями. – М.: Наука, 1982. 284 с.
8. Бурулько Л.К. Динамика электромеханических систем: Учебное пособие. – Томск: изд. ТПИ им С.М. Кирова, 1991. – 89 с.
9. Бурулько Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: Учебное пособие. Часть 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 74 с.
10. Бурулько Л.К. Расчет и проектирование следящего привода: Учебное пособие. Часть 2. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
11. Бурулько Л.К., Боровиков Ю.С. Специальные электроприводы переменного тока: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 145 с.
12. Бурулько Л.К., Глазачев А.В. Динамика электроприводов летательных аппаратов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 127 с.
13. Бурулько Л.К., Глазачев А.В. Электропривод летательных аппаратов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
14. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи. М.: Изд. Дом «Додекс», 2001. – 384 с.
15. Вольдек А.И. Электрические машины. – М.: Энергия, 1974. – 782 с.

16. Воронина Н.А., Петрович В.П. Силовые преобразователи электрической энергии: Учебное пособие. – Томск:Изд-во ТПУ, 2004.– 263 с.
17. Герман-Галкин С.Г. Силовая электроника: лабораторные работы на ПК.-СПб.: Корона принт, 2002.-304 с.
18. Герман-Галкин С.Г.Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MathLab 6.0: Учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001.– 320 с.
19. Герман-Галкин С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
20. Т.А.Глазенко, В.А .Прянишников. Электротехника и основы электроники: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1996. – 210 с.
21. Загорский А.Е. Электродвигатели переменной частоты. – М.: Энергия, 1975. – 152 с.
22. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебное пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
23. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.
24. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
25. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 704 с.
26. Кривицкий С.О., Эпштейн И.И. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами. – М.: Энергоатомиздат, 1970. – 152 с.
27. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
28. Кобзев А.В. Многозонная импульсная модуляция. Теория и применение в системах преобразования параметров электрической энергии. – Новосибирск: Изд-во Наука, 1979. – 304 с.
29. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат; 1986. – 416 с.
30. Орлов И.Н., Тарасов В.Н. Особенности электропривода летательных аппаратов. – М.: МЭИ, 1986. – 80 с.

31. Онищенко Г.Б., Аксенов М.И. и др. Автоматизированный электропривод промышленных установок. – М.: РАСХН, 2001. – 520 с.
32. Петров И.И., Мейстель А.М. Специальные режимы работы асинхронного электропривода. – М.: Энергия, 1968. – 256 с.
33. Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чувашского университета, 1998. – 172 с.
34. Рудаков В.В., Столяров И.И., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
35. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. – М.: Высшая школа, 1980. – 423 с.
36. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 321 с.
37. Сабинин Ю.А., Грузов В.Л. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
38. Сварка и резка материалов: Учеб. пособие.; Под ред. Ю.В. Казакова. – М.: Издательский центр «Академия», 2001. – 400 с.
39. Семенов Б.Ю. Силовая электроника. М.: – Солон-Р, 2001. – 327 с.
40. Соколов М.М., Петров П.П., Масандилов Л.Б., Ладензон В.А. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. – М.: Энергия, 1967. – 198 с.
41. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением: учебник для студ. высш. учеб. Заведений; – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
42. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Под. ред. Л.Г. Мамякоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 240 с.
43. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: Учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 328 с.
44. Чемоданов Б.К. Следящие приводы: В 3 т, 2-е изд., перераб. и доп. –
45. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
46. Шубенко В.А., Браславский И.Я. Тиристорный асинхронный электропривод с фазовым управлением. – М. Энергия, 1972.- 200 с.
47. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов пе-

ременного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2001. – 654 с.

48. Электротехнический справочник в четырех томах: Т4 Использование электрической энергии. – М. Издательство МЭИ, 2002. – 695 с.

[www.electroprivod.ru](http://www.electroprivod.ru)

[www.szma.com](http://www.szma.com)

[www.schiebel.ru](http://www.schiebel.ru)

[www.e-privod.ru](http://www.e-privod.ru)

[www.elvpr.ru](http://www.elvpr.ru)

[www.mexanic.ru](http://www.mexanic.ru)

[www.speckomplect.ru](http://www.speckomplect.ru)

[www.elprivod.ru](http://www.elprivod.ru)

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ, ПРИЕМНИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ.....	7
1.1. Электроустановки.....	7
1.2. Классификация приемников электрической энергии.....	8
1.3. Надежность (бесперебойность) питания.....	11
1.4. Характерные приемники электрической энергии промышленных предприятий.....	14
1.5. Режимы работы электроприемников.....	22
1.6. Виды преобразования параметров электрической энергии.....	30
Глава 2. ВЕНТИЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ.....	36
2.1. Структурные схемы импульсных полупроводниковых преобразователей и виды модуляции.....	36
2.2. Управляемые выпрямители.....	41
2.3. Общая характеристика полупроводниковых преобразователей частоты.....	51
2.3.1. Общие положения.....	57
Глава 3. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ.....	64
3.1. Физические принципы работы и устройство машин постоянного тока.....	64
3.2. Определение параметров двигателя постоянного тока.....	68
3.3. Схемы включения и характеристики двигателей постоянного тока.....	70
3.4. Регулирование скорости двигателей постоянного тока.....	75
3.5. Принцип электромеханического преобразования энергии в электрических машинах переменного тока.....	86
3.6. Определение параметров в электрических машинах переменного тока.....	91
3.7. Классификация электрических машин переменного тока.....	96
3.8. Регулировочные и механические характеристики.....	100
3.9. Влияние частоты и напряжения питающей сети на свойства электрических машин переменного тока.....	104
Глава 4 ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД.....	111
4.1. Электропривод как система.....	111
4.2. Функции электропривода.....	113
4.3. Нагрузочные диаграммы электроприводов и методы их построения.....	116
4.4. Основные уравнения электропривода постоянного тока.....	118
4.5. Номинальный режим. Допустимые значения координат.....	120
4.6. Номинальные режимы электропривода переменного тока.....	123
4.7. Регулирование координат в электроприводах переменного тока.....	128
Глава 5. ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ.....	132
5.1. Потери энергии в установившихся и переходных процессах электропривода.....	132
5.2. Нагрев и охлаждение двигателей.....	140
5.3. Выбор мощности двигателя при продолжительном режиме работы S1.....	143
5.3.1. Нагрузка длительная и постоянная.....	143
5.3.2. Нагрузка переменная.....	145
5.4. Проверка двигателей по нагреву методом средних.....	146

потерь и эквивалентных величин .....	146
5.5. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме работы S2 .....	149
5.5.1. Двигатели из серии продолжительного режима работы .....	149
5.5.2. Специальные серии двигателей для кратковременного режима работы .....	152
5.6. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме .....	152
работы. ....	152
5.6.1. Методика выбора мощности двигателя повторно-кратковременного режима .....	154
5.6.2. Последовательность выбора мощности двигателя при режиме S3 .....	156
5.6.3. Определение допустимой частоты включений АД с к.з. ротором .....	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	159
ОГЛАВЛЕНИЕ .....	163

Учебное издание

БУРУЛЬКО Лев Кириллович  
ДЕМЕНТЬЕВ Юрий Николаевич

## ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Часть 1

Источники, приемники и преобразователи электрической энергии

Учебно-методическое пособие

Издано в авторской редакции

Научный редактор  
*доктор технических наук, профессор А.В. Аристов*  
*Дизайн обложки Т.А. Фатеева*

Подписано к печати . Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.  
Заказ . Цена свободная.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ . 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)