

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

И.Ю. Краснов

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ
НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2012

УДК 621.3.011.1, 621.314.524, 621.318.4, 51-74
ББК

К

Краснов И.Ю.

К

Методы и средства энергосбережения на промышленных предприятиях: учебное пособие / И.Ю. Краснов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 186 с.

В учебном пособии рассмотрены основные методы экономии электрической энергии для промышленных предприятий и организаций посредством электроприводов и технологического оборудования.

Пособие подготовлено на кафедре электропривода и электрооборудования, соответствует программе дисциплины «Методы и средства энергосбережения на промышленных предприятиях» и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.3.011.1, 621.314.524, 621.318.4, 51-74
ББК

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор ТУСУРа
А.А. Светлаков

Кандидат технических наук, доцент СГТА
С.Н. Кладиев

Редактор

Кандидат технических наук, доцент
Бурулько Лев Кириллович

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2012
© Краснов И.Ю., 2012
© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПОДХОДЫ К ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ	7
1.1. Основные понятия и тенденции развития энергосбережения	7
1.2. Понятие электрической энергии	14
1.3. Многоуровневая структура современного электропривода.....	17
1.4. Состояние и перспективы развития силовых полупроводниковых элементов регулируемого электропривода	22
1.5. Направления энергосбережения средствами промышленного электропривода	31
1.5.1. Выбор электродвигателя	31
2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ	55
2.1. Энергетический канал электропривода	55
2.1.1. Структура энергетического канала электропривода	55
2.1.2. Баланс мощностей потоков энергии силового канала	60
2.1.3. Коэффициент полезного действия	63
2.1.4. Обобщенный критерий энергетической эффективности силового канала.....	64
2.2. Энергетические особенности и характеристики энергетической эффективности статических преобразователей электроэнергии	69
2.3. Типовые структуры преобразователей электроэнергии	79
2.3.1. Электромашинные преобразователи	79
2.3.2. Статические преобразователи на полууправляемых электронных приборах (тиристорах)	81
2.3.3. Статические преобразователи на управляемых электронных приборах ..	90
2.4. Энергетические характеристики электромеханических преобразователей (нерегулируемого электропривода) в статическом режиме ..	97
2.4.1. Потери мощности	97
2.4.2. Коэффициент полезного действия электропривода.....	100
2.4.3. Коэффициент мощности электропривода.....	102
2.5. Энергетические характеристики регулируемых электроприводов в статическом режиме.....	104
2.5.1. Регулируемый электропривод с двигателем постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения	104
2.5.2. Регулируемый электропривод с асинхронным двигателем	106
2.6. Энергетические характеристики механических преобразователей в статических режимах.....	107
2.7. Потери электроэнергии в переходных процессах электропривода и способы их снижения	109
3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	117
3.1. Расчет мощности и выбор электродвигателей.....	117
3.2. Проверка двигателей по нагреву прямым методом.....	126
3.3. Проверка двигателей по нагреву косвенными методами	130

3.3.1. Метод средних потерь.....	130
3.3.2. Метод эквивалентных величин	132
3.4. Особенности проверки двигателей по нагреву при различных тепловых режимах работы.....	133
3.4.1. Продолжительный режим работы	133
3.4.2. Кратковременный режим работы	134
3.4.3. Повторно-кратковременный режим работы	138
3.4.4. Дополнительные режимы работы.....	140
4. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	143
4.1. Экономия электроэнергии технологическими установками и механизмами.....	143
4.1.1. Подъемные установки.....	143
4.1.2. Вентиляторные установки	144
4.1.3. Водоотливные установки.....	147
4.1.4. Компрессорные установки	149
4.1.5. Конвейерные установки.....	150
4.2. Выбор рационального способа и диапазона регулирования скорости электропривода в зависимости от технологических условий работы машин и механизмов	152
4.2.1. Регулирование производительности вентиляторных установок и требования к электроприводу	152
4.2.2. Управление производительностью насосных установок	156
4.2.3. Регулирование скорости конвейерных установок	164
4.2.4. Регулирование скорости грузоподъемных машин.....	167
4.3. Выбор рационального способа регулирования скорости в зависимости от характера изменения нагрузки.....	171
4.3.1. Выбор способа регулирования скорости при постоянной нагрузке	171
4.3.2. Выбор способа регулирования скорости при постоянной статической мощности.....	172
4.4. Повышение загрузки электропривода. Исключение режима холостого хода	173
4.5. Снижение напряжения на зажимах электродвигателя.....	176
4.6. Использование синхронной машины как компенсатора реактивной мощности.....	180
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	184

ВВЕДЕНИЕ

Энергия, и в частности электрическая энергия, является одним из наиболее важных продуктов в индустриальном обществе. Исследования показали, что средний доход, продолжительность жизни и другие важные факторы уровня жизни связаны с потреблением электроэнергии на душу населения в отдельном регионе или в стране в целом. Как и все природные ресурсы, энергетические ресурсы могут истощиться. Поэтому важно экономить столько энергии, сколько возможно.

Возможный эффект энергосбережения – экономия 200 млрд тонн условного топлива в 1986–2020 гг., т.е. такого количества, которое было добыто из недр за всю предыдущую историю человечества. Прогнозируется, что за счет энергосбережения будет удовлетворяться две трети прироста мировых потребностей в энергии.

Энергосбережение как деятельность (организационная, научная, практическая, информационная), направленная на рациональное использование энергии и природных энергетических ресурсов, – важнейшая государственная проблема.

Вхождение в мировую экономику неизбежно предполагает создание продукции, конкурентоспособной на мировых рынках (по качеству и стоимости), но созданная в прошлом промышленная база России ориентирована на низкую стоимость энергетической составляющей. Энергозатратные технологии, значительная часть устаревшего, технически изношенного оборудования привели к критическим уровням затратного и нерационального использования топливно-энергетических ресурсов, что вызвало энергетический кризис в нашей стране.

Ведущие страны мира в настоящее время создали подлинную индустрию энергосбережения, позволяющую получать прирост продукции практически без существенного увеличения энергозатрат на единицу продукции. Необходимо отметить, что существенный вклад в решение проблем, связанных с энергетическим кризисом 1973 г., в развитых странах мира внесли не наращивание производства топливно-энергетических ресурсов, а конкретные меры по энергосбережению.

Энергосбережение должно превратиться в подотрасль промышленной энергетики, дополнительный источник энергии. В этих условиях реализация политики энергосбережения становится стратегической линией развития экономики и социальной сферы.

Сохранение электрической энергии является важной частью общей тенденции по защите окружающей среды. Электродвигатели, приводя-

щие в действие системы в быту и на производстве, потребляют более половины производимой энергии, именно здесь заложены самые крупные резервы энергосбережения.

Возрастающая сложность получения энергии, рост энергоёмких технологий, необходимость безаварийной работы машин и механизмов требует применения регулируемого электропривода. Переход к регулируемому электроприводу переменного тока отдельных механизмов позволит сэкономить до 50 % энергоресурсов.

1. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И ПОДХОДЫ К ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЮ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

1.1. Основные понятия и тенденции развития энергосбережения

В последние годы тема энергосберегающих технологий выходит на уровень государственной и международной политики во всем мире. Истощение природных ресурсов, изменение климата на планете, удорожание энергоресурсов для потребителя, переход на альтернативные источники энергии, – каждый день можно услышать самые разнообразные мнения по этим вопросам. Но в «сухом остатке» всегда присутствует мысль о необходимости экономить энергию.

Россия – одна из самых богатых по обеспеченности природными ресурсами страна мира. Наша страна обладает около 13 % мировых запасов нефти, 35 % природного газа и 12 % угля, не говоря о значительных потенциальных гидроресурсах, возможности использования энергии приливов и геотермальных вод. На сегодняшний день доход от экспорта нефти и газа приносит огромные доходы российской казне.

Однако все большее количество специалистов, экспертов, политиков и экономистов осознает необходимость поиска выхода из ситуации зависимости от экспорта энергоресурсов. Во-первых, нефть, природный газ, каменный уголь относятся к невозобновляемым источникам энергии, а следовательно, когда-нибудь закончатся. Во-вторых, значительные денежные поступления в бюджет страны от экспорта энергоресурсов, очевидно, не гарантируют низких и стабильных цен на аналогичные ресурсы для российского потребителя. Ожидалось, что к 2011 г. цены на электричество и бензин, как для простых граждан, так и для предприятий, достигнут общемировых показателей. Отметим, что такое повышение цен является одним из условий вступления РФ во Всемирную торговую организацию (ВТО). Энергосбережение имеющихся ресурсов, а также поиск альтернативных источников энергии становятся актуальными национальными задачами.

Федеральный закон (от 23 ноября 2009 года N 261-ФЗ) определяет энергосбережение как «реализацию правовых, организационных, научных, производственных, технических, экономических мер, направленных на повышение эффективности использования энергетических ресурсов».

В 2006 г. Международная финансовая корпорация (МФК) группы Всемирного банка провела исследование практики энергосбережения на российских предприятиях. Была проанализирована деятельность 625 предприятий, расположенных в пяти федеральных округах и принадлежащих к пяти различным отраслям. В отчете отмечено, что Россия является одной из самых энергоемких стран мира, при этом в РФ потребляется порядка 6 % мировой энергии. По данным Международного энергетического агентства энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП) России в 11 раз выше, чем в Германии, в 6 раз выше, чем в Канаде, в 4 раза больше, чем в Польше.

В 2006 г. Международное энергетическое агентство (МЭА) разработало специальный доклад «Перспективы энергетических технологий: Сценарии и стратегии развития до 2050 г.». В нем отмечено, что повышение эффективности использования энергии является самым дешевым, быстрым и экологичным способом решения проблем, связанных с нехваткой энергии. Повышение эффективности использования энергии снимает необходимость дополнительных инвестиций в энергетику. Многие меры, направленные на повышение эффективности использования энергии, приводят к сокращению издержек, связанных с покупкой энергии. Но в этой области существует ряд проблем, которые необходимо решить. При покупке машин, домов и домашних приборов немногие думают об их экономичности. Даже менеджмент компаний в процессе принятия решений рассматривает энергоэффективность как вторичный фактор. Существуют способы повышения энергоэффективности, с которыми потребители незнакомы. Производители холодильников, телевизоров и автомобилей не всегда используют все имеющиеся технологии, которые могут повысить экономичность подобной продукции. Для исправления ситуации в этой сфере можно использовать широкий набор мер: информационные кампании, рекомендации для производителей, системы маркировки, стандарты государственных закупок, обязательные стандарты для производителей, налоговые и прочие стимулы.

По мнению экспертов Международного энергетического агентства, государство должно помочь бизнесу и потребителям принять новые технологии и создать соответствующий спрос. Это позволит добиться не меньшего или даже большего уровня качества при меньшей стоимости.

По оперативным данным ОАО «СО ЕЭС», потребление электроэнергии в Единой энергосистеме России в 2010 году составило 988,5 млрд. кВт·ч, что на 4,4 % больше объема потребления в 2009 году. Потребление электроэнергии в 2010 году в целом по России составило 1009,2 млрд. кВт·ч, что на 4,3 % больше, чем в 2009 году.

Специалисты отмечают, что современная электроэнергетика не способна обеспечить потребности экономики России. Доказательством этого, по их мнению, является значительный объем неудовлетворенных заявок на техническое присоединение к электрическим сетям, который оценивается в 10 ГВт.

Угроза нехватки генерирующих мощностей для обеспечения потребностей экономики России и высокий уровень изношенности основных производственных фондов обуславливает необходимость ускорения процесса реформирования электроэнергетики (в первую очередь либерализации рынка электроэнергии и приватизации генерирующих мощностей), который позволит привлечь в отрасль квалифицированных стратегических инвесторов и частные средства, необходимые для эффективной реализации крупных капиталоемких проектов.

Уменьшение существующего разрыва означает не только прямую экономию для предприятий, но и повышение конкурентоспособности российских производителей. Ведь по статистике российские промышленные предприятия тратят в несколько раз больше энергетических ресурсов для производства продукции, чем аналогичные предприятия в других странах. В связи с предстоящим вступлением России в ВТО этот аспект становится особенно актуальным.

Из доклада МФК следует, что около 90 % российских компаний, принимавших участие в исследовании, прилагают усилия по повышению энергоэффективности. Первыми шагами, которые уже делают около половины предприятий, являются установка приборов учета – малозатратная мера, направленная на повышение прозрачности использования энергии.

Стоит отметить, что в настоящее время разработана энергетическая стратегия России на период до 2020 г., концепция федеральной целевой программы «Энергоэффективная экономика» до 2015 г.

Очевидно, что главным условием работы по энергосбережению является наличие финансовых средств. Исследование МФК показало, что в настоящее время затраты опрошенных предприятий на программы энергосбережения составляют около 3,5–4 млрд р. Руководители при этом ожидают роста этого показателя на 15–20 % в ближайшие 2–3 года. Также было отмечено, что более 60 % предприятий считают недостаток свободных собственных средств основным препятствием в реализации энергоэффективных проектов.

В России уже начинает развиваться малое предпринимательство в области энергетики. Показательно, что недавно Санкт-Петербургская международная бизнес-ассоциация (SPIBA) и МФК, предоставляющая предприятиям займы на энергосбережение, провели круглый стол, по-

священный развитию малой энергетики в Санкт-Петербурге. Среди трудностей для развития бизнеса было названо отсутствие федерального закона о малой энергетике. Однако в нашей стране уже есть регионы, где такой закон принят на местном уровне.

В Госдуме уже создана группа по разработке закона по малой энергетике, а также созданы группы по разработке законов применения механизмов Киотского протокола. Многие эксперты считают, что реализация положений протокола должна быть выгодной не только нашему государству в целом, но и бизнесу. Есть мнение, что обладание квотами увеличивает активы компаний, но чтобы эти активы заработали в полную силу, необходимо не просто раздавать квоты для их последующей продажи, а использовать их при заключении инвестиционных соглашений, способствующих энергосбережению и поиску новых источников энергии.

Что касается развития малой энергетики в России, то показательным примером успешной работы по этому направлению можно считать Самарскую область, где действует целевая программа развития малой энергетики на 2006–2015 гг. Руководство области считает, что именно топливно-энергетический сектор экономики определяет финансово-экономические показатели и возможности устойчивого социально-экономического развития.

Когенерация – это высокоэффективное использование первичного источника энергии – газа для получения двух форм полезной энергии – тепловой и электрической. Главное преимущество этой технологии перед обычными технологическими процессами, применяемыми на теплоэлектростанциях, состоит в том, что преобразование энергии происходит с большей эффективностью. Иными словами, система когенерации позволяет использовать то тепло, которое обычно просто теряется. При этом снижается потребность в покупной энергии на величину вырабатываемых тепловой и электрической энергии, что способствует уменьшению производственных расходов. Применение когенераторов в центральной части крупных городов позволяет эффективно дополнять рынок энергоснабжения без реконструкции старых перегруженных сетей. При этом значительно увеличивается качество электрической и тепловой энергий.

Когенератор – установка, одновременно вырабатывающая электрическую и тепловую энергию. Когенератор состоит из двигателя (дизельного, газопоршневого двигателя внутреннего сгорания, газовой турбины), электрогенератора, системы отбора (утилизации) тепла и системы управления.

В качестве потенциальных объектов для применения когенерации в России выступают промышленные производства, заводы, нефтеперерабатывающие заводы, больницы, объекты жилищной сферы малых муниципальных образований, собственные нужды газоперекачивающих станций, компрессорных станций, котельных и т.д. В результате внедрения комбинированных источников, по мнению разработчиков программы, возможно решение проблемы обеспечения потребителей теплом и электроэнергией без дополнительного строительства мощных линий электропередачи и теплопроводов.

По мнению экспертов, отсутствие электрогенерирующих организаций «малой энергетики», альтернативных централизованным источникам электроэнергии, превращает жителей малых городов и небольших населенных пунктов в «заложников» состояния оборудования централизованной энергосистемы области («большой энергетики», включающей в себя только Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ). Ее специфической особенностью является существенная зависимость вырабатываемой электрической мощности от тепловой нагрузки при комбинированной выработке энергии, что, в конечном счете, и привело к глобальному сбою в энергосистеме ОАО «Мосэнерго» РАО «ЕЭС России».

В городском хозяйстве Санкт-Петербурга также предпринимаются шаги по внедрению энергосберегающих технологий. Еще в 1997 г. Правительством города было принято постановление «Об основных направлениях по энергосбережению в городском хозяйстве Санкт-Петербурга» и утверждена региональная программа энергосбережения. Наиболее активно решением этой проблемы занимаются государственное предприятие (ГП) «ТЭК СПб», ОАО «Ленэнерго», городское газовое хозяйство (ГГХ) «Ленгаз». Государственное унитарное предприятие (ГУП) «Водоканал Санкт-Петербурга» получил грант Северной экологической финансовой корпорации NEFCO в размере 2 млн долл. на инвестиции в программу энергосбережения для Центральной станции аэрации.

Относительно экологических аспектов проблемы энергосбережения сегодня существуют разные точки зрения. Несомненно, энергетический комплекс влияет на окружающую среду, но это далеко не единственный фактор. По мнению доцента Санкт-Петербургского государственного университета, руководителя первой в России магистерской программы «Международное сотрудничество в области окружающей среды и развития» Андрея Алимова, сегодня мы имеем «не глобальное потепление, а глобальные климатические изменения, которые по своим последствиям ничуть не уступают тем процессам, которые называют глобальным потеплением». За последние 100 лет средняя температура

воздуха повысилась менее чем на 1 градус, а если распределить это повышение температуры по разным территориям, то получается, что в некоторых районах температура повысилась, а в некоторых понизилась. Особенно заметным повышением температуры оказалось, естественно, в районах крупных городов. По словам Алимова, можно выделить два фактора, влияющих на изменение глобального климата: природный и антропогенный фактор. Одной из причин того, что антропогенный фактор оказывает влияние, можно считать высокий уровень развития энергетики и в первую очередь тепловой или углеводородной энергетики.

В процессе сгорания выделяется газ CO_2 , приводящий к возникновению парникового эффекта. Когда мы говорим о значимости энергетики, о развитии энергокомплекса, следует иметь в виду, что мы будем наносить ущерб природной среде. На сегодняшний день мы должны признать, что развитие электроэнергетики заключается не столько в строительстве новых электростанций и развитии новых источников энергии (например, атомных электростанций), а в энергосбережении.

Большинство экспертов согласны с тем, что только повышение платы за электрическую и тепловую энергию может реально повлиять на эффективность ее использования предприятиями и населением. По данным российского Центра исследования корпоративных отношений 73 % экспертов в ходе специального опроса выступили за повышение цен для населения до экономически обоснованного уровня, поскольку это будет приближать их к тарифам на электроэнергию для промышленности, а также стимулировать экономию электроэнергии. Очевидно, что при повышении цен, например, в два раза население проявит недовольство, но будет вынуждено экономить энергию. При этом компании-поставщики энергоресурсов для населения смогут выплачивать в казну больше налогов.

Любое реформирование, любая «перестройка» требует изменения мировоззрения, выработку нового мышления. Российский менталитет формировался в условиях огромной территории страны и обладания богатейшими ресурсами. Став частью мировой экономической системы, российская экономика сегодня просто вынуждена совершить технологический рывок или потерпеть поражение с далеко идущими историческими последствиями. Энергосбережение – ключевое слово новой экономической политики страны.

Энергосбережение – это комплекс мероприятий, направленных на рациональное использование энергетических ресурсов. В результате снижается потребность в топливно-энергетических ресурсах на единицу

конечного продукта и уменьшается неблагоприятное влияние на окружающую среду.

Механизм воплощения энергосбережения в жизнь – реализация законодательных, организационных, экономических, технических и информационных мероприятий, направленных на эффективное использование энергетических ресурсов и улучшение состояния окружающей среды.

Кроме понятия «энергосбережение», существуют ещё энергоэффективность, энергоменеджмент, энергоиспользование, энергоаудит, энергоконсалтинг...

Энергоэффективность – свойство оборудования, технологии или производства, характеризующее меру использования энергии на единицу конечного продукта. Энергоэффективность оценивается с помощью показателей как количественно (кВт·ч, тонны условного топлива, кДж на единицу конечного продукта), так и качественно (низкая, высокая).

Энергоменеджмент – управление рациональным использованием энергии на всех стадиях ее производства, передачи, распределения и потребления, включая комплексное оптимальное решение технических, экономических и экологических проблем, связанных с этим процессом.

Энергоиспользование – комплекс действий персонала объекта, работы его оборудования и технологий, связанных с процессами от производства энергии – к ее потреблению.

Энергоаудит – составная часть энергоменеджмента, сориентированная на обследование объекта с точки зрения его энергоиспользования (выявление фактов нерационального использования энергии, определение мер по энергосбережению, оценки технических и экономических возможностей относительно их реализации). Этот вид деятельности направлен на уменьшение потребления энергетических ресурсов субъектами хозяйствования за счет повышения эффективности использования энергии.

Энергоконсалтинг – консультационная деятельность, направленная на разъяснение преимуществ реализации энергосбережения; на предоставление практической помощи в решении энергетических проблем заказчика; на выбор и обоснование энергоэффективных решений; на популяризацию знаний, обучение персонала.

Энергосервисная компания осуществляет энергоконсалтинговую деятельность в объединении с поиском инвесторов для реализации конкретных проектов энергосбережения или сама выступает как такой инвестор.

1.2. Понятие электрической энергии

Поскольку общее определение энергии – это мощность за единицу времени, то единица измерения электрической энергии представляет собой киловатт за час (кВт·ч). Основными величинами и параметрами, с помощью которых можно охарактеризовать электрическую энергию, описать ее качество, есть общеизвестные:

- электрическое напряжение – U , В;
- электрический ток – I , А;
- полная, активная и реактивная мощности – S , P , Q в киловольт-амперах (кВ·А), киловаттах (кВт) и киловольт-амперах реактивных (квар) соответственно;
- коэффициент мощности $\cos\varphi$;
- частота – f , Гц.

Электрическая энергия имеет ряд особенностей:

- она непосредственно не подлежит визуальному восприятию;
- легко превращается в иные виды энергии (например, в тепловую, механическую);
- достаточно просто и с большой скоростью передается на большие расстояния;
- простота ее распределения в электрических сетях;
- проста в использовании с помощью машин, установок, приборов;
- позволяет изменять свои параметры (напряжение, ток, частота);
- удобна для контроля и управления;
- качество ее определяет качество работы оборудования, которое потребляет эту энергию;
- качество энергии в месте производства не может служить гарантией ее качества в месте потребления;
- неразрывность во временном измерении процессов производства и потребления энергии;
- процесс передачи энергии сопровождается ее потерями.

Электрическую энергию передает электромагнитное поле проводника, этот процесс имеет волновой характер. Причем часть электроэнергии, которая передается, расходуется в самом проводнике, т.е. теряется. Отсюда вытекает понятие «потери электроэнергии». Потери электроэнергии есть во всех элементах электрической системы: генераторах, трансформаторах, линиях электропередачи и т.п., а также в электроприёмниках (электрических двигателях, электротехнологических устройствах и агрегатах).

Пусть коэффициент полезного действия (КПД) тепловой электростанции равен 33 %. Это означает, что со 100 цистерн топлива, которое поступило на тепловую электростанцию, больше чем 66 цистерн выбрасывается в окружающую среду в виде тепла. Если еще учесть затраты энергии на добычу топлива, его транспортирование, транспортирование электрической энергии, то оказывается, что со 100 цистерн топлива полезно используется только 20, а 80 цистерн выброшено в окружающую среду. Соотношение полезно использованной и затраченной энергии просто требует радикального изменения этих величин.

Общая потеря электроэнергии складывается из двух частей: номинальных потерь, которые определяются условиями работы при номинальных режимах и оптимальном выборе параметров системы электроснабжения, и дополнительных потерь, обусловленных отклонением режимов и параметров от номинальных значений. Экономия электроэнергии в системах электроснабжения основывается на минимизации как номинальных, так и дополнительных потерь.

Мероприятия по эффективному использованию электрической энергии следует выбирать, исходя из принципа достижения минимума затрат при выполнении условий надежности системы электроснабжения и качества электрической энергии. Необходимо выполнять малорасходные мероприятия по снижению потерь и повышению уровня эксплуатации элементов системы электроснабжения.

Основным направлением в области энергосбережения является экономия электроэнергии при ее передаче, распределении и использовании. Реальное энергосбережение затрагивает вопросы работы электроснабжающих сетей, преобразователей энергии всех типов и технологических механизмов.

Энергосберегающими мероприятиями при передаче электроэнергии являются:

- рациональный выбор уровня напряжения питающей сети и рода тока (постоянный или переменный);
- принятие экономически целесообразного сечения проводов и кабелей;
- повышение коэффициента мощности;
- приближение источников питания к потребителям;
- оптимизация графиков нагрузок и т.д.

Затраты электроэнергии на ее передачу не производительные, поэтому необходимо сводить их значение к минимуму. В электрических сетях потери электрической энергии составляют около 11 %. В разви-

тых странах этот показатель значительно меньше. Например, в ФРГ потери в сетях составляют 6,5 %.

Эффективность энергосберегающих мероприятий потребителей электроэнергии может быть значительно выше, т.к. более 90 % вырабатываемой энергии потребляется системами электропривода, электротехнологическими и осветительными установками. Самые крупные резервы энергосбережения заложены в совершенствовании электропривода, на долю которого приходится около 60 % всей потребляемой электроэнергии. В некоторых отраслях промышленности потребление электроэнергии электроприводом доходит до 80 %. Уменьшение скорости двигателя до скорости рабочего механизма помогает экономить энергию и улучшает управление технологическим процессом. В то же время об экономичности привода говорить рано, хотя бы в силу малых фактических значений коэффициентов загрузки привода [10].

Электропривод, по сравнению с другими типами приводов, обладает рядом преимуществ:

- работа без отходов и бесшумность создаёт комфорт для людей;
- высокий КПД, т.е. выделяется меньше тепловых потерь. Вследствие этого уменьшены габариты и площадь охлаждения;
- электропривод регулируемый и обратимый.

Электроприводы со сложным, тонко управляемым технологическим процессом составляют небольшую долю от общего числа. Основная же их часть – простые, обычно нерегулируемые массовые устройства, такие как вентиляторы, насосы, конвейеры, подъёмные краны, механизмы в перерабатывающей промышленности, строительстве и т.д. Именно эти объекты являются основными потребителями электроэнергии и здесь возможна реальная ее экономия.

Рассмотрим процессы, влияющие на энергосбережение в электроприводе и определяющие тенденции его развития [12]:

- рост энергоёмких технологий при возрастающей сложности получения энергии, дефиците доступных энергоресурсов. Добыть тонну топлива и выработать соответствующее количество электроэнергии примерно вдвое дороже, чем сэкономить. В дальнейшем эта разница растёт;
- усложнение технологии, что приводит к увеличению доли регулируемого или управляемого по пуску электропривода. Заканчивается дискуссия о возможных вариантах регулируемого электропривода – практически однозначно выбор делается в пользу электропривода переменного тока;

- возрастающие требования создания условий для безаварийной работы электропривода за счет повышения эффективности управления режимами энергоиспользования электрических машин, энергоснабжающих сетей;

- бурное развитие преобразовательной техники (запираемых тиристоров и силовых транзисторов) и средств управления (микроэлектроники, микропроцессорной техники и т.д.);

- появление доступных каждому инженеру мощных вычислительных средств, открывающих новые возможности рационального проектирования и оптимизации электропривода.

Поэтому актуальной является задача разработки и широкого внедрения энергосберегающих мероприятий и средств промышленного электропривода.

1.3. Многоуровневая структура современного электропривода

Электропривод – это электромеханическое устройство, осуществляющее управляемое преобразование электрической энергии в механическую, а также обратное преобразование, предназначенное для приведения в движение рабочих машин и механизмов. Электропривод является тем звеном, которое связывает энергосистему с технологическими установками. В известной мере электропривод выполняет роль регулятора этих связей.

Современный автоматизированный электропривод является сложной функционально взаимозависимой по элементам системой, которая представляет собой конструктивное единство электромеханического преобразователя энергии (двигателя) и электрического преобразователя, образующих энергетический (силовой) канал, а также устройств управления преобразуемой энергией и информационно-измерительных, составляющих управляющий канал. Электропривод обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую в соответствии с алгоритмом работы технологической установки.

Отличительной особенностью современного регулируемого привода переменного тока является наличие следующих основных элементов (рис. 1.4):

- простого и надёжного асинхронного или синхронного двигателя, минимизированного по массогабаритным, стоимостным и энергетическим показателям;

- преобразователя частоты со звеном постоянного тока с инвертором на полностью управляемых приборах и неуправляемым выпрямителем;
- датчиков энергетических, механических и технологических параметров регулирования, обеспечивающих требуемую точность стабилизации координат в замкнутой системе;
- микропроцессорной системы управления с функциями непосредственного регулирования выходных координат, формирования законов широтно-импульсного управления (ШИМ), диагностики, защиты и прогнозирования, взаимодействия с другими локальными приводами.

Задача объединения в единую систему различных по природе функционально-законченных элементов электропривода возлагается на многоуровневые сопрягающие устройства. Это совокупность конструктивных, схмотехнических и программных средств, обеспечивающих непосредственное оптимальное взаимодействие составных элементов привода с целью максимальной реализации возможностей каждого из них.



Рис. 1.4. Структурная схема электропривода

Сопрягающее устройство первого уровня характеризуется механико-энергетическим взаимодействием двигателя и рабочего механизма и представляет собой механическую, гидравлическую или электромагнитную передачу энергии от электрической машины на исполнительный механизм. Его функции сводятся к согласованию движения двигателя и исполнительного органа механизма при максимальном КПД передачи и устойчивой работе во всех режимах. Последнее обеспечивается согласованием механических характеристик двигателя и механизма в соответствии с выражением

$$\frac{M_J}{\Delta\omega} = \beta_{\text{ДВ}} - \beta_{\text{М}} < 0,$$

где M_J – динамический момент привода; $\Delta\omega$ – приращение частоты вращения; $\beta_{\text{ДВ}}$ и $\beta_{\text{М}}$ – жесткости механических характеристик двигателя и механизма.

Быстродействие механической части привода характеризуется электромеханической постоянной времени $T_{\text{М}}$, имеющей порядок от десятых долей до нескольких секунд.

Второй и третий уровни – электроэнергетические. Для получения двигателем электроэнергии с требуемыми параметрами амплитуды и частоты напряжения в каждой фазе, а также для управления и регулирования параметров потока энергии служит статический преобразователь. Поскольку двигатель – непрерывный нелинейный элемент, а преобразователь – нелинейный дискретный элемент, то возникает необходимость в согласовании их работы. Для получения максимального КПД, коэффициента искажения необходимо питать двигатель квазисинусоидальными током и напряжением. На этих уровнях решается задача улучшения энергетических и динамических характеристик привода. Быстродействие электроэнергетических уровней характеризуется электромагнитными постоянными времени $T_{\text{Э}}$, имеющими порядок сотых и десятых долей секунды.

Четвёртый уровень – интерфейсы локального управления и регулирования параметров энергетического канала привода. От организации данного интерфейса зависят функциональные и сервисные возможности привода, точность и быстродействие. Интерфейс реализован в виде портов, таймеров, цифроаналоговых преобразователей и усилителей формирования сигналов управления силовыми транзисторами или тиристорами.

Пятый уровень – устройства информационно-измерительной системы привода. Измеряемыми являются физические величины:

- электрические (ток, напряжение, электродвижущая сила (ЭДС));
- механические (момент, скорость, перемещение и т.п.);
- технологические (давление, температура, напор и т.п.).

Устройства пятого уровня осуществляют преобразование сигналов с первичных датчиков, гальваническую развязку, усиление, интегрирование и аналого-цифровое или импульсно-цифровое преобразование сигналов для представления их в формате микроконтроллерной системы управления. Быстродействие данного уровня определяет точность и быстродействие четвертого уровня и обеспечивается выбором принципов преобразования сигналов, характером обмена в цифровой системе и конкретной аппаратной реализацией.

Микроконтроллерная система автоматического управления (САУ) содержит энергетическую модель электромеханического устройства, которая учитывает четыре составляющих: сеть, преобразовательное устройство, двигатель и технологический механизм в плоскостях потребления энергии, ее использование и энергоуправление.

Шестой уровень – интерфейс межприводного обмена. Реализует координацию работы локальных электроприводов между собой и связь с центральной ЭВМ высшего уровня иерархии. Обмен, как правило, осуществляется в цифровом коде с высоким быстродействием при наличии большой оперативной памяти для статистической обработки информации, с контролем текущего состояния каждого привода и возможностью интерактивного режима с оператором.

Последние годы ознаменовались значительными успехами силовой электроники – было освоено промышленное производство биполярных транзисторов с изолированным затвором IGBT, запираемых тиристоров GTO, коммутируемых тиристоров с интегрированным управлением IGCT, а также силовых интеллектуальных модулей IPM с встроенными средствами защиты ключей и интерфейсами для непосредственного подключения к микропроцессорным системам управления. Рост степени интеграции в микропроцессорной технике и переход от микропроцессоров к микроконтроллерам со встроенным набором специализированных периферийных устройств сделали необратимой тенденцию массовой замены аналоговых систем управления приводами на системы прямого цифрового управления [6].

Под прямым цифровым управлением понимается не только непосредственное управление от микроконтроллера каждым ключом силового преобразователя, но и обеспечение возможности прямого ввода в микроконтроллер сигналов различных обратных связей (независимо от типа сигнала: аналоговый или цифровой) с последующей программно-аппаратной обработкой внутри микроконтроллера. Таким образом, система прямого цифрового управления ориентирована на отказ от значительного числа дополнительных интерфейсных устройств и создание одноплатных контроллеров управления приводами. В пределе встроенная система управления проектируется как однокристалльная и вместе с силовым преобразователем и исполнительным двигателем конструктивно интегрируется в одно целое – мехатронный модуль движения.

Электроприводы, управляемые по развитым алгоритмам с помощью микроконтроллеров, имеют ряд преимуществ:

- увеличение энергетической эффективности системы – регулирование скорости снижает потери мощности;

- усовершенствование функционирования – цифровое управление может добавить такие свойства, как интеллектуальные замкнутые контуры, изменение частотных свойств, диапазона контролируемых неисправностей и способность к взаимодействию с другими системами;

- упрощение электромеханического преобразователя энергии – регулируемые приводы позволяют устранить необходимость в трансмиссиях, коробках передач, редукторах;

- простота обновления программного обеспечения – системы на базе микроконтроллеров с флеш-памятью могут быстро изменять при необходимости свой алгоритм и регулируемые переменные.

С внедрением регулируемых приводов системы зачастую усложняются. Основным условием их использования является сохранение общей стоимости системы в обоснованных границах. Для ряда систем, особенно в быту, общая стоимость должна соответствовать стоимости нерегулируемого варианта.

Энергосбережение в электроприводе является частью общего процесса эффективного использования электроэнергии и определяется тремя процессами:

- энергопотреблением;
- энергоиспользованием потребляемой энергии;
- энергоуправлением процесса энергопотребления.

Энергопотребление – процесс формирования составляющих мощности на входе преобразователя при работе электропривода. Этот процесс характеризуется зависимостями активной, реактивной мощности и мощности искажения от скорости и момента двигателя.

В вопросах энергопотребления необходимо четкое представление о характере преобразования энергии, о составляющих мощности, о показателях качества электроэнергии (ПКЭ) [5], их влиянии на характеристики электромеханических преобразователей.

Энергоиспользование – использование мощности, потребляемой из сети. Этот показатель характеризует качественную сторону процесса энергопотребления. Он показывает, насколько эффективно использование потребляемой электроэнергии; какая часть из нее относится к потерям, а какая – к полезной мощности, идущей на вал рабочей машины; как распределяются потери, которые определяют рабочий режим электродвигателя, его температуру и надежность.

В вопросах энергоиспользования важнейшим является баланс составляющих мощности, который позволяет выявить механизмы старения электрооборудования в дополнение к известным и связанным в основном с термическим характером воздействия энергопроцессов на рабочие и эксплуатационные характеристики.

Энергоуправление – процесс формирования режимов энергопотребления с помощью технических устройств и систем, воздействующих на цепи управления электроприводом и преобразовательными устройствами, питающими эти цепи. К энергоуправлению следует отнести управление перераспределением потерь в электрических двигателях, оптимизацию потерь, минимизацию нагрева активных частей электрической машины, снижение уровня потребляемой реактивной мощности. При этом следует иметь в виду, что указанные выше положительные свойства система электропривода приобретает не за счет использования некоторых других технических средств, а за счет использования регулировочных возможностей системы электропривода.

Такой энергетический подход, базирующийся на общности процессов энергопотребления, энергоиспользования и энергоуправления, связывает в единый электромеханический комплекс элементы, рассматриваемые ранее без взаимосвязи: энергосистема, потребитель (электропривод) и технологическая установка. Каждый из компонентов имеет свои регулировочные возможности в области управления энергопотреблением, перераспределением потерь и др.

1.4. Состояние и перспективы развития силовых полупроводниковых элементов регулируемого электропривода

Выбор базового ключевого элемента играет решающую роль в конструировании преобразователя любого типа. Преобразование электроэнергии постоянно нуждается в идеальном ключе. Такой ключ должен иметь следующие основные характеристики:

- большой ток (коммутируемый ток; действующее, среднее и максимальное значения; ударный ток);
- высокое напряжение (импульсное повторяющееся, неповторяющееся перенапряжение, длительное постоянное);
- быстрое переключение (короткое время задержки на включение и выключение, малое время фронтов при коммутации, малое время включения и выключения);
- малые потери (статические и динамические);
- высокую частоту (быстрое переключение, низкие динамические потери);
- высокую надежность (низкая вероятность отказа, высокая энергетическая и тепловая стойкость, высокая коммутирующая способность, высокая электродинамическая стойкость);
- компактную конструкцию (низкие потери).

Эти идеалы в разработке приборов реализуются двумя путями: через структуру транзистора и через структуру тиристора, при этом основным достоинством тиристора являются низкие статические потери, а транзистора – его хорошая способность к выключению.

В течение ряда десятилетий, с момента промышленного освоения в 60-х годах, силовой триодный тиристор на базе классической четырехслойной $p-n-p-n$ -структуры оставался практически единственным полупроводниковым прибором для преобразовательных устройств. Неизменность функциональных возможностей базовых приборов привела к тому, что основные схемные решения по преобразователям на их основе длительное время также оставались неизменными.

Ситуация в силовой электронике кардинально изменилась в конце 80-х годов, в связи с промышленным освоением силовых запираемых тиристоров GTO (Gate turn off). На сегодня основные статические параметры GTO сравнимы с таковыми для обыкновенных тиристоров. Главный недостаток GTO – значительные токи управления, приводящие к необходимости создания громоздких и мощных блоков управления и систем передачи энергии на управляющий электрод (УЭ) тиристоров. Именно это обстоятельство сдерживает широкое использование GTO в преобразователях.

К середине 90-х годов появились другие полупроводниковые приборы ключевого типа – мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor). Уступая GTO по статическим параметрам, они принципиально превосходят их по динамике (прежде всего, по времени включения и запираения). Кроме того, IGBT, имеющий в составе своего электрода управления полевой транзистор, не требует больших токов для запуска процессов включения и запираения, тем самым облегчая систему управления [4].

В настоящее время транзисторы IGBT выпускаются, как правило, в виде модулей с односторонним прижимом и охлаждением, и только компания «Toshiba Semiconductur Group» сообщает о создании IGBT в таблеточном корпусе (PP HV IGBT – preess park high voltaqe IGBT), что позволяет осуществить двухстороннее охлаждение прибора.

Некоторые разработчики стремятся сделать прибор, объединяющий лучшие качества обоих типов приборов, используя преимущества тиристора во включенном состоянии, совмещая его с транзистором, как с лучшим на этапе выключения.

Тиристорная структура преобладает по числу предлагаемых приборов, потому что они обладают изначальной способностью проводить большие токи с минимальными потерями. Однако до сегодняшнего дня было только несколько серьезных кандидатов на высоковольтное при-

менение: GTO (тиристор) с его громоздким снаббером и IGBT (транзистор) с присущими ему большими потерями. Последние разработки показали превосходство приборов, которые удачно комбинируют лучшие характеристики тиристоров и транзисторов, полностью удовлетворяя требованиям воспроизводимости (серийной пригодности) и высокой надежности.

В самое последнее время появилась совершенно новая разработка, одновременно созданная фирмой «ABB Semiconductors» и фирмой «Mitsubishi». Это так называемый коммутируемый по электроду управления тиристор (Gate Commutated Thyristor – GCT) и отличающийся от него наличием встроенного интегрированного блока управления тиристор IGCT (Integrated GCT).

Тиристоры GCT – это полупроводниковые приборы, базирующиеся на GTO-структуре, чья управляющая цепь имеет такую низкую индуктивность, что переход катод – эмиттер может быть закрыт «мгновенно», практически преобразуя прибор в выключающийся биполярный транзистор.

В этих приборах комплексно реализованы требования к силовому ключевому элементу. GCT одновременно сочетает в себе симметричную таблеточную конструкцию с двухсторонним теплоотводом, имеет минимальное падение напряжения во включенном состоянии, не требует высокоэнергоемких цепей питания блоков управления, обладает достаточной помехоустойчивостью при невысоких динамических потерях и, в силу особенностей требуемого управляющего импульса (крутизна тока запирающего до 3000 А/мкс), отличаются идентичностью динамических характеристик.

В результате почти на порядок уменьшается (по сравнению с GTO) время коммутации, снижаются коммутационные потери. GCT могут работать без снабберной емкости. Тиристоры IGCT открывают практическую возможность последовательного их соединения для создания высоковольтных полностью управляемых тиристорных вентилях. Кроме того, в IGCT имеется интегрированный на одном кристалле с GCT обратный быстро восстанавливающийся диод.

На мировом рынке представлена широкая и быстро меняющаяся номенклатура силовых полупроводниковых приборов. Их конструкция становится все более совершенной, мощность неуклонно возрастает. Появляется все больше альтернативных вариантов силовых ключей для применения в преобразователях. Правильный выбор базового силового прибора определяет конструктивные, функциональные и стоимостные преимущества устройства по сравнению с аналогами, использующими в своей главной схеме менее удачные для данного случая приборы.

Параметры мощных полупроводниковых силовых приборов различных типов приведены в табл. 1.1 [19].

Таблица 1.1

Параметры силовых полупроводниковых приборов

Тип прибора	Фирма-изготовитель	Марка	I , А	U_{DRM} , В	U_{RRM} , В	U , В
Традиционный тиристор SCR	«ABB Semiconductors»	5STP 34N5200	3350	4400	4200	2,54
GTO	«ABB Semiconductors»	5SGT 30J6004	3000	6000	17	3,35
IGCT	«ABB Semiconductors»	5SHY 35L4502	4000	6000	19	2,65
GCT	«Mitsubishi»	PGC4000AX-90DS	4000	4500	19	2,65
IGBT (PP HV IGBT)	«Toshiba Semiconductor Group»	ST1200FXF21	1200	3300	20	4,5

Примечания:
 1. Ток I для традиционного тиристора – номинальный средний ток; для остальных (полностью управляемых) приборов – максимальный повторяющийся запираемый ток.
 2. ΔU для традиционного тиристора определяется при амплитудном токе $I_T = \pi I$. Значения ΔU для остальных (полностью управляемых) приборов определяются при максимальном повторяющемся запираемом токе I .
 3. Обозначения U_{DRM} , U_{RRM} для IGBT следует понимать как U_{CES} , U_{GES} соответственно

Сравнение потребительских характеристик выбранных электронных ключей представлено в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Характеристику электронных ключей

Тип прибора	Преимущества	Недостатки	Цена, отн. ед 1 о.е = 560 DM
Традиционный тиристор SCR	Самые низкие потери во включенном состоянии. Самая высокая перегрузочная способность. Высокая надежность. Легко соединяется параллельно и последовательно	Не способен к принудительному запираению по управляющему электроду. Низкая рабочая частота	$\approx 0,5$
GTO	Способность к управляемому запираению. Сравнительно высокая перегрузочная способность. Возможность последовательного соединения. Рабочие частоты до 250 Гц при напряжении до 4 кВ	Высокие потери во включенном состоянии. Сложные системы управления и передачи энергии на тиристор. Очень большие потери в системе управления. Большие потери на переключение	≈ 1

IGCT	Способность к управляемому запи- ранию. Перегрузочная способно- сть та же, что и у GTO. Низкие потери во включенном состоянии на пере- ключение. Рабочая частота – до еди- ниц кГц. Встроенный блок управле- ния. Возможность последовательно- го соединения	Не выявлены из-за от- сутствия достаточного опыта эксплуатации	$\approx 1,5$
IGBT (PP HV IGBT)	Способность к управляемому запи- ранию. Самая высокая рабочая час- тоты (до 10 кГц). Простая незнерго- емкая система управления. Встроенный драйвер	Очень высокие потери во включенном состоя- нии	≈ 2

В настоящее время основными приборами силовой электроники в области коммутируемых токов до 50 А являются:

- диоды;
- тиристоры SCR;
- биполярные транзисторы (BPT – Bipolar Power Transistor);
- полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET – Metal Semiconductor Field Effect Transistor);
- силовые интегральные схемы (Power IC);
- интеллектуальные силовые интегральные схемы (Smart Power IC).

В области коммутируемых токов более 50 А основными приборами силовой электроники являются:

- силовые модули на базе биполярных транзисторов BPT;
- силовые модули на базе IGBT;
- тиристоры SCR;
- запираемые тиристоры GTO;
- коммутируемые тиристоры GCT;
- коммутируемые тиристоры с интегрированным управлением IGCT;
- диоды.

В настоящее время IGBT обеспечивают коммутацию токов до 1800 А и напряжений до 4,5 кВ. При этом время переключения биполярных транзисторов с изолированным затвором лежит в диапазоне 200–400 нс. Появление в последние годы IGBT с напряжением более 1,2 кВ привело к вытеснению запираемых тиристоров (GTO) в устройствах мощностью до 1 МВт и напряжением до 3,5 кВ.

Возможность работы без применения дорогостоящих снабберных цепей (цепей формирования траектории переключения) для защиты от превышения du/dt и di/dt , а также громоздких блоков управления, легкость последовательного соединения IGCT делает предпочтительным применение их в высоковольтных преобразователях мощностью 1–100 МВ·А.

При существующей технической возможности последовательного и параллельного соединения приборы IGCT позволяют наращивать уровень мощности до нескольких сотен мегавольт-ампер (МВ·А). Первый преобразователь мощностью 100 МВ·А, основанный на IGCT, уже реализован и находится в эксплуатации более года, оправдывая тем самым предполагаемый высокий уровень надежности новой технологии.

Технология тиристоров благодаря осознанным законам физики имеет преимущества по сравнению с транзисторной технологией в способности блокировать напряжение свыше 2,5 кВ, распределение плазмы сходно с распределением плазмы в диодной структуре, в результате чего достигается наилучшее оптимальное соотношение между напряжением в открытом состоянии и блокирующим напряжением.

Таблица 1.3

Параметры мощных силовых ключей

Параметр \ Тип	GTO	IGBT	IGCT
Число отказов за 10^9 ч (FIT)	7000	13000	2300
Потери, кВт	72	45	26
Масса, кг	190	70	60
Объем, л	456	200	80
Термоциклы ($\Delta T = 80$ °C)	200	80	200
Модульность <i>пк</i>	36×5	18×2,5	1×32

Прибор IGCT сегодня сочетает в себе оптимальную комбинацию доказанных технологий тиристоров с присущими им низкими потерями и бесшумной, высокоэффективной, выгодной технологии выключения путем воздействия на УЭ. Прибор IGCT – идеальное решение для применения в области силовой электроники среднего и высокого напряжений. Таким образом, практически не остается зоны для применения GTO и SCR (как ранее и для силовых биполярных транзисторов).

Уникальные характеристики металл оксид полупроводник (МОП)-управляемых приборов оказали решающее влияние практически на все стороны теории и практики силовой электроники.

В схемотехнике доминирующим стал принцип коммутации напряжения. На смену многочисленным схемам принудительной коммутации пришли классические схемы преобразователей. В подавляющем большинстве преобразователей постоянного тока в переменный используются инверторы напряжений.

Высокая рабочая частота МОП-транзисторов обеспечила повсеместное внедрение принципов широтно-импульсной модуляции.

МОП-управляемые приборы стимулировали развитие силовых модулей, в которых ключевые элементы соединяются методами пленочной технологии на общей теплопроводящей изолирующей подложке, образуя всю или часть силовой схемы преобразовательного устройства. Низкий уровень потерь и малая мощность управления МОП-транзисторов позволили реализовать силовые интегральные схемы, в которых на одном кристалле технологическими приемами изготавливаются силовые ключевые элементы, схемы их запуска и защиты, устройства управления, регулирования и диагностики. Из-за наличия в их составе элементов, выполняющих логические операции и автоматически обеспечивающих определенные режимы работы нагрузок, такие устройства получили название интеллектуальных (Smart Intelligent) схем.

Интеллектуальные схемы оказали огромное влияние на развитие силовой электроники, особенно в зоне небольших мощностей и низких напряжений. Осуществляя связь между управляющими командами малой мощности и нагрузкой, силовые интегральные схемы представляют собой физически активную часть преобразовательного устройства. Силовые интегральные схемы позволяют в несколько раз снизить массу, габариты, трудоемкость изготовления и, как следствие, себестоимость оборудования, повышая при этом его надежность.

Однокристалльные силовые интегральные схемы наиболее широко применяются в автомобильной электронике, в качестве инверторов, контроллеров постоянного и переменного тока.

Появление современных силовых интегральных схем изменило и характер изготовления преобразовательного оборудования, обеспечив значительное снижение доли ручного труда. Основные трудозатраты на изготовление преобразовательного оборудования переносятся на этап автоматизированного производства силовых интегральных схем. Благодаря этому повышается качество изготовления. Наличие встроенной диагностики обеспечивает повышение эксплуатационной надежности оборудования, которая увеличивается также из-за уменьшения количества дискретных элементов и монтажных соединений. Допустимость работы непосредственно от микроконтроллеров расширяет функциональные возможности силовых интегральных схем.

Если однокристалльные силовые интегральные схемы выпускают, главным образом, на низкие напряжения (несколько десятков вольт), то гибридные схемы изготавливаются практически на все необходимые уровни напряжения как промышленных, так и бытовых сетей. Ежегодный рост продаж этих элементов составляет до 30 %.

Перспективы развития различных приборов силовой электроники состоят в следующем [20].

Биполярные транзисторы ВРТ. Из-за сложности и большой стоимости схем управления, низких быстродействия и стойкости к перегрузкам на сегодня это уже устаревший компонент. Однако быстродействующие ВРТ пока имеют важное преимущество перед MOSFET по показателю «коммутируемая мощность/цена» для диапазона напряжений более 400 В. Поэтому силовые биполярные транзисторы останутся эффективным компонентом для дешевых массовых применений (например, ключевые источники питания).

Тиристоры SCR. Несмотря на очевидные достоинства: низкое падение напряжения (1,2–1,5 В для среднего диапазона напряжений и немного больше для высоковольтного диапазона), высокая плотность тока, наивысшее значение показателя «коммутируемая мощность/площадь кремния», высокие коммутируемые напряжения (сегодня 8 кВ) и токи (4кА), простота и низкая стоимость схем управления, стойкость к перегрузкам по току, высокая надежность прижимной таблеточной конструкции, из-за одного существенного недостатка – невозможности выключения по управляющему электроду, этот класс приборов силовой электроники сегодня можно отнести к устаревшим. Этот прибор больше и больше будет вытесняться полностью управляемыми приборами: IGBT и IGCT. Так как SCR имеет все же наивысшие значения показателя «коммутируемая мощность/цена», то две области применения останутся предпочтительными для их применения:

- бытовые приборы, где цена является определяющим фактором. Рынок триаков, особенно в комбинации «микроконтроллер + триак», будет увеличиваться, для решения проблем дешевых массовых применений;

- сверхмощные и сверхсильноточные применения в преобразователях с естественной коммутацией (высоковольтные линии передачи постоянного тока, компенсаторы реактивной мощности, выпрямители для гальваники, металлургии и т.п.).

Улучшение характеристик и развитие SCR будет связано с объединением некоторых вспомогательных функций в высоковольтном тиристоре (подобно защите от перенапряжений), созданием интегральных двух-, четырех- и шестиключевых тиристорных схем на одном кристалле. Развитие триаков (симисторов) связано с улучшением стойкости к du/dt , совместимости управления с выходом микроконтроллера, разработкой новых корпусов.

Запираемые тиристоры GTO и IGCT. Модернизация GTO за счет применения новых технологий (буферного слоя, «прозрачного» эмиттера, улучшения контроля времени жизни за счет протонного излучения, объединение в одном устройстве со схемой управления) позволили

в IGCT повысить быстродействие, значительно сократить статические и динамические потери, обеспечив работу без снаббера в диапазоне напряжений до 4,5 кВ и выше и токов в нескольких килоампер (кА). Поэтому в высоковольтных (более 3,5 кВ) применениях доминирующее положение займут IGCT. В развитии IGCT в ближайшие пять лет намечаются следующие этапы: бесснабберное использование, расширение диапазона коммутируемых напряжений до 6 кВ и далее до 9 кВ, низкотемпературная сварка, приборы с жидкостным охлаждением, пластмассовые корпуса, модули с изолированным основанием.

Полевые транзисторы с изолированным затвором MOSFET. Обладая всеми преимуществами по высокой скорости коммутации, низкими статическим и динамическим потерями, малой мощностью управления, высокой стойкостью к перегрузкам, MOSFET являются и будут главным компонентом для низковольтных применений и использования в «интеллектуальных» силовых интегральных схемах Smart IC.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT. На сегодняшний день и в ближайшем будущем этот класс приборов силовой электроники занимает и будет занимать доминирующее положение для диапазона мощностей от единиц киловатт до единиц мегаватт. Дальнейшее развитие IGBT связано с требованиями рынка и будет идти в следующих направлениях:

- повышения диапазонов предельных коммутируемых токов и напряжений (1–2 кА, 5–7 кВ);
- повышения стойкости к перегрузкам и аварийным режимам;
- снижения прямого падения напряжения;
- разработки новых структур с плотностями токов, приближающихся к тиристорным;
- развития «интеллектуальных» IGBT (с встроенными функциями диагностики и защит) и модулей на их основе;
- создания новых высоконадежных корпусов, в том числе с использованием прижимной конструкции.

Развитие качественной силовой полупроводниковой техники на транзисторах IGBT и тиристорах IGCT решает ряд важных задач повышения энергетической эффективности регулируемого электропривода.

Во-первых, полностью управляемая техника позволит радикально решить вопросы качества потребляемой энергии (потребление реактивной мощности, генерирования гармоник тока и напряжения). В преобразователях с широтно-импульсным регулированием применяют неуправляемые входные выпрямители, что обеспечивает коэффициент сдвига первой гармоники тока относительно напряжения сети, близкий к 1,0.

В системах фазового управления напряжением возможно регулирование с достаточно высокими показателями по коэффициенту мощности и коэффициенту искажения при различном сочетании преобразовательных устройств на традиционных тиристорах и запираемых приборах.

Во-вторых, применение запираемой техники приводит к существенному снижению затрат на электротехническое оборудование – энергопитающие сети, трансформаторное и распределительное оборудование. Использование регулируемого электропривода с неуправляемым выпрямителем с коэффициентом сдвига, равным 1,0 во всем диапазоне регулирования, позволит снизить расчетную мощность согласующего трансформатора в зависимости от реальной тахограммы технологического механизма. Применение запираемой техники в электроприводах постоянного тока позволит отказаться от запаса по углу для устойчивого инвертирования. При этом появляется возможность снижения расчетной мощности согласующего трансформатора за счет уменьшения его выходного напряжения обратно пропорционально косинусу минимального значения угла опережения.

В-третьих, применение силовой запираемой техники позволит создать принципиально новые технические решения систем электропривода. Представляется реальным создание электромеханических систем с синхронными двигателями индукторного возбуждения или с возбуждением от постоянных магнитов. Использование запираемой техники существенно повышает перегрузочную способность вентильного двигателя (ВД) и исключает трудности реализации пускового режима [7].

Открываются также широкие возможности создания массового частотно-регулируемого привода с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Запираемая силовая техника позволила создать системы электропривода переменного тока, которые по своим характеристикам, включая динамические, существенно превысят показатели приводов постоянного тока.

1.5. Направления энергосбережения средствами промышленного электропривода

1.5.1. Выбор электродвигателя

Энергосбережение по отношению к простейшему неуправляемому самому массовому электроприводу состоит в совершенствовании процедуры выбора двигателя для конкретной технологической установки с целью соблюдения номинального теплового режима двигателя в процессе эксплуатации.

Постановка задачи очевидна – двигатель заниженной мощности быстро выходит из строя, а двигатель завышенной мощности преобразовывает энергию неэффективно, т.е. с высокими удельными потерями в самом двигателе (низкий КПД) и в подводящих линиях (низкий $\cos\varphi$). Решение задачи не всегда элементарно, часты ошибки, а т.к. простейших электроприводов миллионы, то возможен большой ущерб. В случаях, когда нагрузка неизменна, ошибки вызваны лишь низкой квалификацией разработчиков (двигатель выбирали по диаметру вала). Когда нагрузка меняется, выбор оказывается значительно сложнее, что ещё усугубляется недостаточностью исходной информации, паспортных и каталожных данных.

В основе взаимоотношений между энергоснабжающей организацией и предприятием находятся устанавливаемые, с учетом тех или иных факторов, тарифы на электроэнергию. Несовершенство тарифа очевидно, так как он не учитывает качество потребляемой энергии и влияние этого параметра на характеристики электрооборудования.

Минимальные затраты энергии возможны при разной степени аварийности электрооборудования, представляющей собой достаточно сложную функциональную зависимость от состояния оборудования, уровня его обслуживания, состояния энергетического хозяйства в целом, включая и характеристики электроэнергии. Общие затраты включают не только плату за электроэнергию, преобразованную тем или иным способом в полезный продукт, но и расходы на ремонт и обслуживание электрооборудования. По этой причине целесообразнее рассматривать показатель, который равен сумме непосредственных платежей за электроэнергию и затрат на восстановление электрооборудования:

$$C = C_1 + C_2,$$

где C_1 – затраты на электроэнергию, определенные по трехставочному или зонному тарифу; C_2 – стоимость ремонтов, восстановления электрооборудования.

Последний показатель достаточно высок и в основном показывает состояние энергохозяйства: при удовлетворительном – затраты на ремонт минимальны, при неудовлетворительном – сравнимы с платежами по основным статьям.

Известно, что в отдельных подотраслях промышленности аварийность электродвигателей колеблется от 20 до 60–70 % в год, причем указанные показатели отличаются даже в случае однотипных предприятий или производств. Характерно, что при общем спаде производства количество аварийных выходов машин не уменьшается, а растет.

С учетом недогрузки электрических машин в нормальном технологическом режиме на 20–25 % и снижении производительности в 2,5–3 раза, затраты на ремонт двигателей (при наработке на отказ 4000 час) вплотную приближаются к стоимости электроэнергии, которую потребил бы двигатель за время эксплуатации между двумя ремонтами при условии, что цена 1 кВт·ч находится на уровне 1–1,1 р. С учетом транспортных и иных расходов, связанных с аварийным выходом двигателей из строя, удельные затраты на ремонт приближаются к соответствующему показателю для новых заводских машин.

1.5.2. Переход к регулируемому электроприводу

Повышения экономичности массового нерегулируемого электропривода посредством перехода на энергосберегающие двигатели и двигатели улучшенной конструкции, специально предназначенные для работы с регулируемым электроприводом [21].

В энергосберегающих двигателях за счет увеличения массы активных материалов (железа и меди) повышены номинальные значения КПД и $\cos\varphi$. Энергосберегающие двигатели используются, например, в США и дают эффект при постоянной нагрузке. Целесообразность применения энергосберегающих двигателей должна оцениваться с учетом дополнительных затрат, поскольку небольшое (до 5 %) повышение номинальных КПД и $\cos\varphi$ достигается за счет увеличения массы железа на 30–35 %, меди на 20–25 %, алюминия на 10–15 %.

Ориентировочные зависимости КПД и $\cos\varphi$ от номинальной мощности для обычных и энергосберегающих двигателей фирмы «Гоулд» приведены на рис. 1.8.

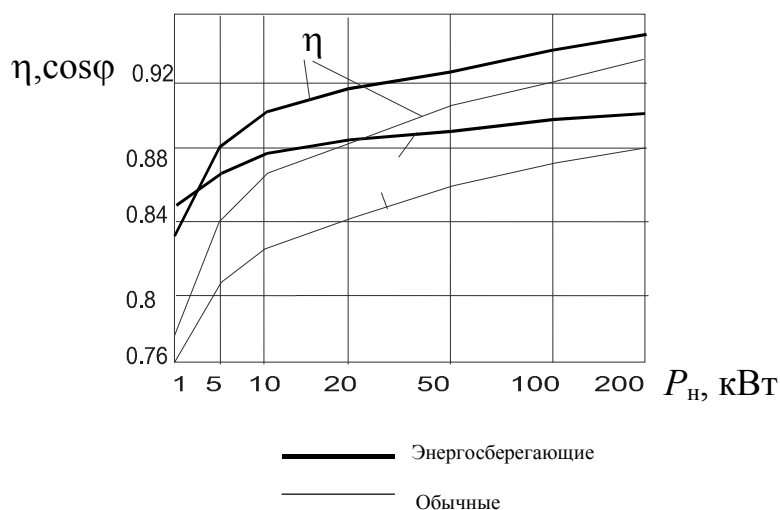


Рис. 1.8. Зависимость КПД от мощности электродвигателя

Ожидается изменение методик проектирования двигателей, отвечающих их применению в составе именно регулируемого электропривода. Прежде всего это касается асинхронного двигателя, для которого отказ от традиционных требований фиксированных амплитуды и частоты питающей сети, прямого включения в питающую сеть, обеспечения заданной перегрузочной способности приводит к существенному изменению конструкции и резкому улучшению характеристик. Можно отметить выпуск серии асинхронных двигателей, спроектированных фирмой «Siemens» для общепромышленных электроприводов. Изменяется методика проектирования и других типов двигателей, расширяется их номенклатура. По-видимому, следует ожидать резкого, взрывного улучшения характеристик по-новому спроектированных двигателей для регулируемого электропривода и соответствующую корректировку требований к системам управления. Так, прогнозируется рост частоты питания двигателей в регулируемом электроприводе до 500–1000 Гц и выше и снижение индуктивностей обмоток.

Наблюдается рост выпуска электропривода с синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов (так называемый бесконтактный ВД постоянного тока). Эти двигатели имеют наилучшие массогабаритные показатели, Среди других типов двигателей выделим индукторный двигатель (Switch Reluctance Motor), разработанный и активно предлагающийся в последние годы. Как утверждают разработчики, его характеристики улучшены, что в комбинации с упрощенным силовым преобразователем позволяет надеяться на его массовое применение.

Перспективным является также синхронно-реактивный двигатель, который по прогнозам обладает массогабаритными показателями, лежащими в промежутке между соответствующими рекордными значениями синхронного двигателя и асинхронного двигателя, а по энергетической эффективности, возможно, превосходит их, причем при более низкой стоимости. Реактивные ВД упрощают схемы коммутаторов и якорных обмоток. При оптимизации угла опережения инвертора можно добиться увеличения момента и КПД привода. Существует оптимальный угол опережения в зависимости от частоты вращения. Увеличение КПД достигается также за счет соответствующего укорачивания шага обмотки.

На рис. 1.9 изображены максимальные мощности электрических машин.

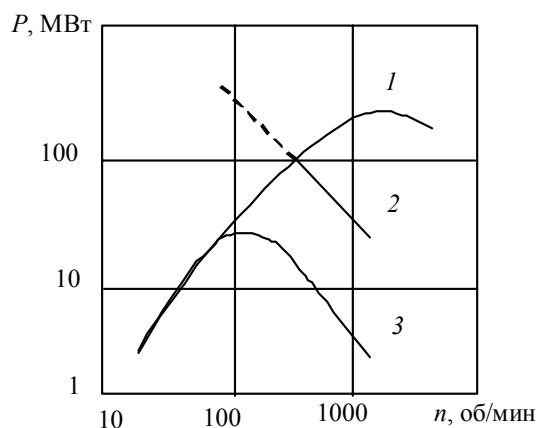


Рис. 1.9. Максимальные мощности электрических машин:
 1 – синхронных со сверхпроводящей обмоткой и с пуском по схеме ВД;
 2 – синхронных с асинхронным пуском; 3 – постоянного тока

Для наилучшего использования синхронного двигателя традиционной конструкции необходимо уменьшить сверхпереходные реактивные сопротивления (за счет открытых пазов статора, увеличения воздушного зазора, демпферной обмотки на роторе и др.) и реакцию якоря (за счет увеличения воздушного зазора и выбором коэффициента полюсного перекрытия).

Можно также отметить, что Первомайским заводом в Донбассе налажен выпуск низковольтных (380/660 В) асинхронных короткозамкнутых двигателей с повышенным пусковым моментом (до 3–4 о.е.). Такие двигатели эффективны в системах регулируемого привода и обладают практически в два раза меньшим пусковым током и могут быть также использованы в условиях угольных шахт (во взрыво-пожароопасных условиях).

1.5.3. Устранение промежуточных передач энергии

Суть проблемы заключается в том, что электрическая энергия доступна на фиксированной частоте (50 Гц), а механическая энергия требуется в широком спектре частот (скоростей). Методы, разработанные много лет назад для решения этой проблемы, используют дорогостоящие системы генератор-двигатель или механические регуляторы.

В состав обобщенной схемы электропривода входят: преобразователь или механический регулятор (коробка скоростей, муфта скольжения), муфта, редуктор и рабочий орган, являющийся частью рабочей машины (рис. 1.10).

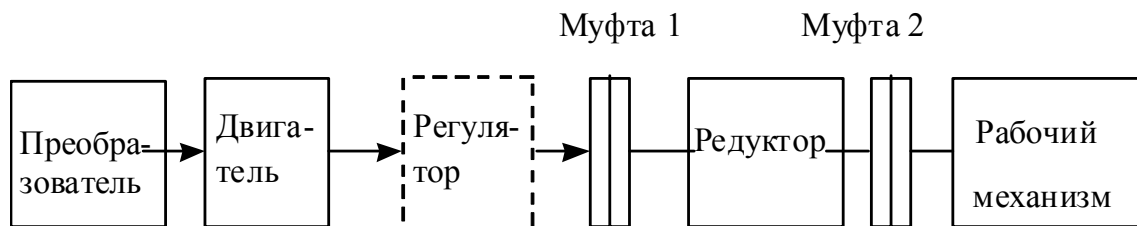


Рис. 1.10. Состав обобщенной схемы электропривода

Ориентировочные значения КПД элементов привода составляют:

- преобразователь – $\eta_{\text{п}} = 0,5 \div 0,95$ (меньшие значения для малых скоростей вращения, большие для более высоких скоростей);
- двигатель – $\eta_{\text{д}} = 0,75 \div 0,95$ (меньшие значения для микромашин, большие – для машин повышенной мощности);
- механический регулятор – $\eta_{\text{рег}} \approx 0,9 \div 0,95$;
- муфта – $\eta_{\text{м}} \approx 0,99$;
- редуктор $\eta_{\text{р}} = 0,95$;
- рабочий механизм – $\eta_{\text{рм}} \approx 0,95$ (для приводного барабана ленточного конвейера).

Коэффициент полезного действия системы электропривода

$$\eta = \eta_{\text{п}} \eta_{\text{д}} \eta_{\text{м}}^i \eta_{\text{р}} \eta_{\text{рм}},$$

где i – количество соединительных муфт.

Подстановка в формулу усредненных значений КПД для привода с электродвигателем мощностью 10–100 кВт дает значение КПД в диапазоне $\eta = 0,65 \div 0,75$. При этом в среднем от семи до десяти процентов мощности теряется в механических передачах. Таким образом, устранение механических передач приводит к существенному повышению КПД системы (на 7–10 %), что является одной из основных тенденций развития электропривода, а в перспективе – совмещения электродвигателя и рабочего органа.

По способу передачи механической энергии от вала двигателя к рабочему механизму электропривод делят на три группы:

- групповой (рис. 1.11, а), в котором несколько рабочих машин приводятся в движение через передачи одним двигателем (привод зерноуборочного комбайна);
- одиночный (рис. 1.11, б), в котором каждый механизм приводится в движение одним двигателем;

- многодвигательный (рис. 1.11, в), в котором отдельный механизм приводится в движение несколькими двигателями (приводной барабан конвейера, барабан подъемной машины, привод поворота мощного экскаватора).

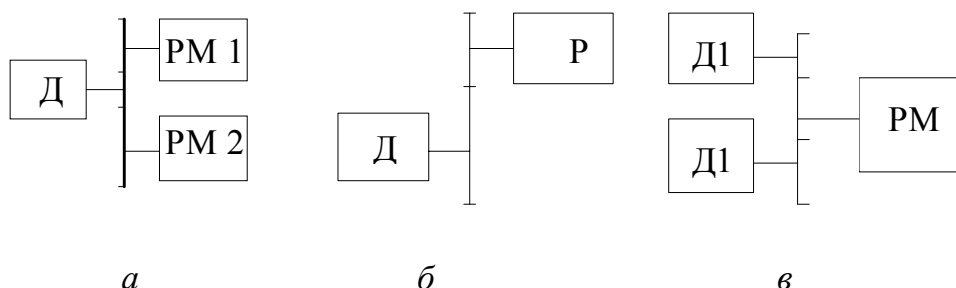


Рис. 1.11. Способы передачи механической энергии:
 а) – групповой; б) – одиночный; в) – многодвигательный

Внедрение одиночного привода, помимо снижения в несколько раз энергоемкости производства за счет устранения множества промежуточных передач и лучшего использования установленной мощности привода, позволило многократно повысить надежность выполнения технологических процессов, кроме того, снизить производственный травматизм, обусловленный наличием большого количества открытых механических передач. Также улучшились условия труда за счет устранения звуковых эффектов, связанных с работой большого количества ременных и цепных передач, разнообразных муфт, вращающихся валов длиной до 20 м, зубчатых и червячных передач и т.д.

Для сообщения движения рабочему механизму необходимо приложить некоторый момент при определённой скорости. При этом мощность на валу составит

$$P = M\omega.$$

Рис. 1.12 показывает распределение энергии в однодвигательном односкоростном приводе.

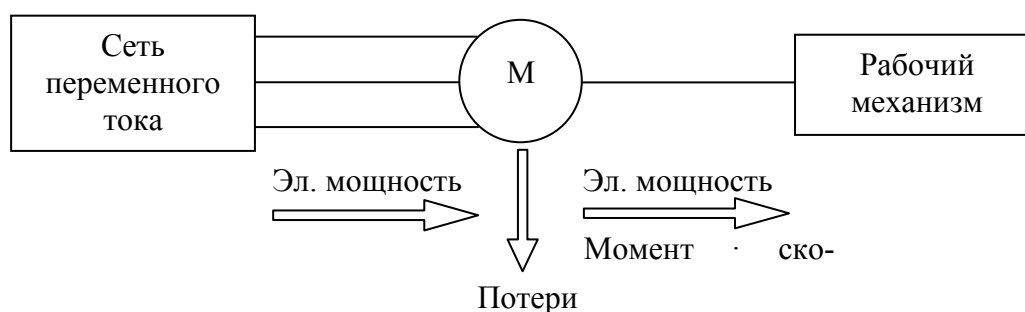


Рис. 1.12. Распределение энергии в однодвигательном электроприводе

Условия меняются, если регулировать скорость рассматриваемого оборудования, используя редуктор фрикционного типа (муфта, ремень, гидравлическое сопряжение и т.д.). В этом случае момент на валу двигателя и рабочего механизма одинаковый, но скорости разные (рис. 1.13). Таким образом, разность мощностей превращается в тепло фрикционной передачи:

$$M\omega_d - M\omega_{pm} = M(\omega_d - \omega_{pm}) = \Delta P.$$

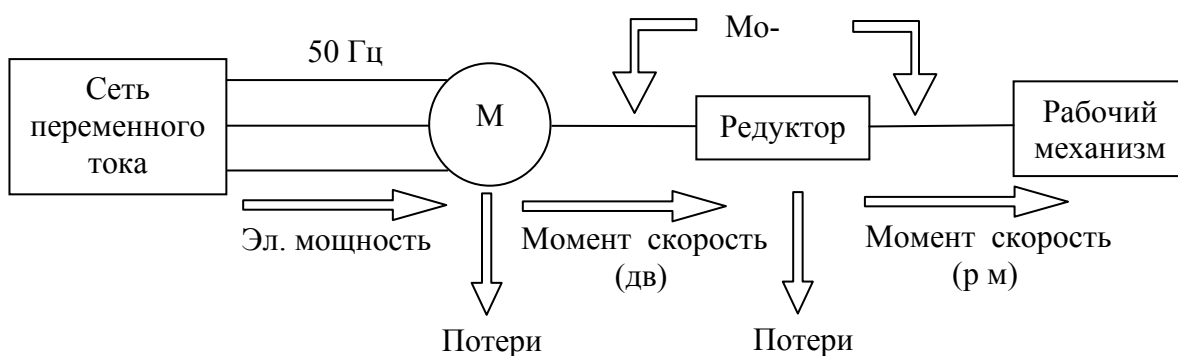


Рис. 1.13. Распределение энергии при наличии редуктора

Другой пример показан на рис. 1.14. В качестве привода насоса используется двигатель с постоянной скоростью [11]. Поток жидкости контролируется закрытием и открытием клапана. Кроме случая, когда клапан полностью открыт, энергия теряется в клапане и насосе. Таким образом, регулирование дросселированием неэффективно.

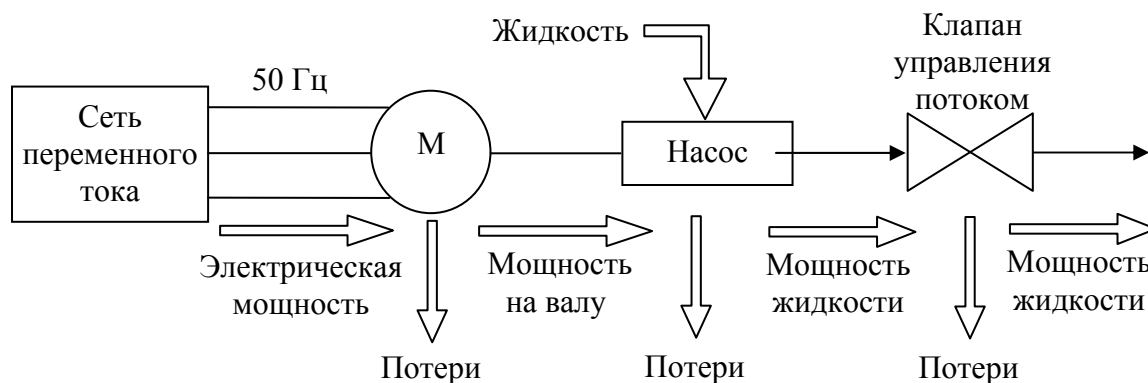


Рис. 1.14. Пример неэффективного дросселирования

Практически нет потерь в случае, когда управление осуществляется при помощи механических передач (рис. 1.15), т.к. передача преобразует и момент, и скорость. Их произведение остаётся постоянным. При хорошем обслуживании, передачи имеют очень малое трение. Таким образом, мощности на входе и выходе привода практически равны. Однако постоянно переключаемые передачи непригодны для приводов с большой мощностью, они дорогие и нуждаются в частом обслуживании. Стационарные многоуровневые коробки передач, хотя и пригодны для мощных приводов, имеют все вышеупомянутые недостатки.

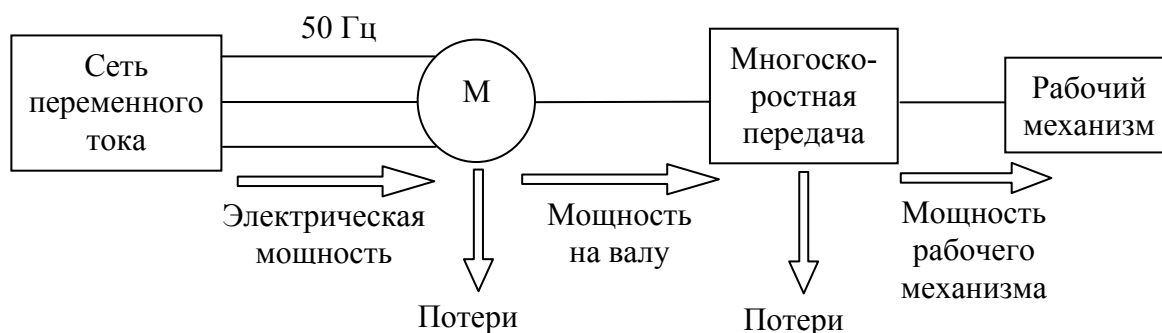


Рис. 1.15. Управление посредством механических передач

При выборе перспективных вариантов систем электроприводов следует учитывать возможность использования многодвигательного электропривода, который в настоящее время получил широкое распространение в промышленности. Его использование обусловлено следующими причинами:

- отсутствием приводного двигателя, редуктора или другой механической передачи требуемой мощности;
- желанием повысить быстродействие привода за счет снижения суммарного момента инерции приводных двигателей;
- необходимостью обеспечения повышенной надёжности приводных устройств путём завышения установленной мощности привода, т.е. создание резерва на случай выхода из строя одного или нескольких двигателей;
- желанием создания более современных машин и механизмов (например, ленточных конвейеров с двумя и более приводными барабанами, установок с промежуточными приводами и др.);
- необходимостью экономии электроэнергии в механизмах с большим диапазоном изменения нагрузки (более чем в 1,5–2 раза).

Применение многодвигательного привода в сложных технологических установках зачастую позволяет значительно упростить и удешевить их за счет устранения сложных и дорогих механических передач между различными исполнительными органами. При этом появляются также возможности повышения производительности, экономичности и улучшения других эксплуатационных характеристик.

1.5.4. Экономия электроэнергии рабочими установками и механизмами

Имеет смысл экономить электроэнергию за счет повышения эффективности выполнения технологического процесса.

Промышленные предприятия требуют повышения эффективности работы технологических установок и механизмов, особенно угольные шахты, которые являются крупными потребителями электрической энергии со сложным электроэнергетическим хозяйством. Установленная мощность отдельных электроприемников шахт составляет десятки тысяч киловатт при годовом потреблении электроэнергии в десятки и даже сотни миллионов киловатт-часов, единичная же мощность отдельных машин достигает нескольких тысяч киловатт.

Структура электропотребления шахты (рис. 1.16) зависит от многих факторов, основными из которых являются глубина шахты, водобильность, производительность и т.д. (ГОСТ 30356–96 «Методы определения норм расходования электроэнергии горными предприятиями».)

Экономия электроэнергии установками и механизмами за счет повышения эффективности выполнения технологического процесса включает в себя следующие основные мероприятия:

- согласование режимов работы установки при изменении нагрузки;
- повышение КПД установки;
- регулирование производительности установки;
- выполнение оптимальной циклограммы и упорядочение графика нагрузок;
- обеспечение нормированной загрузки (для подъемных машин, конвейеров и т.д.);
- контроль состояния технологической установки;
- применение совершенных видов электропривода;
- организационные мероприятия.

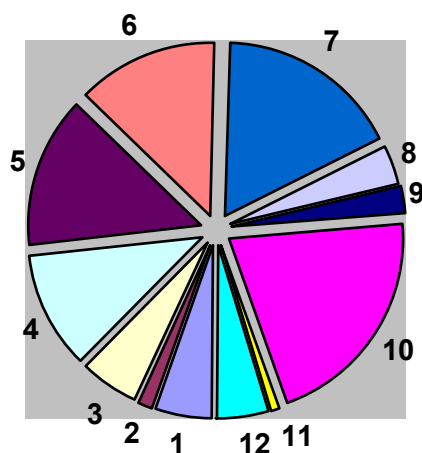


Рис. 1.16. Структура электропотребления шахты:

1 – добычные участки – 5,26 %; 2 – подготовительные участки – 1,29 %; 3 – подземный транспорт – 5,60 %; 4 – кондиционирование воздуха – 10,88 %; 5 – водоотлив – 14,28 %; 6 – подъем – 13,32 %; 7 – вентиляция 17,13 %; 8 – технологический комплекс поверхности – 3,75 %; 9 – выработка сжатого воздуха – 2,46 %; 10 – прочие электроприемники – 20,58 %; 11 – освещение – 0,69 %; 12 – потери электроэнергии – 4,76 %

Особенности добычи угля требуют увеличения электропотребления. Так для водообильных шахт требуется установка десяти и большего количества насосов. Для шахт крутого падения требуется разветвленная сеть сжатого воздуха с компрессорным хозяйством в десятки тысяч киловатт. В глубоких шахтах требуется увеличение мощности подъёмной машины до 10 МВт. В таких условиях экономия электроэнергии в отдельных потребителях и шахты в целом может представлять значительную величину, что в конечном итоге скажется на снижении себестоимости добытого угля.

1.5.5. Выбор рациональных режимов работы и эксплуатации электропривода

В перечень рациональных режимов работы электропривода входит:

- выбор рационального способа и диапазона регулирования скорости электропривода в зависимости от технологических условий работы машин и механизмов;
- выбор рационального способа регулирования скорости в зависимости от характера изменения нагрузки;
- повышение загрузки рабочих машин;
- исключение режима холостого хода;
- снижение напряжения на зажимах двигателя;

- минимизация тока и потерь энергии асинхронного двигателя (АД) при изменении нагрузки;
- оптимизация динамических режимов;
- использование синхронной машины как компенсатора реактивной мощности;
- использование аккумуляторов энергии.

Необходимость изучения технологического режима рабочей машины является основой для возможного комплекса мер, обеспечивающих эффективность энергосбережения. При этом речь может идти как о регулировании скорости технологического агрегата, так и о его управляемости. Под термином «управляемость» понимается возможность изменения параметров технологического режима за счет иных методов воздействия, в том числе и самых простых – периодических пусков и остановок.

Рассматривая, например, электропривод турбомеханизмов, можно отметить, что возможны три принципиально различных способа регулирования технологического параметра:

- аэродинамическим путем, заключающимся в воздействии на характеристики проточной части (дресселированием или установкой угла атаки лопастей направляющего аппарата). Способ связан с существенным снижением КПД;
- изменением скорости вращения путем применения регулируемого электропривода. Это обеспечивает практически неизменный высокий КПД при существенном увеличении капитальных затрат;
- путем включения и отключения нескольких агрегатов в случае, если работает группа электроприводов.

Третий вариант регулирования имеет ограничения – по числу пусков нерегулируемых электроприводов из-за опасности выхода из строя электрических машин, с одной стороны, и по числу пусков для технологического механизма ввиду экстремальных технологических нагрузок в пускаемом агрегате при прямом неуправляемом пуске, с другой. Анализ показывает, что при плавном управляемом пуске практически выполняются два приведенных условия. Применительно к приводам переменного тока как вариант схемы управляемого пуска может служить схема с тиристорным регулятором напряжения (ТРН) в цепи статора. Стоимость таких устройств примерно в пять раз ниже стоимости систем частотно-регулируемого электропривода. В отдельных случаях применение пусковых систем повышает время наработки на отказ синхронных двигателей в несколько раз, рабочих колес центробежного насоса на 15–75 % и др.

Иногда запуск двигателей затрудняются из-за высокой концентрации рабочего тела в рабочей части турбомеханизма (руда в мельнице, заклинивание колес насосов и т.п.). В таких условиях, даже при полном напряжении питания, пусковой момент двигателя может быть меньше момента трогания механизма и обычная схема ТРН для пуска таких технологических машин не дает требуемого положительного результата. В этом случае оправдан перевод ТРН в режим преобразователя частоты, т.е. применения так называемого квазичастотного управления. Это мероприятие дает положительный результат, так как позволяет осуществить предпусковую прокрутку агрегата при частотах 0–0,7 Гц. Применение пусковых устройств позволяет решить две связанные друг с другом задачи: обеспечить реальное энергосбережение средствами электропривода и сохранить работоспособность механического и электромеханического оборудования.

Снижение производительности машин и установок приводит к снижению ресурса работоспособности по целому числу факторов, так или иначе связанных с ростом числа пусков электрических двигателей (в том числе и регулируемых электроприводов). При этом необходимо учитывать следующее:

- в условиях существенного снижения производительности агрегатов и процессов, отсутствия возможности использования регулируемого электропривода из-за его дороговизны существенным резервом экономии электроэнергии являются периодические отключения энергоемких потребителей. При этом необходимо использовать специализированное энергосберегающее оборудование – пусковые системы, обеспечивающие как непосредственную экономию энергоресурсов, так и работоспособность электрических машин;

- насыщенность парка электрическими машинами, бывшими в ремонте, заведомо определяет достаточно высокие расходы на ремонт электрооборудования. При этом высокая аварийность электрических машин определяется не столько низким качеством ремонта, сколько изменением характеристик конструкционных материалов (прежде всего электротехнической стали), ведущих к перераспределению потерь в двигателе и изменению теплового баланса и снижению реальной нагрузочной способности;

- отклонения напряжения питания, ввиду отсутствия средств его эффективного регулирования, приводят к росту потребляемой реактивной мощности асинхронными двигателями, снижению ее генерирования синхронными машинами, увеличению потерь в стали, повышению аварийности двигателя;

- любые формы некачественного питающего напряжения, некачественности потребления энергии потребителем из-за изменения его внутренних характеристик приводят не только к увеличению потерь, но и появлению переменных составляющих электромагнитного момента двигателя. Знакопеременные составляющие момента являются причиной высокочастотных вибраций всех элементов конструкции, преждевременного старения изоляции и повышения аварийности электрооборудования.

Как правило, необходимость регулирования скорости или момента электроприводов производственных механизмов диктуется требованиями технологического процесса. Например, понижение скорости лифта необходимо для точного позиционирования кабины перед остановкой. Однако существует ряд механизмов непрерывного транспорта для перемещения твердых, жидких и газообразных продуктов (конвейеры, вентиляторы, насосы) с нерегулируемым асинхронным электроприводом, который приводит в движение рабочие органы с постоянной скоростью независимо от загрузки механизмов. При неполной нагрузке работа с постоянной скоростью характеризуется повышенным удельным расходом электроэнергии по сравнению с номинальным режимом.

Снижение скорости механизмов непрерывного транспорта при недогрузке позволяет выполнить необходимую работу с меньшим удельным расходом электроэнергии. В этом случае экономический эффект появляется также за счет улучшения эксплуатационных характеристик технологического оборудования. Так, при снижении скорости уменьшается износ тянущего органа транспортера, увеличивается срок службы трубопроводов за счет снижения давления и т.д. Эффект в сфере технологии часто оказывается существенно выше, чем за счет экономии электроэнергии.

С другой стороны, выдвигается необоснованное желание использовать плавно регулируемые системы привода с большим диапазоном регулирования для этих установок. В то же время достаточно большой диапазон регулирования производительности для механизмов с вентиляторным характером нагрузки можно получить при диапазоне изменения скорости, не превышающим 20 %.

В качестве другого примера можно привести лифты в невысоких зданиях (до 16–24 этажа), когда вместо дорогой, сложной и менее надежной плавно регулируемой системы можно обойтись использованием двухскоростного АД с короткозамкнутым ротором и повышенным пусковым моментом.

Такой привод позволяет в несколько раз снизить рабочую скорость кабины перед остановкой, что уменьшает износ тормозного устройства

и увеличивает саму точность остановки. Пуск двухскоростных двигателей – прямой на высокую скорость. Торможение производится переключением напряжения на обмотку малой скорости. При этом двигатель переходит в режим генераторного торможения и частота его вращения снижается в 3–4 раза. Остановка двигателя осуществляется отключением от сети обмотки малой скорости и наложением механического тормоза.

Следующее направление энергосбережения относится к основным потребителям электрической энергии (электроприводам с нерегулируемыми АД), и заключается в создании специальных схемных решений, обеспечивающих минимизацию вредного влияния на энергетические показатели при отклонении нагрузки от номинальной. Специальные регуляторы электрической энергии (регуляторы напряжения), включаемые между сетью и статором двигателя, кроме функций энергосбережения выполняют и другие (управляют режимами пуска и торможения, регулируют скорость и момент, осуществляют защиту, диагностику и т.д.), т.е. повышают технический уровень привода, увеличивают его надежность.

При работе АД имеет место недоиспользование установленной мощности или необоснованное завышение их мощности, а также недогрузка. При этом снижается КПД и коэффициент мощности АД. Регулирование напряжения на статоре АД при постоянной частоте обеспечивает наиболее экономичный режим его работы при изменении нагрузки. При этом минимизируется потребляемый АД ток и тем самым – потери электроэнергии в нем.

Регулирование напряжения АД в функции тока снижает потери электроэнергии до 5 %, что при широком применении асинхронного электропривода позволяет получить большой экономический эффект.

Проблема аккумуляторов энергии для систем электропривода является достаточно важной. Накопители энергии с различными физическими принципами ее аккумуляции перспективны прежде всего для транспортных систем. Определена перспектива в применении накопителей-компенсаторов в электроприводах с резкопеременной нагрузкой, как регулируемых, так и нерегулируемых. Новая элементная база и, прежде всего, малогабаритные емкостные накопители, делают реальным предпосылки к созданию принципиально новых комплектных устройств для современного электропривода – накопительно-компенсирующих устройств с соответствующими системами управления.

1.5.6. Выбор рационального типа электропривода

Для конкретной технологической установки очень важен выбор рационального типа электропривода.

Выбор предполагает:

- анализ технологического процесса, условий эксплуатации и в результате – разработку технических требований к электроприводу;
- выбор перспективных вариантов систем электроприводов, их технико-экономическое сравнение и выбор рационального типа электропривода;
- расчет системы электропривода, в том числе установленной мощности, разработку системы управления;
- разработку конструкторской документации.

Совершенствование технологических процессов и автоматизация производства связаны с применением регулируемого электропривода. Применение регулируемого электропривода способствует решению задач по обеспечению оптимальных режимов работы механизмов, снижению себестоимости и повышению качества выпускаемой продукции, роста производительности труда, повышению эффективности использования энергии, надежности и срока службы оборудования.

Следует упомянуть, что АД с изменяемым сопротивлением в цепи ротора (рис. 1.17) и двигатели постоянного тока независимого возбуждения с регулируемым реостатом (рис. 1.18) управляются регулированием величины потерь.

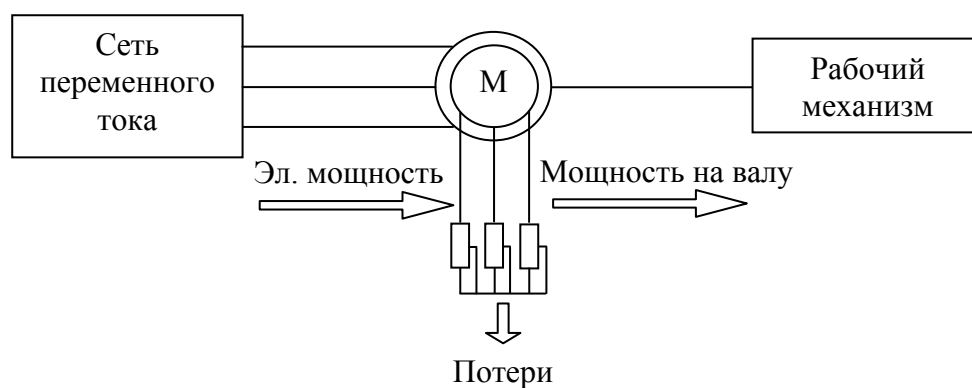


Рис. 1.17. Управление АД величиной потерь

С точки зрения энергосбережения наиболее эффективны регулируемые электроприводы переменного тока, особенно для турбомеханизмов (вентиляторов, компрессоров, насосов), подъемных машин, станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и др. Экономия электроэнергии может составлять до 50 %.

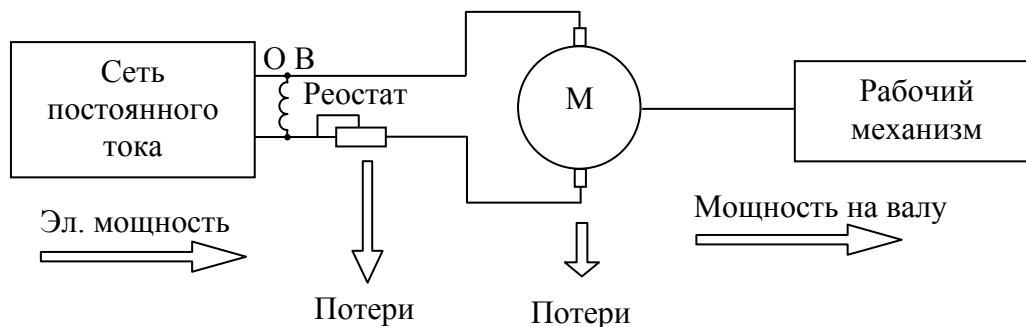


Рис. 1.18. Управление двигателем постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) величиной потерь

Целый ряд промышленных механизмов (подъемно-транспортные механизмы, механизмы транспортно-складских и робототехнических систем, лифты и т.д.) работают с частыми включениями, требуя реализации пускотормозных режимов. Использование для управления такими механизмами относительно недорогих систем ТРН–АД позволяет осуществлять режимы плавного (мягкого) пуска и торможения за счет формирования необходимого временного закона изменения напряжения первой гармоники при пуске или значения постоянного напряжения при динамическом торможении. Это обеспечивает существенное снижение пусковых токов, уменьшение энергопотребления на 3–6 % (в зависимости от мощности двигателя и интенсивности работы), а также решение ряда технологических задач (ограничение механических ударов в кинематических передачах, снижение ускорений и рывков, увеличение надежности и срока службы оборудования).

Если по совокупности требований для управления механизмом целесообразно использовать частотно-регулируемый электропривод, то реализация режимов частотного пуска и торможения позволяет снизить потери энергии в переходных режимах в несколько раз по сравнению с неуправляемыми переходными процессами. В этом случае функциональная схема выглядит, как показано на рис. 1.19. В противоположность рис. 1.12 видно, что двигатель переменного тока питается электроэнергией с изменяемой частотой от преобразователя частоты (ПЧ). Так как скорость двигателя будет соответствовать частоте электрического тока сети, то, регулируя частоту на выходе преобразователя, получим изменение скорости двигателя. Потери энергии, которые наблюдались на рис. 1.13, 1.14, 1.17 и 1.18, будут сведены к нулю.

Весьма перспективны ВД с постоянными магнитами. Новым путем энергосбережения становится перевод двигателей на модульную конструкцию и оптимизацию режимов их работы на базе микроконтроллеров,

что позволит в 3–5 раз снизить потери энергии, в 2–3 раза уменьшить массу двигателей.

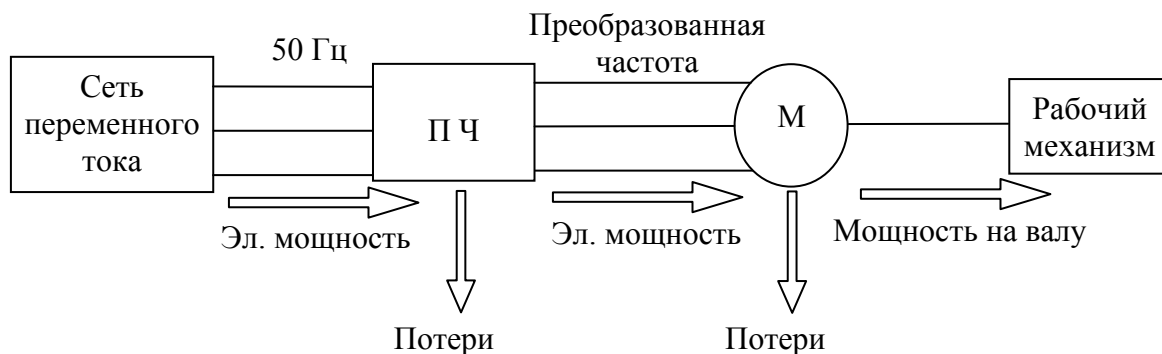


Рис. 1.19. Управление АД с помощью ПЧ

При переходе от нерегулируемого электропривода к регулируемому следует помнить, что:

- экономия энергии часто достигается не за счет собственно привода, а за счет того процесса, который привод обслуживает. При этом экономия может во много раз превосходить собственное потребление электропривода;
- для получения полезного энергетического эффекта часто необходимо регулирование в очень небольших пределах при ограниченных требованиях к качеству регулирования. Так, лишь незначительное регулирование скорости насоса, подающего горячую воду в здание, обеспечивает существенную экономию дорогой горячей воды. Такой подход позволяет вместо дорогих и сложных преобразователей частоты использовать значительно более дешевые и надёжные регуляторы напряжения, подводимого к обмоткам статоров асинхронных двигателей;
- в настоящее время наметилась тенденция замены регулируемого привода постоянного тока на привод переменного тока. На сегодняшний день доля регулируемого привода переменного тока мала, однако она постоянно растет.

В областях промышленного использования приводов постоянного тока появился спрос на более надежные бесколлекторные машины, при эксплуатации которых требуется меньше затрат. Назрела также необходимость в применении бесконтактных приводов переменного тока, обеспечивающих повышение КПД и энергетических показателей установки, её производительность и надежность. В таких крупных машинах, как шахтные стационарные установки, для экономичного регулирования производительности необходим бесконтактный привод.

В подъёмных установках повышение КПД, надёжности, ресурса работоспособности и уменьшение эксплуатационных затрат невозмож-

но без замены привода постоянного тока на безредукторный бесколлекторный привод переменного тока с аналогичными регулировочными свойствами.

Экономическая целесообразность использования синхронных двигателей (СД) на мощных конвейерах, с учетом технологических требований, обуславливают необходимость применения бесколлекторного или бесконтактного регулируемого привода переменного тока с СД.

Сложившиеся традиции применения синхронных двигателей для мощных турбомеханизмов с целью поддержания высоких общешахтных энергетических показателей при минимальных затратах и требования регулирования производительности изменением частоты вращения рабочего колеса свидетельствует об актуальности использования регулируемого бесколлекторного привода переменного тока с СД.

Одним из наиболее перспективных и универсальных типов электроприводов с синхронными машинами является бесколлекторный (или бесконтактный) ВД, в котором регулирование скорости и момента осуществляется подводимым напряжением, током возбуждения и углом опережения включения вентилей при самоуправлении по частоте питания. Он обладает регулировочными качествами машин постоянного тока и надёжностью систем переменного тока.

Для широкого внедрения регулируемого электропривода необходимо решить множество задач, в том числе следующие:

- разработать специальные синхронные двигатели для применения их в системе ВД (в том числе индукторные);
- разработать специальные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором для применения их в системах частотно-регулируемого электропривода;
- уменьшить влияние вентильных преобразователей (ВП) на сеть;
- создать преобразователи, форма тока и напряжения которых приближалась бы к синусоидальной.

Существенное снижение энергопотребления за счет широкого применения регулируемого электропривода в настоящее время трудно реализуемо ввиду ограниченных возможностей капиталовложений на реконструкцию электроприводов. Необходимо использовать рациональный подход, сочетающий возможности регулируемого и нерегулируемого, например, управляемого по пуску, обеспечивающего эффект, достаточно близкий к наиболее совершенным приводам. Следует учитывать и уровень обслуживания электрооборудования, которое, как правило, не соответствует стандартам, присущим регулируемым приводам с высокими техническими характеристиками. В этой связи для получе-

ния экономической эффективности при минимальных затратах необходимо разработать следующие системы и мероприятия:

- системы облегченного пуска синхронных двигателей электроприводов, обеспечивающие экономию электроэнергии до 10–15 % и повышение технической надежности СД в 2–3 раза;
- системы плавного запуска группы мощных синхронных двигателей турбокомпрессоров, насосов, вентиляторов по схеме ТРН–СД, обеспечивающие повышение надежности электрических машин, турбомеханизмов и снижение платы за электроэнергию до 20 %;
- устройства и системы для управления уровнем питающего напряжения, обеспечивающие существенное снижение энергозатрат и повышение работоспособности электрооборудования;
- формирование технологической загрузки электродвигателей в соответствии с сертификационными параметрами, получаемыми в ходе послеремонтных испытаний или при эксплуатации;
- использование систем диагностики электроприводов, базирующихся на энергетических критериях, обеспечивающих определение распределения потерь и сертификацию двигателей после их ремонта на специализированных предприятиях;
- формирование графиков нагрузки установок с мощными электроприводами, технологическими емкостями и др.

Для приводов механизмов, требующих плавного пуска и незначительного (до 10 %) диапазона регулирования скорости (насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры и др.), применяют тиристорные регуляторы напряжения.

Анализ режимов работы регулируемого и нерегулируемого электропривода указывает на неоднозначность понятия эффективной работы приводов переменного тока в области частот вращения, близких к номинальной. Очевидно, что здесь имеется определенный диапазон скоростей, где применение нерегулируемого электропривода более рационально. Это объясняется тем, что любая схема регулируемого электропривода, кроме потерь энергии, идущих на ее преобразование, приводит к дополнительным потерям в самом двигателе и вредно влияет на питающую сеть и другие устройства и системы. Под понятием «вредно» понимают прежде всего дополнительные потери, электромагнитную несовместимость и преждевременный износ электроизоляционных материалов [1].

Очевидна необходимость создания систем, которые обеспечивали бы контроль зоны экономической работы ($\omega_n - \Delta\omega_1 \leq \omega \leq \omega_n + \Delta\omega_2$), а также значения скоростей $\omega_{вг}$ и $\omega_{нг}$, при которых работа привода не-

эффективна из-за технических и иных ограничений, с одной стороны, и опасна при превышении допустимой скорости – с другой (рис. 1.20) [14].

1.5.7. Улучшение качества электроэнергии

Вследствие бурного развития полупроводниковой техники, улучшение качества электроэнергии возможно средствами силовой преобразовательной техники регулируемого электропривода [18].

Регулируемый электропривод при работе оказывает неблагоприятное воздействие на сеть электроснабжения, что выражается в снижении коэффициента мощности на входе преобразователя, колебаниях напряжения в сети и искажении синусоидальной формы напряжения.

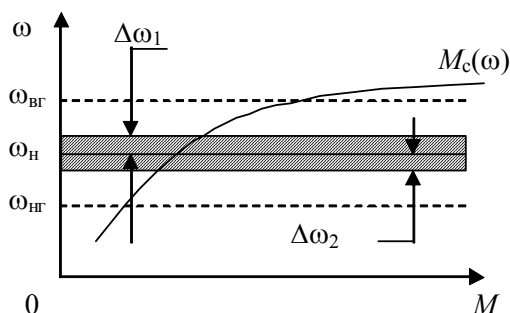


Рис. 1.20. Механическая характеристика электродвигателя

Снижение коэффициента мощности увеличивает реактивную мощность системы электроснабжения, что приводит к дополнительным потерям напряжения и энергии и требует увеличения пропускной способности ее элементов.

В электрических сетях предприятия с современным оборудованием ВП находят все более широкое применение, удельный вес нелинейных нагрузок непрерывно возрастает. В этих условиях уровень высших гармоник в кривых напряжения сети нередко достигает 10–15 %.

Несинусоидальность напряжения и тока обуславливает дополнительные потери и нагрев, а также ускоренное старение изоляции электродвигателей, трансформаторов и, кроме того, отрицательно сказывается на функционировании различных видов электрооборудования. Специфическое воздействие на различные виды электрооборудования, системы релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи проявляется дифференцировано и зависит от амплитудного спектра напряжения (тока), параметров электрических сетей и других факторов. В общем случае отсутствует зависимость между энергией гармонической помехи и степенью воздействия ее на электрическую сеть. Это обстоятельство

обусловило широкое применение показателя, характеризующего искажение кривой напряжения сети на зажимах электроприемников, называемого коэффициентом несинусоидальности напряжения:

$$k_{\text{нс}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^l U_n^2}}{U_{\text{н}}} 100 \%,$$

где U_n и $U_{\text{н}}$ – напряжение n -й гармоники и номинальное напряжение сети.

Согласно ГОСТ 13109–87 допустимое значение $k_{\text{нс}}$ ограничивается 5 % с интегральной вероятностью 95 % за время измерений, указанное в стандарте. Номер последней из учитываемых гармоник не приведен. Он может быть определен в конкретных случаях исходя из общепринятого в электротехнике 5%-ного уровня значимости результатов. Не учитываются в расчете $k_{\text{нс}}$ гармоники, пренебрежение которыми приводит к дополнительной погрешности более 5 %.

В стандарте не указываются допустимые значения $k_{\text{нс}}$, значения отдельных гармоник напряжения и тока в узлах сети; нет также указаний относительно характера частотной характеристики сети. Требования ГОСТ 13109–87 относятся к электрическим сетям общего назначения; поэтому в некоторых случаях может быть допущено $k_{\text{нс}} > 5 \%$. Например, на шинах преобразователей прокатных станов допустимую несинусоидальность напряжения определяют исходя из условий нормальной работы преобразователей при отсутствии на их шинах других нагрузок.

Последнее обстоятельство послужило причиной ограничений несинусоидальности напряжения на более высоких ступенях напряжения, содержащихся в стандартах некоторых стран. Так, в Швеции для сетей 0,25–0,43 кВ допустимые значения $k_{\text{нс}}$ соответствуют 4 %, для сетей 3,3–24 кВ – 3 %, 36–72 кВ – 2 %, выше 84 кВ – 1 %. В Японии для сетей 11–66 кВ и более – соответственно 2 и 1 %. В Европейском стандарте EN 50.006 допустимые значения гармоник напряжения задаются на зажимах эталонных сопротивлений, что равносильно нормированию гармоник тока.

Ограничение гармоник тока, генерируемых отдельными нелинейными нагрузками или проникающих из распределительных сетей в сети энергосистемы, в наибольшей мере способствует уменьшению влияния гармонических помех на другие электроприемники и электрические сети. Так, во Франции и ФРГ эти токи ограничиваются 5 % действующего значения всех высших гармоник тока, генерируемого нелинейными на-

грузками цеха или предприятия. В публикации 555-2 Международной электротехнической комиссии (МЭК) предусмотрено ограничение гармоник тока, создаваемых бытовыми электроприборами в низковольтной системе электроснабжения.

Создание и освоение промышленностью высокоэффективных силовых электронных приборов типа IGBT, GTO и др. позволило существенно расширить функции силовых электронных устройств, используемых для регулирования качества электроэнергии. Решение этих задач стало особенно актуальным в связи с реализацией программ энергосбережения. За последние годы в промышленных странах внедрены стандарты с жесткими требованиями к качеству электроэнергии [8].

Традиционно для регулирования качества электроэнергии использовались тиристорные стабилизаторы, компенсаторы реактивной мощности и пассивные фильтры. Новая элементная база силовой электроники позволяет создавать преобразователи переменного/постоянного тока, работающие в четырех квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока с импульсной модуляцией на повышенных частотах (этот термин соответствует новому стандарту МЭК 60030551). Это позволяет управлять потоками электроэнергии в любом направлении по заданному закону [17].

На рис. 1.21 представлен принцип работы четырехквadrантного преобразователя (напряжение имеет синусоидальную форму, а ток – трапециевидную, при этом фазовый сдвиг соответствует квадранту плоскости на векторной диаграмме).

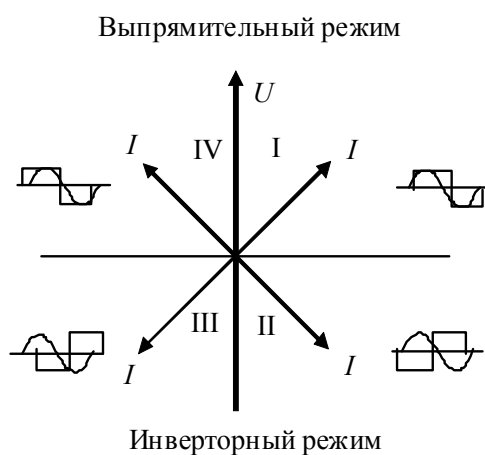


Рис. 1.21. Принцип работы четырехквadrантного преобразователя

При подключении накопителей энергии к преобразователю со стороны постоянного тока становится возможным осуществлять обмен реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник между

сетью переменного тока и накопителем. Такая схема лежит в основе большинства современных методов регулирования качества электроэнергии [15].

При колебаниях напряжения, особенно в маломощных (небольшие токи короткого замыкания) электросистемах, существует проблема их компенсации, поскольку в этом случае требуются высокоскоростные устройства компенсации реактивной мощности [16].

В этом случае эффективное решение проблемы может быть осуществлено с помощью нового поколения статических тиристорных компенсаторов (СТК) – СТК-лайт, разработанных компанией «Асеа Браун Боверн» (ABB).

Технология компенсаторов СТК-лайт использует, в принципе, ту же технологию преобразования сетевого напряжения, которая уже многие годы применяется в электродвигательных установках. Причиной того, что данная технология не была внедрена в устройства компенсации реактивной мощности ранее, являлся факт отсутствия управляющих полупроводниковых устройств большой мощности.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

2.1. Энергетический канал электропривода

2.1.1. Структура энергетического канала электропривода

Вид структурной схемы энергетического канала электропривода представлен на рис. 2.1.

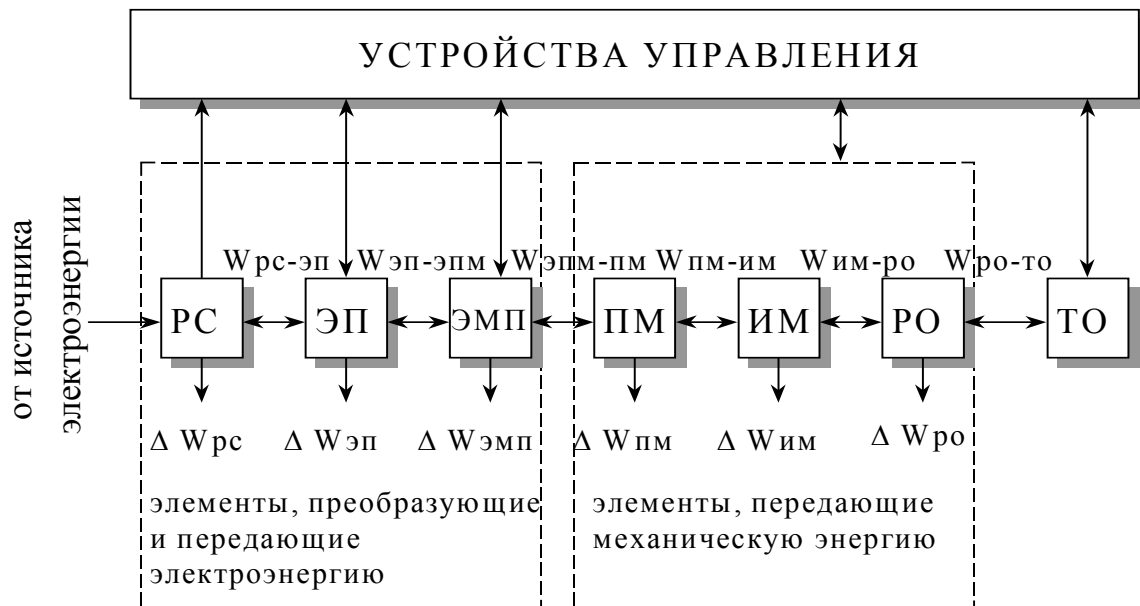


Рис. 2.1. Схема энергетического канала электропривода

Устройства управления представлены без разделения на блоки. В общем случае они могут быть связаны со всеми силовыми элементами. Эти связи двух типов: от устройств управления к энергетической части – управляющие, от энергетической к устройствам – сигналы обратных связей. Двухнаправленные стрелки в силовом канале обозначают то, что энергия может передаваться между двумя элементами в любом направлении. Каждый из элементов цепи преобразования энергии может быть охарактеризован тремя основными показателями: качеством протекания процесса, длительностью его протекания и возможностью управления этим процессом.

Первый элемент – распределительная сеть (РС), по которой осуществляется подвод электроэнергии. Параметры сети влияют на парамет-

ры электроэнергии, поступающей на вход электропривода. Качество электроэнергии по существующим представлениям включает в себя несинусоидальность и несимметрию напряжения питания, колебания и отклонения напряжения и частоты. Качество питающего напряжения влияет на режим работы электропривода и, наоборот, характеристики и режимы силового канала электропривода определяют режим и потери энергии в РС.

Вопросы электромеханической и энергетической связи территориально рассредоточенных электроприводов, оценки их взаимного влияния являются очень важными для мощных агрегатов, связанных общей питающей сетью. Режимы работы отдельно взятых электроприемников оказывают влияние на соседние, что приводит к определенным последствиям технологического характера. Условия реализации энергосберегающих мероприятий путем отключения технологических установок требуют принятия мер не только для облегчения пуска таких приводов, но и мер, исключаящих влияние на другие агрегаты, в том числе и территориально удаленные. Соответствующие проблемы возникают и при управлении энергетическими режимами таких приводов.

Работоспособность распределительной сети как части энергосистемы – показатель, характеризующий надёжность и зависящий от режима энергоснабжения, а также от показателей качества энергии. Энергосистема имеет возможность формировать как ПКЭ, так и режим энергоснабжения. Если электропривод включает в себя преобразователь энергии, то его показатели потребления энергии имеют близкий к ПКЭ характер, но отличаются тем, что показатели некачественности потребления энергии в определенной степени определяют ПКЭ системы. К этим показателям относятся составляющие полной мощности и гармоник тока и напряжения, потребляемые из сети.

Мгновенная мощность, определяемая произведением мгновенных напряжений и тока на входе преобразователя, равна скорости поступления электромагнитной энергии в преобразователь в данный момент и изменяется в течение периода переменного тока и по значению, и по знаку. Если мгновенная мощность положительна, то энергия поступает в преобразователь, если отрицательна – возвращается источнику. Возможность возврата энергии источнику обусловлена тем, что с электрической цепью связано электромагнитное поле, запаасающее ее в течение одной части периода переменного тока и возвращающее ее в течение другой части периода. В схеме электрической цепи привода этот обратимый энергетический процесс отражают индуктивности и емкости.

Активная мощность равна среднему значению мгновенной мощности за период питающего напряжения и определяет количество элек-

ромагнитной энергии, необратимо преобразующейся за секунду в теплоту или другие формы энергии. Она характеризует полезную работу в нагрузке, включая полезную мощность и мощность потерь в установке.

Полная мощность определяет расчетные токи и напряжения сети, она всегда больше фактически передаваемой нагрузке активной мощности из-за существования неактивных составляющих мощности, которые, не создавая полезного эффекта, приводят в то же время к увеличению потерь в питающей сети и электроприводе. Известны три неактивных составляющих полной мощности: реактивная мощность, мощность искажения и мощность несимметрии.

Реактивная мощность, или мощность сдвига, обусловлена сдвигом по фазе основной гармоники тока нагрузки относительно синусоидального напряжения питающей сети. При этом под основной гармоникой тока понимается его составляющая, изменяющаяся с частотой напряжения сети. Вследствие сдвига основной гармоники тока появляется реактивная составляющая тока, которая не участвует в передаче активной мощности нагрузке, так как среднее арифметическое мгновенной мощности за период от этой составляющей равно нулю. В то же время, протекая в преобразователе и питающей сети, реактивная составляющая создает дополнительные потери энергии.

Мощность искажения обусловлена протеканием гармоник тока, не совпадающих по частоте с напряжением сети. Среднее арифметическое мгновенной мощности, связанной с этими гармониками, за период также равно нулю, однако и они вызывают дополнительные потери энергии в сети.

Мощность несимметрии учитывает дополнительные потери энергии, связанные с неравномерным распределением тока по фазам многофазной цепи. Потери пропорциональны квадрату тока, и увеличение тока в одной фазе за счет других фаз приводит к увеличению суммарных потерь.

Электрический преобразователь (ЭП) преобразует поступающую на его вход электроэнергию к виду, необходимому для последующего преобразования её в механическую работу электромеханическим преобразователем (ЭМП). Электропреобразователь управляет уровнями потоков энергии к электромеханическому преобразователю и имеет возможность управления параметрами потребляемой и преобразуемой энергии.

Так, возможно:

- регулирование потребляемой реактивной мощности в определенных пределах (регулирование коэффициента сдвига первой гармоники тока относительно напряжения);

- регулирование гармонического состава тока (регулирование коэффициента искажения сетевого тока в соответствии с заданной функциональной зависимостью);
- управление амплитудой и фазой той или иной гармоники сетевого тока преобразовательного устройства для взаимной компенсации составляющих тока двух или более преобразовательных устройств, питающихся от общей сети;
- симметризация нагрузки в питающей сети в случае использования преобразовательных устройств большой мощности.

В качестве ЭП в современном приводе используются:

- управляемые и неуправляемые выпрямители (рис. 2.2, а);
- инверторы (рис. 2.2, б);
- преобразователи со звеном постоянного тока (рис. 2.2, в);
- циклоконверторы, или преобразователи с непосредственной связью (рис. 2.2, г);
- регуляторы напряжения и тока.

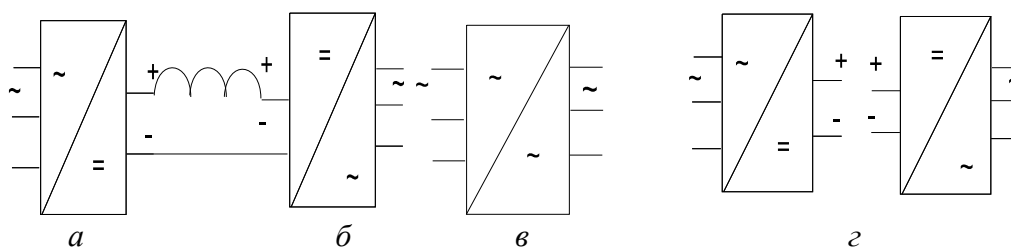


Рис. 2.2

Электромеханический преобразователь (двигатель) преобразовывает электроэнергию в механическую и задает с учетом параметров механической части характер механического движения рабочего органа (РО) и переменные, определяющие это движение: электромагнитный момент M и частоту вращения ω при вращательном движении (силу F и линейную скорость V при поступательном движении).

Анализ системы электропривода совместно с преобразователем энергии в режимах управления энергопотреблением показывает, что при неизменной скорости вращения изменение энергетического состояния за счет изменения тока возбуждения и напряжения приводит к изменению параметров энергопотребления преобразователя энергии, причем это изменение зависит от многих факторов, в том числе и от конструкции преобразовательного устройства. Это говорит о связанном энергетическом эффекте преобразователя и двигателя.

В состав силовой части входит передаточный механизм (ПМ), связывающий электромеханический преобразователь ЭМП и исполнительный механизм (ИМ). Наиболее часто используется редуктор, который снижает скорость двигателя до уровня исполнительного механизма. Исполнительный механизм (например, барабан лебёдки – трос – отклоняющие шкивы) обеспечивает окончательное согласование скорости крюковой подвески (рабочего органа РО) со скоростью технологического объекта ТО (груза).

Пример физической реализации силового канала показан на рис. 2.3.

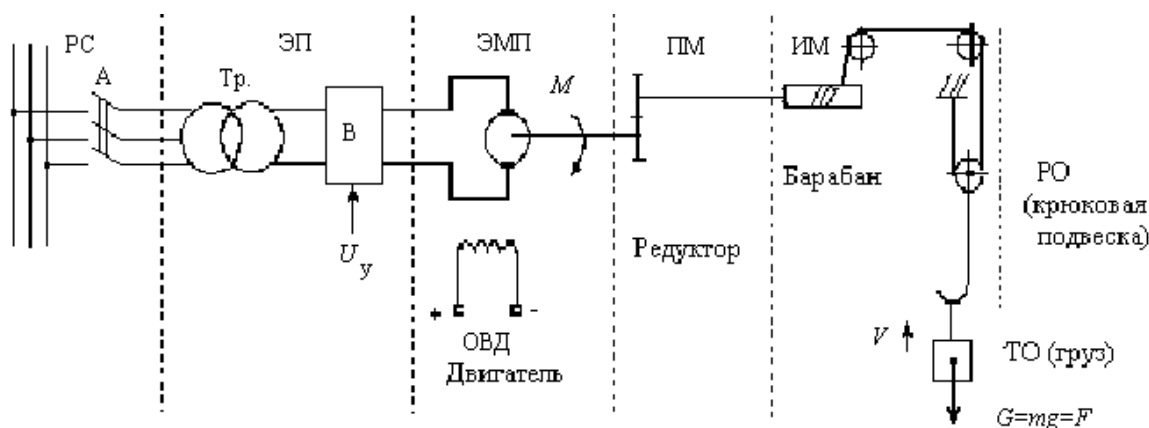


Рис. 2.3. Пример реализации силового канала электропривода

Процесс передачи и преобразования энергии в силовом канале сопровождается ее частичной потерей в каждом из элементов (ΔW) независимо от направления ее передачи. В конечном итоге потери энергии выделяются в виде теплоты.

Все элементы силового канала способны накапливать энергию в том или ином виде в зависимости от типа элемента:

- на индуктивностях накапливается энергия магнитного поля;
- на емкостях – энергия электрического поля;
- на упругих элементах и поднятых над землей массах – потенциальная механическая энергия;
- на вращающихся и движущихся линейно массах – кинетическая энергия.

В силовых электроприводах наиболее ёмкими накопителями энергии являются элементы механической части. Например, электропривод подъёма на рис. 2.3 применен в мостовом кране. Определим запасы электромагнитной и кинетической энергии в его элементах. Пусть индуктивность якоря двигателя $L_{я} = 10^{-2}$ Гн, а приведенный момент инер-

ции $J' = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Подъему номинального груза соответствует ток $I_{\text{я}} = 100 \text{ А}$ при частоте вращения вала двигателя $\omega = 100 \text{ 1/с}$.

В этом состоянии накапливается энергия в индуктивностях

$$W_L = L_{\text{я}} \frac{I^2}{2} = 0,005 \cdot 10^4 \text{ Дж},$$

в механической части

$$W_J = J' \frac{\omega^2}{2} = 10^4 \text{ Дж}.$$

2.1.2. Баланс мощностей потоков энергии силового канала

Составим баланс мощностей потоков энергии для силового канала электропривода с учетом кинетической энергии движущихся масс, считая, что изменение потенциальной энергии в системе не происходит:

$$P_{\text{э}} = \sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt} + \sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt} + \sum_k \Delta P_k + M\omega + FV,$$

где $P_{\text{э}}$ – электрическая мощность потока энергии между источником

электроэнергии и распределительным участком сети; $\sum_i J_i \omega_i \frac{d\omega_i}{dt}$

и $\sum_j m_j V_j \frac{dV_j}{dt}$ – мощности, возникающие в динамических режимах

и связанные с изменением кинетической энергии вращательно или линейно движущихся масс; $\sum_k \Delta P_k$ – суммарные потери мощности во всех

элементах силовой цепи; $M\omega$, FV – мощности механической энергии, связанные с вращательным и поступательным движением.

Принимая условно положительным направление потока энергии от источника к рабочему органу, подчеркнем, что, кроме потерь энергии, значения которых не могут быть отрицательными, остальные составляющие по направлению могут быть как положительными, так и отрицательными. Например, при увеличении кинетической энергии механической части привода мощность положительна:

$$\frac{dW_J}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{J\omega^2}{2} \right) = J\omega \frac{d\omega}{dt} > 0.$$

И наоборот, при торможении привода, когда кинетическая энергия высвобождается, эта составляющая мощности отрицательна.

Составляющие уравнения могут иметь различные сочетания уровней, направлений энергий и знаков, определяя тем самым многообразие энергетических состояний силового канала, разнообразие режимов его работы. Свернём структурную схему привода с учётом уравнения баланса мощностей потоков энергии (рис. 2.4).

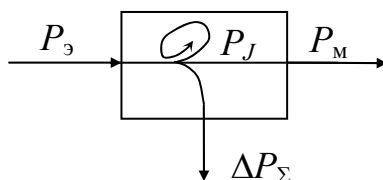


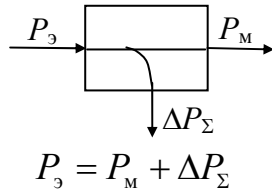
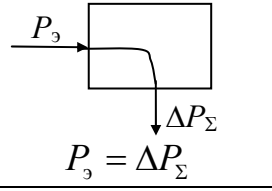
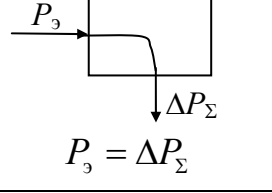
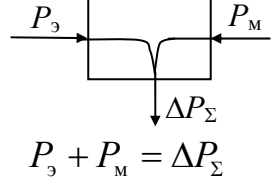
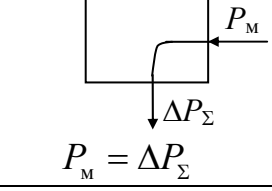
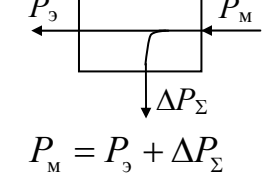
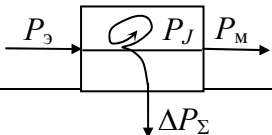
Рис. 2.4. Схема баланса мощностей

Здесь показаны положительные направления потоков мощности: $P_э$ – электрической мощности; $P_м$ – механической мощности; P_J – мощности, связанной с изменением запаса кинетической энергии механической части; $\Delta P_Σ$ – суммарной мощности потерь.

Каждая из составляющих мощности имеет самостоятельное значение для анализа энергетики электропривода. Так, $P_э$ и $\int P_э dt$ – характеризуют соответственно затраты мощности и энергии; $P_м$ и $\int P_м dt$ – механическую мощность и полезную работу; $\Delta P_Σ$ и $\int \Delta P_Σ dt$ – потери и процесс нагревания элементов силового канала. Эти составляющие определяют около десятка энергетических состояний электропривода. В табл. 2.1 приведены сочетания уровней и направлений энергии, представленные условной схемой баланса мощностей. Первые шесть состояний – статические, остальные пять – динамические режимы работы электропривода.

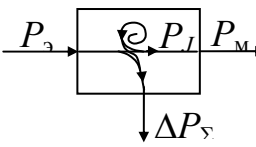
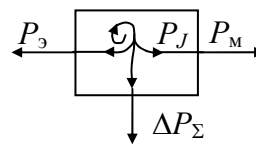
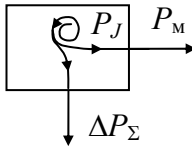
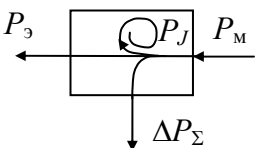
Таблица 2.1

Сочетания уровней и направлений электрической энергии

Мощность				Баланс мощностей	Режимы работы привода
активная электрическая $P_э$	механическая $P_м$	связанная с изменением кинетической энергии P_J	потери мощности ΔP_Σ		
+	+	0	+	 <p>$P_э = P_м + \Delta P_\Sigma$</p>	Двигательный. Потребляемая из сети энергия за вычетом потерь передается механизму
+	$M = 0$	0	+	 <p>$P_э = \Delta P_\Sigma$</p>	Холостой ход. Потребляемая энергия идет на покрытие потерь в двигателе, преобразователе и передачах
+	$\omega = 0$	0	+	 <p>$P_э = \Delta P_\Sigma$</p>	Двигатель подключен к сети, но неподвижен. Режим короткого замыкания. Потребляемая энергия рассеивается в двигателе и преобразователе
+	-	0	+	 <p>$P_э + P_м = \Delta P_\Sigma$</p>	Тормозной – противовключение. Энергия одновременно поступает от сети и механизма, рассеиваясь в виде потерь в преобразователе, двигателе и передачах
0	-	0	+	 <p>$P_м = \Delta P_\Sigma$</p>	Тормозной – динамическое торможение. Энергия рассеивается в элементах привода
-	-	0	+	 <p>$P_м = P_э + \Delta P_\Sigma$</p>	Генераторный с рекуперацией энергии в сеть. Мощность, развиваемая нагрузкой, передается (за вычетом потерь в передачах, двигателе и преобразователе) в сеть
+	+	+	+		Увеличение скорости. Потребляемая энергия идет на совершение по-

				$P_3 = \Delta P_\Sigma + P_J + P_M$	лезной работы, увеличение запаса кинетической энергии привода и частично теряется.
--	--	--	--	-------------------------------------	--

Окончание табл. 2.1

Мощность				Баланс мощностей	Режимы работы привода
активная электрическая P_3	механическая P_M	связанная с изменением кинетической энергии P_J	потери мощности ΔP_Σ		
+	+	-	+	 $P_3 + P_J = P_M + \Delta P_\Sigma$	Двигательный режим торможения. Снижение скорости. Высвобождающаяся кинетическая энергия совместно с потребляемой из сети идет на полезную работу и покрытие потерь
-	+	-	+	 $P_J = P_3 + P_M + \Delta P_\Sigma$	Торможение (переходной процесс). Высвобождающаяся энергия частично возвращается в сеть, идет на полезную работу и теряется
0	+	-	+	 $P_J = \Delta P_\Sigma + P_M$	Торможение (переходной процесс) при отсутствии связи с сетью
-	-	+	+	 $P_M = P_J + P_3 + \Delta P_\Sigma$	Увеличение скорости за счет энергии, поступающей от нагрузки, при этом часть ее возвращается в сеть

2.1.3. Коэффициент полезного действия

Потребность в сравнении эффективности работы элементов силового канала появилась с возможностью решать одну и ту же техническую задачу с помощью разных по конструкции и принципу работы устройств. Наиболее широко используемый показатель эффективности

процесса энергопотребления – КПД, который является мерой экономичности преобразования энергии в электроприводе, мерой полезного использования потребляемой энергии.

Коэффициент полезного действия определяется как отношение полезной работы (энергии) на выходе устройства к затраченной энергии на входе:

$$\eta = \frac{W_{\text{пол}}}{W_{\text{зат}}}.$$

Если работа устройства оценивается за период времени, на котором мощности на выходе и входе постоянны, то КПД

$$\eta = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{зат}}}.$$

При переменном характере нагрузки со временем цикла $t_{\text{ц}}$ значение КПД

$$\eta = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} P_{\text{пол}} dt}{\int_0^{t_{\text{ц}}} P_{\text{пол}} dt + \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P_{\Sigma} dt}.$$

Для последовательного силового канала выход предыдущего элемента ($P_{\text{пол}}$) является входом последующего ($P_{\text{зат}}$), поэтому КПД определяется произведением

$$\eta_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n \eta_i.$$

Необходимость подхода к электроприводе не только как к преобразователю электроэнергии с определенным КПД, но и как к ее потребителю, требует выработки новых подходов к процессам энергопотребления и энергоиспользования.

2.1.4. Обобщенный критерий энергетической эффективности силового канала

Чтобы решить, какая система электропривода в энергетическом отношении предпочтительнее, все ли элементы силового канала полностью загружены, насколько удачно выбран способ управления, как электропривод взаимодействует с источником энергии, необходимо применить обобщенный критерий энергетической эффективности. Для этого представим силовой канал в виде последовательно соединенных элементов (рис. 2.5).

Полезная механическая работа, реализуемая электроприводом, связана с протеканием следующих процессов:

- изменением потенциальной энергии технологического объекта;
- изменением кинетической энергии объекта;
- изменением внутренней энергии объекта;
- изменением геометрических размеров объекта.

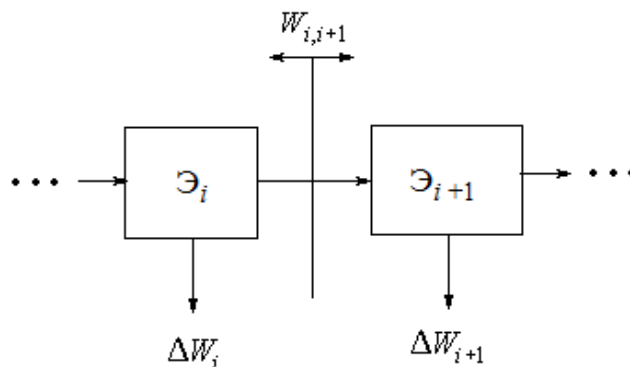


Рис. 2.5. Представление энергетического канала в виде звеньев

Технология выполнения полезной работы и параметры элементов силового канала электропривода определяют количества энергии $W_{i,i+1}$, которыми обмениваются «соседние» элементы, и количества энергии, которые теряются в каждом элементе ΔW_j .

Признание полезной не только энергии, передаваемой от источника к механизму, совершаемому механическую работу (подъем груза), но и энергии, поступающей от механизма (спуск); точное указание сечения энергетического канала ($i, i + 1$), для которого производится оценка эффективности; элементов канала, в которых учитываются потери; интервала времени, для которого справедлива оценка, позволили получить обобщенный критерий в следующем виде:

$$H = \frac{W_{i,i+1}}{W_{i,i+1} + \sum_j \Delta W_j},$$

где $W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} |P_{i,i+1}(t)| dt$ – энергии обмена между соседними элементами силового канала за период оценки, обусловленные данным режимом и параметрами канала; $|P_{i,i+1}(t)|$ – модуль мощности этого потока энергии;

$\sum_j \Delta W_j = \sum_j \int_{t_1}^{t_1+\tau} \Delta P_j(t) dt$ – суммарные потери энергии в выбранных

j элементах силового канала; $P_{i,i+1}(t)$ – полезная мощность, проходящая через сечение энергетического канала ($i, i+1$); $\Delta P_j(t)$ – потери мощности в j -м элементе; t_1, τ – начало и конец временного интервала, в частном случае $t_1 = 0$ и τ – время цикла.

Определим, например, обобщенный критерий для статических режимов ДПТ НВ (рис. 2.6).

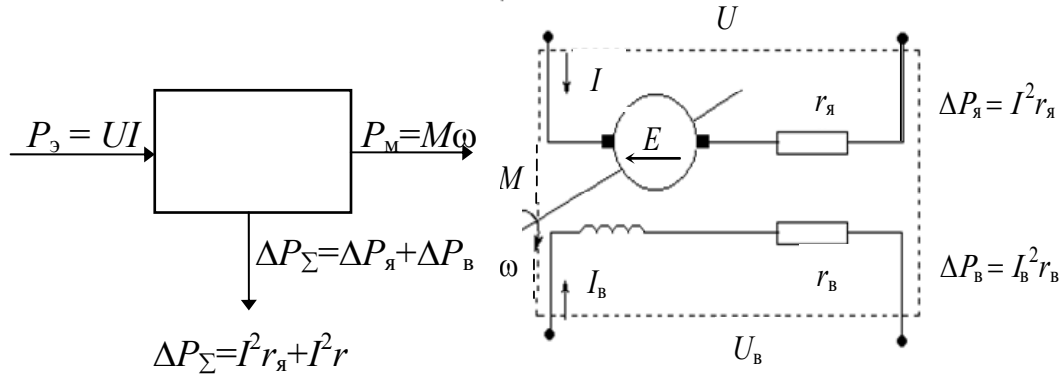


Рис. 2.6. Обобщённый критерия для ДПТ НВ

Примем во внимание лишь потери в двигателе, определяемые тепловым рассеянием энергии в якорной цепи. Баланс мощностей для статического режима якорной цепи двигателя определяется равенством

$$UI = M\omega + I^2 r_{\text{я}},$$

где $UI = P_3$ – электрическая мощность на входе двигателя (потребляемая); $P_M = M\omega$ – механическая; $I^2 r_{\text{я}}$ – потери в якорной цепи.

Энергия, потребляемая по цепи возбуждения, в процессе преобразования энергии не участвует, она необходима лишь для поддержания магнитного потока машины.

Связь между скоростью и моментом двигателя

$$\omega = \frac{UI - I^2 r_{\text{я}}}{M},$$

Или, с учетом $M = k\Phi I$, механическая характеристика (рис. 2.7)

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{Mr_{\text{я}}}{(k\Phi)^2},$$

где $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$; $M_{\text{кз}} = k\Phi I_{\text{кз}}$; $I_{\text{кз}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}$.

Примем в первом случае $W_{i,i+1}$ как энергию на электрическом входе машины:

$$W_{i,i+1} = \int_{t_1}^{t_1+\tau} UI dt,$$

во втором – как энергию на механическом входе:

$$W_{i,i+1} = \int_{t_i}^{t_i+\tau} M \omega dt .$$

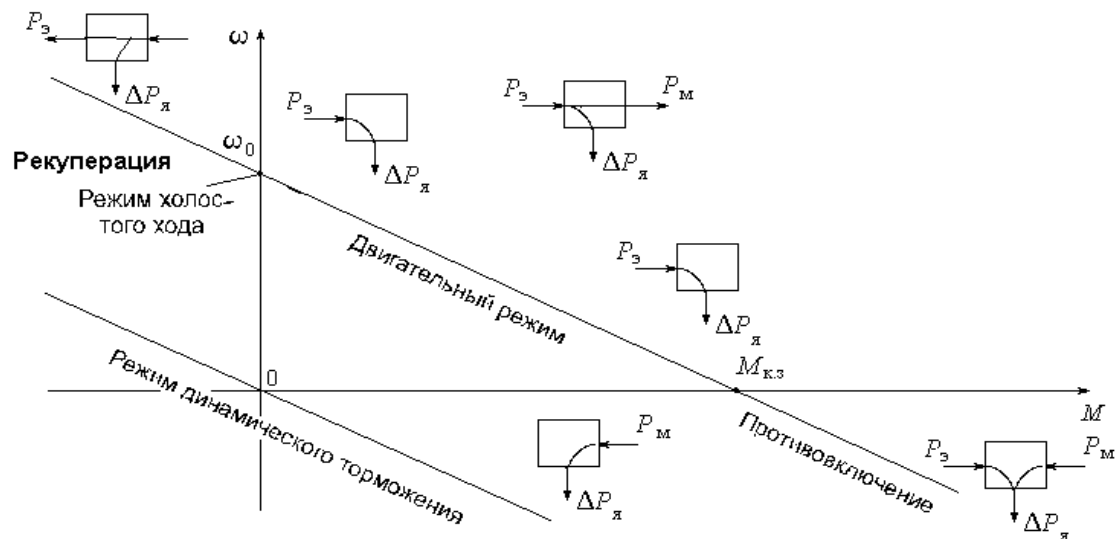


Рис. 2.7. Механическая характеристика ДПТ НВ с учётом обобщённого критерия

Оценивая значение обобщенного критерия для статических режимов, вместо энергии $W_{i,i+1}$ подставим соответствующие мощности. При этом мощность потерь в якоре

$$\Delta P_{\text{я}} = I^2 r_{\text{я}} = UI - M\omega = M(\omega_0 - \omega).$$

По отношению к электрическому и механическому входам получим, соответственно,

$$H_{\text{э}} = \frac{|UI|}{|UI| + |M(\omega_0 - \omega)|} = \frac{|M\omega_0|}{|M\omega_0| + |M(\omega_0 - \omega)|};$$

$$H_{\text{м}} = \frac{|M\omega|}{|M\omega| + |M(\omega_0 - \omega)|}.$$

Зависимости $H_{\text{э}}(\omega)$ и $H_{\text{м}}(\omega)$ показаны на рис. 2.8.

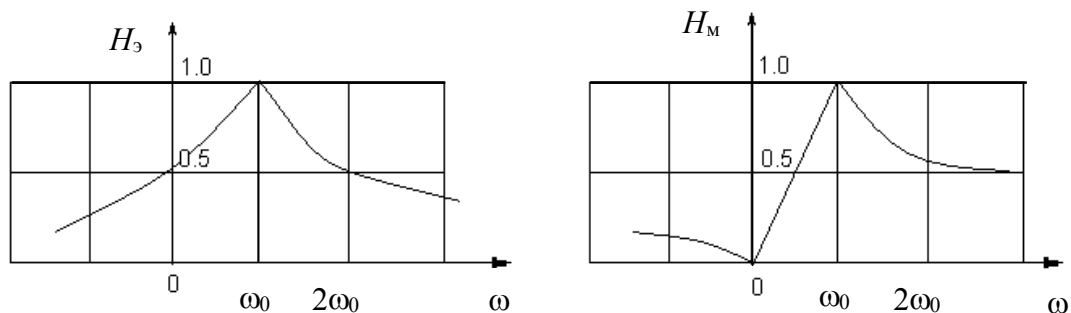


Рис. 2.8. Значения обобщённых критериев

Коэффициент H_3 оценивает эффективность двигателя как потребителя энергии, а H_M – как преобразователя энергии. Проанализируем их изменение для характерных режимов двигателя.

При принятых условиях ($\Delta P_b = 0$) в режиме холостого хода, т.е. при $\omega = \omega_0$, $H_3 = H_M = 1$, т.к. потери равны нулю. В рекуперативном режиме ($\omega > \omega_0$) оба показателя снижаются, причем эффективность машины по отношению к сети H_3 падает быстрее, чем H_M .

В двигательном режиме $0 < \omega < \omega_0$ значения H_3 и H_M снижаются, однако значение H_M снижается быстрее, принимая при $\omega = 0$ значение $H_M = 0$, а $H_3 = 0,5$. При $\omega < 0$ значение H_M растет к 0,5, а H_3 стремится к нулю (режим противовключения). Для режима динамического торможения $H_3 = 0$ (двигатель не связан с сетью $P_3 = 0$), а $H_M = 0,5$, т. к. всегда $\Delta P_\Sigma = P_M$.

При учете постоянных потерь (не зависящих от режима работы силового канала) ни один из показателей не может достичь значения, равного единице. При любой физической реализации системы потери неизбежны. Наибольшему значению H должны соответствовать наименьшие потери энергии

$$\Delta W_\Sigma = \int_0^T \Delta P_\Sigma dt \rightarrow \min,$$

где T – время выполнения полезной механической работы $W_{\text{пол}}$, определяющееся требуемой производительностью.

Предельным значением коэффициента эффективности $H_{\text{пр}}$ для электропривода с данными параметрами является его значение при наименьших возможных потерях $\Delta W'_\Sigma$, соответствующих выполнению

заданной работы при $P_{i,i+1} = \text{const}$ и $W_{\text{пол}}/T = P_{\text{пол}} = \text{const}$. Например, для сечения «рабочий орган – технологический объект»

$$H_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пол}}}{W_{\text{пол}} + \Delta W'_{\Sigma}}$$

Чтобы с помощью критерия эффективности стимулировать энерго-сбережение, необходимо поставить в зависимости от его значения оплату за использованную электроэнергию. В частности, для приведенного примера с двигателем постоянного тока такой подход предполагает увеличение оплаты за режимы холостого хода.

2.2. Энергетические особенности и характеристики энергетической эффективности статических преобразователей электроэнергии

Преобразователи электроэнергии преобразуют переменный ток в постоянный и, наоборот, переменный ток одной частоты и величины в переменный ток с другими параметрами, регулируют или стабилизируют выходной ток или напряжение. Поэтому важное значение имеет характеристика преобразователя как приёмника электроэнергии. Экономичность приёма электроэнергии приводом зависит как от типа и технических характеристик элементов привода, так и от режимов его работы.

Применяются два основных типа преобразователей – статические и электромашинные. С точки зрения качества электроэнергии и влияния на сеть электромашинные преобразователи имеют преимущества перед статическими. Однако их доля постоянно уменьшается, т.к. они громоздки и имеют худший КПД, чем статические преобразователи.

Наиболее распространенными являются статические полупроводниковые преобразователи на базе диодов, тиристоров и транзисторов. По своим энергетическим свойствам они обладают рядом особенностей.

Процесс преобразования и регулирования электроэнергии в статических преобразователях производится за счет работы полупроводниковых приборов в ключевом режиме, что является причиной возникновения высших гармонических токов и напряжений на входе и выходе преобразователей. Генерация высших гармонических тока и напряжения вызывает искажения напряжения в питающих сетях и повышенные потери в канале передачи электроэнергии, а также приводит к знакопеременным составляющим момента, отрицательно сказывающимся на работоспособности электрической машины.

Другая их особенность обусловлена фазовым способом регулирования выходного напряжения. Это регулирование осуществляется за

счет задержки момента включения тиристорov по отношению к сетевому напряжению. В результате этого первая гармоническая составляющая тока, определяемая частотой сети, оказывается сдвинутой на некоторый угол относительно напряжения сети. Поэтому преобразователи потребляют реактивную мощность не только на частотах высших гармонических, но и на частоте сети.

Усложнение схем преобразовательных установок и методов управления ими, обусловленное желанием повысить коэффициент мощности, а также появление несимметричных по конструкции и управлению преобразователей, преобразователей с импульсным управлением и различных ВП частоты создали большой класс вентильных установок с несимметричной нагрузкой, у которых появились дополнительные составляющие полной мощности.

В общем случае, когда в трехфазном преобразователе отсутствует симметрия нагрузки, полная мощность преобразователя содержит четыре составляющих: активную мощность P , реактивную мощность Q , мощность искажения $P_{\text{и}}$ и мощность несимметрии $P_{\text{нс}}$.

Величина и наличие тех или иных составляющих полной мощности определяются схемой преобразователя, законом управления его вентилями и характером изменения величины нагрузки в зависимости от величины выходного напряжения. Поэтому при определении энергетических показателей и составляющих полной мощности необходимо учитывать конкретные особенности рассматриваемой установки.

Активная мощность определяет количество электрической энергии, необратимо преобразующейся за секунду в теплоту или другие формы энергии, и включает в себя полезную мощность и мощность потерь в установке. Под активной мощностью ВП понимают его активную мощность на выводах сети переменного тока, которая в выпрямительном режиме равна мощности постоянного тока плюс потери в установке, а в инверторном режиме равна мощности постоянного тока минус потери в установке.

Эта мощность определяется интегральным выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt,$$

которое представляет собой среднее за период значение мгновенной мощности $p = ui$ и при синусоидальных питающих напряжениях для трёхфазной цепи приводится к виду

$$P = \sqrt{3} U_1 I_{1(1)} \cos \varphi_1,$$

где $I_{1(1)}$ – действующее значение первой гармоники тока сети; φ_1 – фазный угол этой гармоники.

Активная мощность, потребляемая сложной цепью, равна сумме активных мощностей отдельных элементов этой цепи.

Реактивная мощность, или мощность сдвига, в ВП при синусоидальных напряжениях источника обусловлена смещением основной гармоники сетевого тока относительно напряжения и определяется углом управления, индуктивностями рассеяния обмоток и током намагничивания питающего трансформатора.

Для одной фазы реактивная мощность определяется интегральным выражением при частоте источника ω :

$$Q = -\frac{1}{\omega T} \int_0^T i \frac{du}{dt} dt.$$

В большинстве случаев мгновенные значения u и i , входящие в выражение, представляют собой либо постоянные значения, либо гармонические функции, что даёт возможность получить очень простые расчётные выражения даже для сложных схем.

Для трёхфазной цепи при симметричной нагрузке фаз выражение приводится к более простому виду

$$Q = \sqrt{3} U_1 I_{1(1)} \sin \varphi_1.$$

Реактивную мощность сложной цепи можно в соответствии с теоремой приведения определить алгебраическим суммированием приведенных реактивных мощностей отдельных элементов.

Мощность искажения $P_{\text{и}}$ – это составляющая полной мощности, обусловленная наличием в кривой сетевого тока высших и низших гармоник, отсутствующих в кривой напряжения сети. В ВП она создаётся токами высших и низших гармоник, вызываемыми вентильным действием и режимами управления этих устройств.

В общем случае мощность искажения определяется из выражения

$$P_{\text{и}} = U_1 \sqrt{\sum_{k=2}^n I_{1(k)}^2}.$$

Мощность искажения, обусловленная токами высших гармоник, вредно влияет на питающую сеть и подключенные к ней приёмники, так как вызывает дополнительные потери в меди и стали магнитопроводов, порождает при неблагоприятном соотношении параметров вредные резонансные явления и, кроме того, создаёт существенные помехи в расположенных близко линиях связи.

При циклическом управлении ВП в кривой первичного тока возникают дополнительные низкочастотные гармонические составляющие. При этом через нагрузку преобразователя проходят несколько полных волн тока, после чего вентили запираются и ток в нагрузке прекращается.

В таком преобразователе среднее значение выпрямленного напряжения U_d регулируется ступенчато за счёт изменения соотношения между полным временем цикла T и временем T_p , на протяжении которого через нагрузку протекает ток. Циклическое управление с точки зрения использования питающей сети аналогично повторно-кратковременному режиму электрических машин и отличается от этих режимов малой длительностью цикла.

Степень регулирования напряжения при таком управлении изменяется дискретно и равна

$$C_p = \frac{T_p}{T} = \frac{p}{q} = \frac{U_d}{U_{d0}} = \text{ПВ},$$

где q – полное число волн, содержащееся в цикле; p – число за один цикл волн тока, протекающих через преобразователь; U_{d0} – выходное напряжение в неуправляемом режиме (максимальное); ПВ – относительная продолжительность протекания тока через нагрузку.

Вследствие циклического характера управления первичный ток выпрямителя содержит гармонические как высокой, так и низкой частоты. В этом случае мощность искажения определяется суммой низкочастотной (субгармонической) и высокочастотной составляющих

$$P_{\text{и}} = U_1 \sqrt{\sum_{k=1}^{L-1} I_{1(k)}^2};$$

$$P_{\text{и}} = U_1 \sqrt{\sum_{k=L+1}^n I_{1(k)}^2}.$$

Необходимо отметить, что мощность искажения всей цепи нельзя определить алгебраическим суммированием мощностей искажения отдельных элементов, поскольку мощность искажения обусловлена протеканием токов различных частот.

Мощность несимметрии $P_{\text{нс}}$ – это составляющая полной мощности, которая возникает только в многофазной цепи и обусловлена несимметрией нагрузки фаз. В вентильных преобразователях, питающихся от симметричных синусоидальных источников, мощность не-

симметрии вызывается либо несимметрией конструкции преобразователя, либо несимметрией режимов его управления (например, в преобразователях с циклическими режимами управления).

Для трёхфазных вентильных преобразователей с несимметричными первичными токами и синусоидальными питающими линейными напряжениями полная мощность выражается равенством

$$S = U \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} = U \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{A(k)}^2 + \sum_{k=1}^n I_{B(k)}^2 + \sum_{k=1}^n I_{C(k)}^2},$$

где U – линейное напряжения питающей сети;

$$I_A = \sqrt{I_{A(1)}^2 + \dots + I_{A(l)}^2 + \dots + I_{A(n)}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{A(k)}^2};$$

$$I_B = \sqrt{I_{B(1)}^2 + \dots + I_{B(l)}^2 + \dots + I_{B(n)}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{B(k)}^2};$$

$$I_C = \sqrt{I_{C(1)}^2 + \dots + I_{C(l)}^2 + \dots + I_{C(n)}^2} = \sqrt{\sum_{k=1}^n I_{C(k)}^2}$$

– несимметричные линейные токи; $I_{A(l)}$, $I_{B(l)}$ и $I_{C(l)}$ при циклическом управлении преобразователем представляют собой гармонические составляющие тока частоты сети.

Выражение полной мощности можно после преобразований привести к виду

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2 + P_{\text{нс}}^2}.$$

Мощность несимметрии может быть определена по выражению

$$P_{\text{нс}} = \sqrt{S_1^2 - (P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2)}.$$

Как и мощность искажения, мощность несимметрии нельзя определять алгебраическим суммированием отдельных составляющих.

Мощность несимметрии является критерием оценки влияния несимметрии преобразователя на потери, нагрев и степень использования элементов питающей сети. Мощность несимметрии может быть сведена к нулю полным симметрированием фазных токов вентильного преобразователя во всём диапазоне управления. Возможна полная компенсация несимметрии применением нескольких одновременно работающих вентильных преобразователей, суммарные фазные токи которых являются симметричными.

При симметричной нагрузке фаз мощность несимметрии равна нулю и полная мощность равна сумме трёх составляющих (активной, реактивной и мощности искажения):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2} .$$

Рассмотренные расчетные выражения полной мощности вентильных преобразователей и её составляющих позволяют определить и энергетические коэффициенты, которые характеризуют преобразователь как приёмник электроэнергии. Это коэффициент мощности $k_{\text{м}}$, коэффициент сдвига $k_{\text{с}}$, коэффициент искажения $k_{\text{и}}$ и коэффициент несимметрии $k_{\text{нсм}}$.

Коэффициент мощности $k_{\text{м}}$ трёхфазного преобразователя равен отношению активной мощности к полной:

$$k_{\text{м}} = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2 + P_{\text{нс}}^2}} = \frac{P}{UI} .$$

Активная мощность P при периодических несинусоидальных токах и напряжениях равна сумме всех гармонических составляющих:

$$P = \sum_i U_i I_i \cos \varphi_i ,$$

а полная мощность равна произведению действующих значений напряжения и тока.

Коэффициент мощности определяет степень использования забираемой из сети полной мощности и может быть выражен через другие энергетические коэффициенты следующим образом:

$$k_{\text{м}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2}} \frac{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2 + P_{\text{нс}}^2}} = k_{\text{с}} k_{\text{и}} k_{\text{нсм}} .$$

В формуле коэффициент сдвига $k_{\text{с}}$ характеризует величину генерируемой в сеть реактивной мощности, коэффициент искажения $k_{\text{и}}$ характеризует влияние как высших, так и низших гармонических тока на величину коэффициента мощности, а коэффициент несимметрии $k_{\text{нсм}}$ учитывает дополнительный нагрев (или потери) в элементах питающей сети и уменьшение её пропускной способности, обусловленные несимметрией преобразователя.

Коэффициент сдвига k_c характеризует соотношение между активной и реактивной мощностями и для трёхфазного преобразователя определяется равенством

$$k_c = \sqrt{\frac{P^2}{P^2 + Q^2}}.$$

В симметричных трёхфазных преобразователях этот коэффициент равен косинусу угла сдвига основной гармоники тока относительно синусоидального питающего напряжения:

$$k_c = \cos \varphi_1,$$

и таким образом характеризует сдвиг по фазе основной гармоники тока относительно питающего напряжения.

Коэффициент сдвига как одна из энергетических характеристик процесса энергопотребления электроприводов переменного тока определяет экономичность потребления активной мощности. В трёхфазной системе сумма мгновенных периодических составляющих мощности равна нулю, т.е. если по одной из фаз энергия отдаётся источнику, то по двум другим одновременно существует поток энергии обратного направления той же мощности. Ещё менее экономична передача энергии с помощью вентильных преобразователей, когда при регулировании искажается форма синусоидального тока.

Коэффициент искажения трёхфазного преобразователя находится из выражения

$$k_{\text{и}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + P_{\text{и}}^2}}.$$

При симметричной нагрузке фаз он характеризует степень искажения сетевого тока и определяется, как и в однофазных цепях, отношением действующего значения основной гармоники сетевого тока к действующему значению этого тока:

$$k_{\text{и}} = \frac{I_{1(1)}}{I_1}.$$

При синусоидальном токе коэффициент искажения равен единице.

Выразим мощность искажения через полную мощность первой гармоники тока и коэффициент искажения:

$$P_{\text{н}} = U_1 I_{1(1)} \sqrt{\frac{1}{k_{\text{н}}^2} - 1} = \sqrt{(P^2 + Q^2) \left(\frac{1}{k_{\text{н}}^2} - 1 \right)},$$

где $k_{\text{н}} = \frac{S_{(1)}}{S}$; $S_{(1)} = U_1 I_{1(1)} = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Коэффициент несимметрии $k_{\text{нсм}}$ трёхфазного преобразователя характеризует степень несимметрии нагрузки фаз и определяется из выражения

$$k_{\text{нсм}} = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2 + P_{\text{н}}^2}{S^2}}.$$

В симметричном преобразователе этот коэффициент равен единице.

Энергетические показатели электроприводов с полупроводниковыми преобразователями определяются:

- потерями в преобразователе от первой гармонической составляющей тока;
- потерями в силовом канале от высших гармонических тока;
- величиной потребляемой реактивной энергии при регулировании угла α .

Потери от первой гармонической (полезной) составляющей тока определяют путём соответствующего увеличения активного сопротивления в цепях обмоток двигателя. Внутреннее сопротивление преобразователя учитывает потери на входе (в трансформаторах, сетевых реакторах) и выходе (сглаживающих и уравнивающих реакторах) и в самих полупроводниковых приборах.

Внутреннее сопротивление преобразователя (выпрямителя) определяют по номинальным данным:

$$r_{\text{н}} \approx \frac{P_{\text{н}} (1 - \eta_{\text{н}})}{\eta_{\text{н}} I_{\text{н}}^2},$$

где $P_{\text{н}}$, $I_{\text{н}}$ – номинальные мощность и ток на выходе преобразователя; $\eta_{\text{н}}$ – номинальный КПД преобразователя.

В преобразователях с естественной коммутацией (выпрямителях и преобразователях переменного напряжения) угол φ зависит от угла управления α .

Потребляемая мощность на входе преобразователя

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi.$$

Среднее значение выпрямленной мощности на выходе выпрямителя

$$P_d = U_{d0} I_d \cos \alpha = U_d I_d,$$

где U_d и I_d – средние значения выпрямленных напряжения и тока.

Пренебрегая активными потерями, получим $P_1 = P_d$, отсюда

$$\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = U_{d0} I_d \cos \alpha;$$

$$\cos \varphi = \frac{U_{d0} I_d}{\sqrt{3} U_1 I_1} \cos \alpha;$$

$$\cos \varphi = A \cos \alpha,$$

где $A = \frac{U_{d0} I_d}{\sqrt{3} U_1 I_1}$ – коэффициент пропорциональности.

Угол сдвига определяют как

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2},$$

где γ – угол коммутации.

В преобразователях переменного напряжения при постоянной частоте угол φ зависит также и от угла φ_1 между напряжением и током электродвигателя (рис. 2.9). Такой преобразователь используется для регулирования напряжения АД, угол φ_1 определяется из схемы замещения.

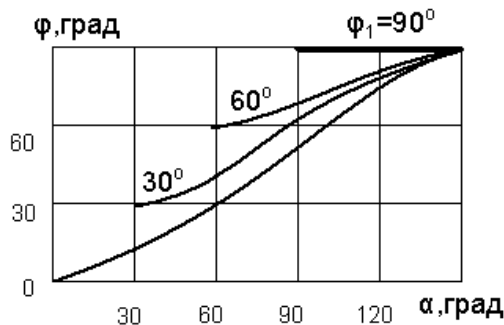


Рис. 2.9. Зависимость угла сдвига от угла управления

Из выражения $\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2}$ видно, что коэффициент мощности вентильного электропривода постоянного тока (также вентильного двигателя с синхронной машиной и частотно-регулируемого привода с асинхронной машиной) зависит от скорости двигателя, определяемой углом управления α и его нагрузки, от которой зависит угол коммутации γ . Увеличение диапазона регулирования (снижение скорости) или увели-

чение нагрузки приводит к уменьшению коэффициента мощности электропривода, т.е. к росту потребления реактивной мощности из сети.

Зависимость $\cos\varphi$ от относительной скорости ω^* при номинальной нагрузке на валу ДПТ характеризуется кривой, приведенной на рис. 2.10. Из этого рисунка видно, что уменьшение коэффициента мощности происходит пропорционально снижению скорости, т.е. увеличению диапазона регулирования.

Коэффициент искажения определяется гармоническими составляющими потребляемого из сети тока. Порядковые номера гармонических составляющих, присутствующих в токе преобразователя,

$$n = mp \pm 1,$$

где $p = 1, 2, 3, \dots$; m – пульсность преобразователя ($m = 6$ для мостовых схем).

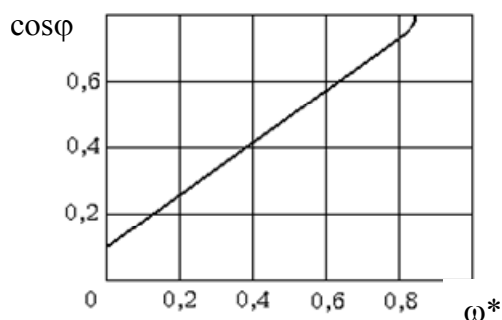


Рис. 2.10. Зависимость коэффициента мощности от частоты вращения вала ДПТ НВ

Амплитуды гармонических составляющих токов зависят от угла управления, поэтому коэффициент искажения также является функцией угла α . Для грубой оценки принимают (при $m = 6$) для управляемых преобразователей $k_{\text{и}} \geq 0,95$, для неуправляемых $k_{\text{и}} \approx 1$.

Высшие гармонические составляющие тока, помимо дополнительных потерь в сети, учитываемых $k_{\text{и}}$, вызывают дополнительные потери в двигателях.

В двигателях постоянного тока эти потери вызываются высшими гармоническими составляющими выпрямленного тока I_{dn} . Если преобразователь работает в режиме источника тока, то высшие гармонические составляющие тока определяются разложением в ряд Фурье выпрямленного тока. Если преобразователь работает в режиме источника напряжения, то высшие гармонические тока зависят от амплитуд гармонических составляющих выпрямленного напряжения и сопротивлений якоря.

Несколько иной характер имеют энергетические соотношения в ВП частоты, у которых происходит непосредственный обмен реактивной

энергией между низкочастотной нагрузкой и питающей сетью. В данном случае кривая выходного напряжения формируется отдельными вентилями и приближается к синусоиде только при определённом соотношении частот сети и выходной.

Эти обстоятельства существенно отличают энергетический режим этих устройств и заставляют ввести для них понятие составляющих полной мощности как для значений на протяжении проводимости одного вентиля, так и для средних значений цикла.

Отмеченные особенности статических преобразователей электроэнергии вызывают увеличение потерь в силовом канале электропривода.

Существенным положительным свойством статических преобразователей являются меньшие потери от первой гармонической составляющей тока. Это объясняется двумя причинами: во-первых, меньшие потери в самом преобразователе по сравнению с электрической машиной (отсутствуют механические потери, потери на возбуждение) и, во-вторых, меньшее число ступеней преобразования электроэнергии. Например, КПД выпрямителей достигает 0,95–0,98, а преобразователей 0,95.

2.3. Типовые структуры преобразователей электроэнергии

2.3.1. Электромашинные преобразователи

Схема электромашинного преобразователя переменного тока в постоянный показана на рис. 2.11.

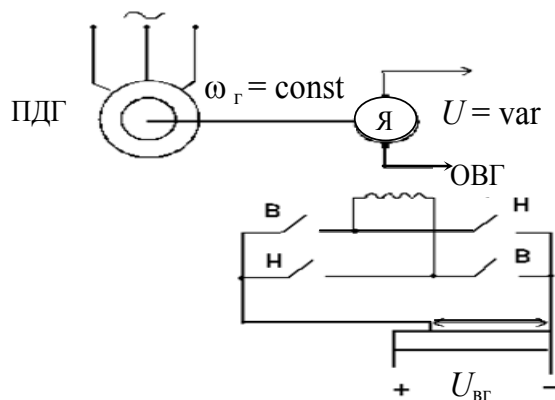


Рис. 2.11. Схема преобразования переменного тока в постоянный ток

Преобразователь содержит приводной двигатель генератора (ПДГ) – асинхронный или синхронный двигатель. Главное требование к ПДГ – жесткая характеристика (для того, чтобы скорость генератора не зависела от нагрузки). Генератор – электрическая машина постоянного тока независимого возбуждения с компенсационной обмоткой. Необходи-

мость компенсации заключается в том, чтобы ЭДС генератора не зависела от нагрузки. Имеется два входа энергии – механический (ω_r) и источник возбуждения ($U_{вг}$). Для управления используется потенциометр.

Схема электромашинного преобразователя с регулировкой входного напряжения по амплитуде и частоте представлена на рис. 2.12.

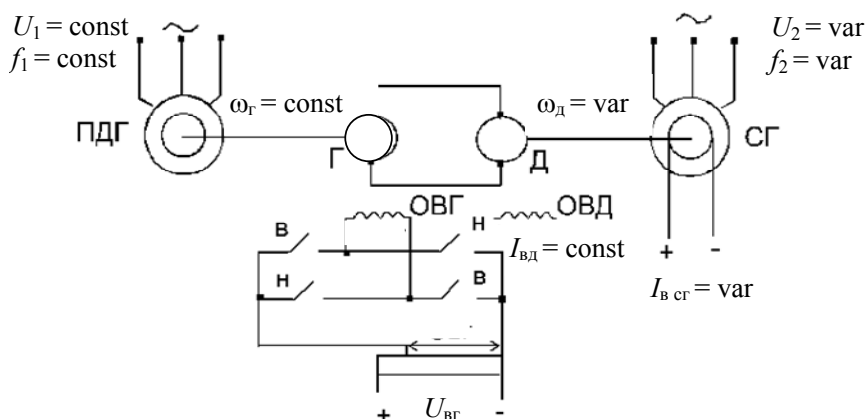


Рис. 2.12. Схема электромашинного преобразователя

Скорость двигателя Д ω_d регулируется изменением напряжения на якорной обмотке:

$$\omega_d = \frac{E_r}{k_d \Phi_d} - \frac{I_r}{k_d \Phi_d}, \text{ или } \omega_d = \frac{c_r I_{вг}}{k_d \Phi_d} - \frac{I_r}{k_d \Phi_d},$$

где $c_r = k_r k_{вг} \omega_r$ – постоянная генератора; k_d и $k_r = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивные коэффициенты двигателя и генератора; $k_{вг}$ – коэффициент возбуждения генератора, определяется из кривой намагничивания генератора; $r_y = r_{яг} + r_{яд}$ – сопротивление якорной цепи электромашинного преобразователя.

Электродвижущая генератора

$$E_r = c_r I_{вг}.$$

Вал двигателя соединен с валом синхронного генератора СГ, частота напряжения которого пропорциональна скорости двигателя, а амплитуда – регулируется током возбуждения $I_{всг}$.

Недостатки перечисленных систем – низкий КПД, наличие большого числа вращающихся машин, малое быстродействие. Установлен-

ная мощность оборудования превышает более чем в 4 раза необходимую (при условном $\eta = 1$). КПД преобразователя

$$\eta_{\text{п}} \approx \eta_{\text{н}}^k,$$

где $\eta_{\text{н}}$ – номинальный КПД приводного двигателя; k – число ступеней преобразования энергии.

Если КПД электрических машин средней мощности составляет 0,85–0,9, то при двухкратном преобразовании энергии КПД преобразователя не превышает 0,7–0,8, а при четырёхкратном 0,5–0,65, т.е. если приводной двигатель генератора имеет мощность 1000 кВт, то 500–350 кВт отдается на нагрев воздуха.

2.3.2. Статические преобразователи на полупроводниках (тиристорах)

Рассмотрим широко применяемые в электроприводе схемы полупроводниковых преобразователей, основным элементом которых является тиристор (SCR – Silicon Controlled Rectifier). Тиристор – это полупроводниковый прибор.

Отпирается тиристор при подаче на УЭ импульса тока и наличии на аноде положительного потенциала (рис. 2.13). Если на анод подать напряжение больше допустимого прямого напряжения, то произойдет неуправляемое самооткрывание – пробой тиристора. Поэтому рабочее анодное напряжение выбирается в несколько раз ниже.

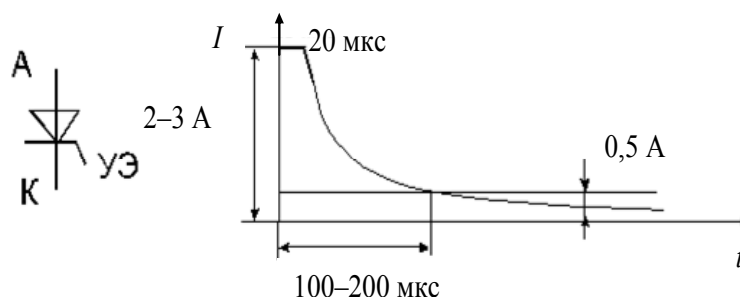


Рис. 2.13. Схема отпираания тиристора

Вольт-амперная характеристика тиристора представлена на рис. 2.14.

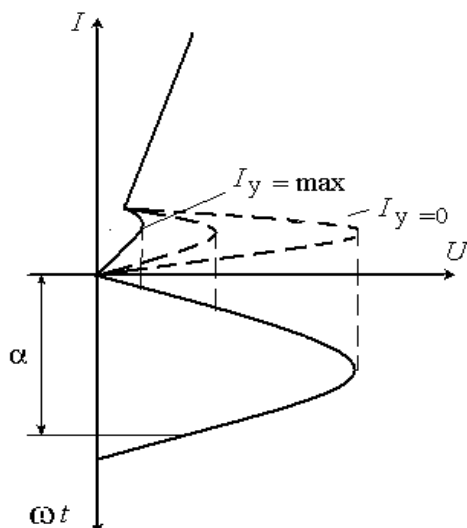


Рис. 2.14. Вольт-амперная характеристика тиристора

Отпиранием тиристора можно управлять, меняя ток управления I_y по величине – горизонтальное управление. Например, при $I_{y\max}$ тиристор отпирается при малом анодном напряжении. Но такое управление возможно только до половины напряжения, т.е. управление неполное.

В основном применяется вертикальный способ управления (фазовое управление). Выбирается $I_y = \max$ и его величина остается постоянной, а меняется фаза подачи импульса тока. Перемещая импульс по фазе, можно менять угол управления α в пределах $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Тиристор запирается двумя способами:

- изменением полярности анодного напряжения на обратное (естественная коммутация);
- обрывом цепи протекания тока (принудительная коммутация).

Схема преобразователя переменного тока в постоянный, выполненного по трехфазной мостовой схеме – схема трехфазного мостового преобразователя переменного тока в постоянный – представлена на рис. 2.15.

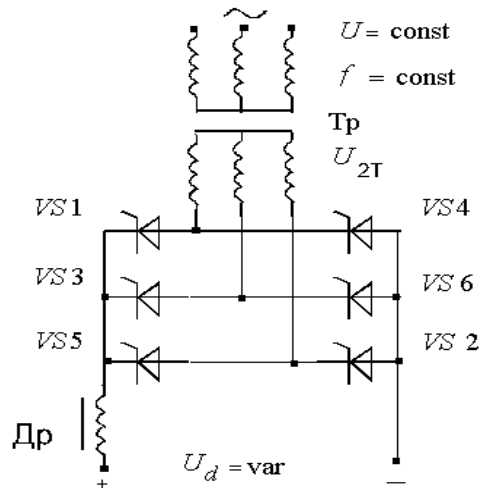


Рис. 2.15. Схема трехфазного мостового преобразователя

Угол управления тиристоров α – угол между точкой естественного отпирания и реальным моментом открытия тиристора (рис. 2.16). Точка естественного отпирания – равенство фазных напряжений друг другу (линейное напряжение равно нулю).

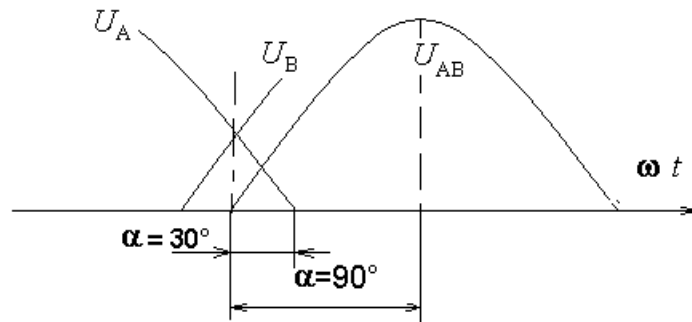


Рис. 2.16. Угол управления тиристоров

Диаграммы напряжений и токов, поясняющие принцип работы шестипульсного мостового выпрямителя при $\alpha = 0$, представлены на рис. 2.17.

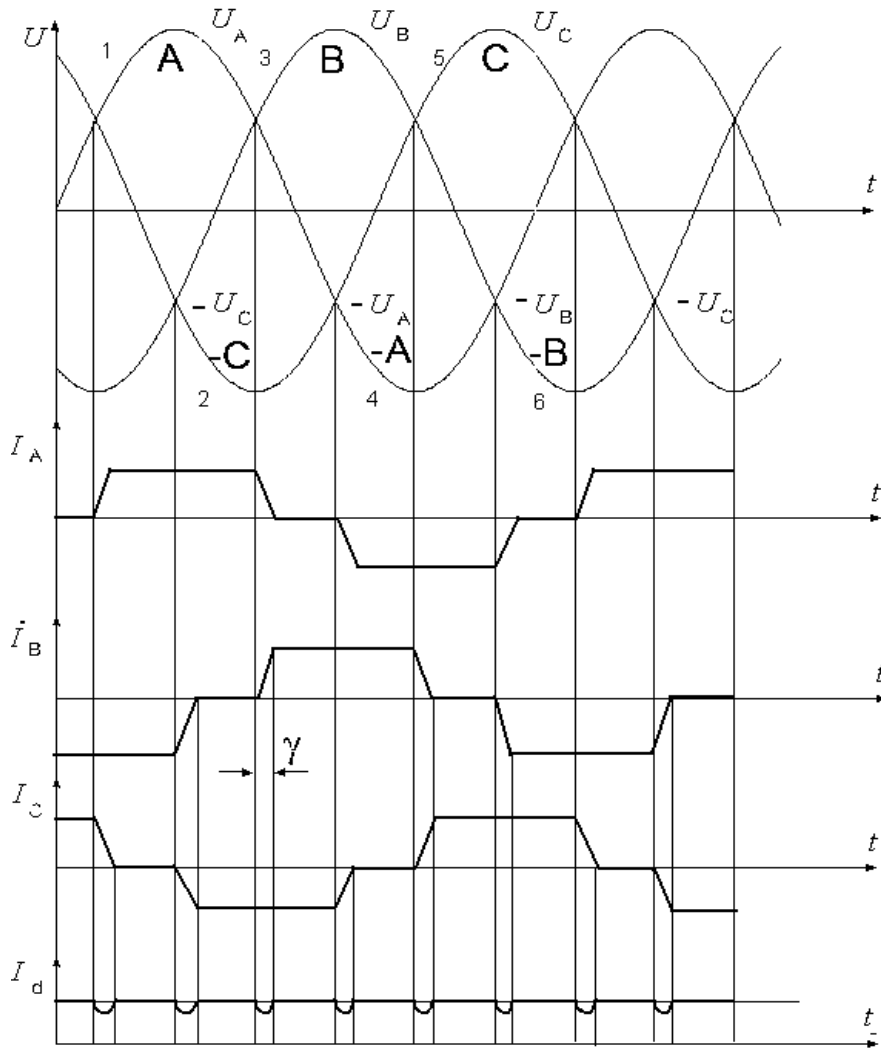


Рис. 2.17. Диаграммы шестипульстного мостового выпрямителя

Угол коммутации γ – время перевода тока с одного вентиля на другой ($\gamma \approx 15\text{--}20^\circ$ частоты питающей сети).

Среднее значение ЭДС на выходе преобразователя

$$e_d = e_{d0} \cos \alpha,$$

где $e_{d0} = k_{cx} E_{2т}$ ($e_{d0} = k_{cx} U_c$) – максимальная величина среднего значения выпрямленной ЭДС; k_{cx} – коэффициент схемы ($k_{cx} = 1,35$ для линейного напряжения или 2,34 для фазного); $E_{2т}$ (U_c) – ЭДС вторичной обмотки трансформатора, или напряжение сети.

Угловая характеристика преобразователя выпрямительного (при $0 < \alpha < 90^\circ$, $e_d > 0$) и инверторного (при $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, $e_d < 0$) режимов представлена на рис. 2.18.

– инверторный режим.

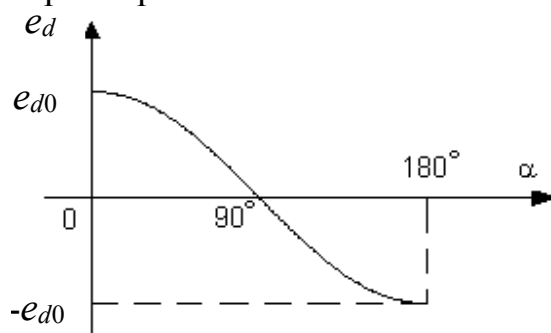
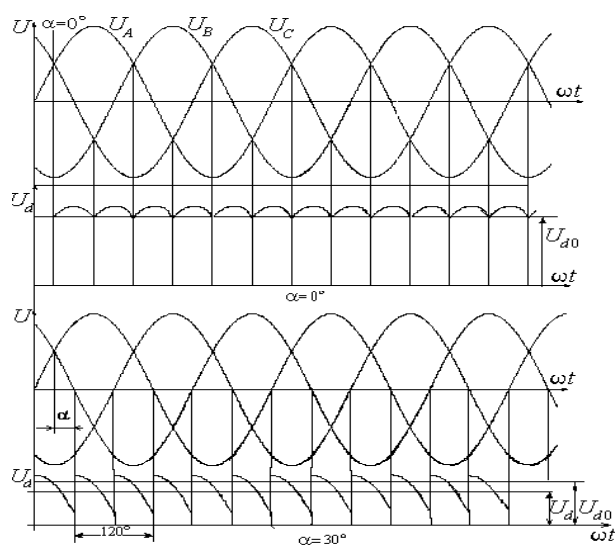


Рис. 2.18. Угловая характеристика преобразователя

Диаграмма напряжений на входе и выходе шестипульсного мостового выпрямителя при различных углах управления представлена на рис. 2.19.



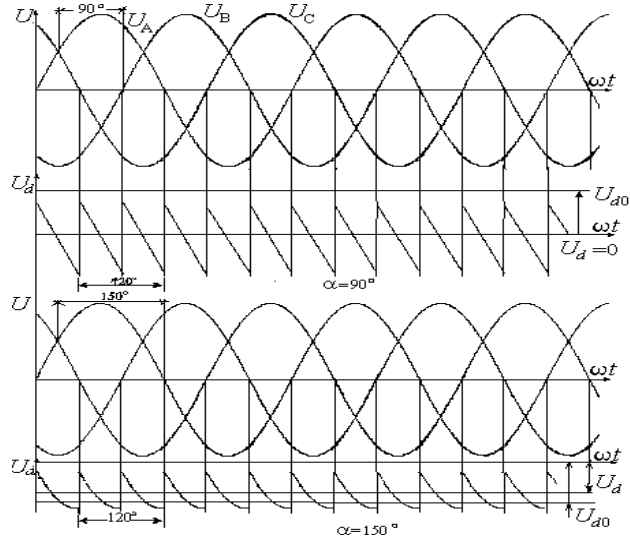


Рис. 2.19. Диаграмма напряжений на входе и выходе шестипульсового мостового выпрямителя

Схема преобразователя постоянного тока с нулевой точкой представлена на рис. 2.20.

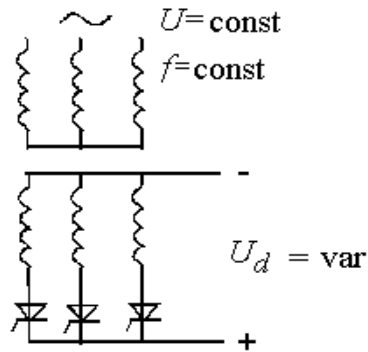


Рис. 2.20. Схема преобразователя постоянного тока с нулевой точкой

Схема преобразователя постоянного тока с импульсным регулированием напряжения представлена на рис. 2.21.

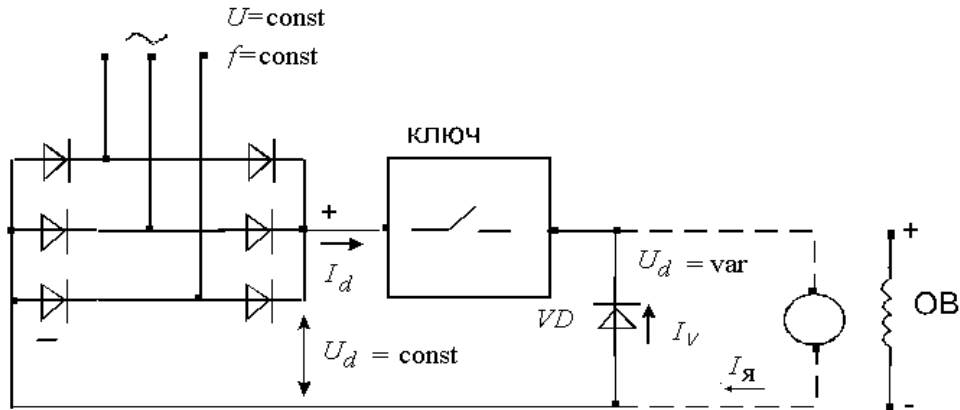


Рис. 2.21. Схема преобразователя постоянного тока с импульсным регулированием напряжения

Существует два способа управления электронным ключом – широтно–импульсное и частотно–импульсное. При широтно–импульсном период коммутации ключа T_k , состоящий из времени замкнутого t_3 и разомкнутого t_p состояния ключа, остается постоянным $T_k = t_3 + t_p = \text{const}$, а меняется время t_3 .

Отношение времени замкнутого состояния ключа к периоду коммутации называется скважностью (D)

$$D = \frac{t_3}{T_k} = \frac{t_3}{t_3 + t_p}.$$

При частотно–импульсном регулировании время замкнутого состояния ключа остается постоянным, а меняется период коммутации ключа, т.е. частота. При этом также меняется скважность.

При замкнутом ключе ток в нагрузке (например, в двигателе постоянного тока) протекает под действием напряжения выпрямителя, а при разомкнутом – под действием ЭДС самоиндукции, замыкаясь через диод VD (электродинамический режим торможения). Ток в якоре имеет пульсирующий характер (рис. 2.22, а). Ток в нагрузке при $t = t_3$ равен току, протекающему из выпрямителя $I_y = I_d$, при $t = t_p$ ток $I_y = I_V$.

Регулируя скважность D работы ключа, можно получить различные характеристики (рис. 2.22, б). При $D = 1$ на якорь постоянно подается полное напряжение сети и ДПТ имеет естественную характеристику. При разомкнутом ключе ($D = 0$) напряжение не подается, и двигатель переходит в режим электродинамического торможения.

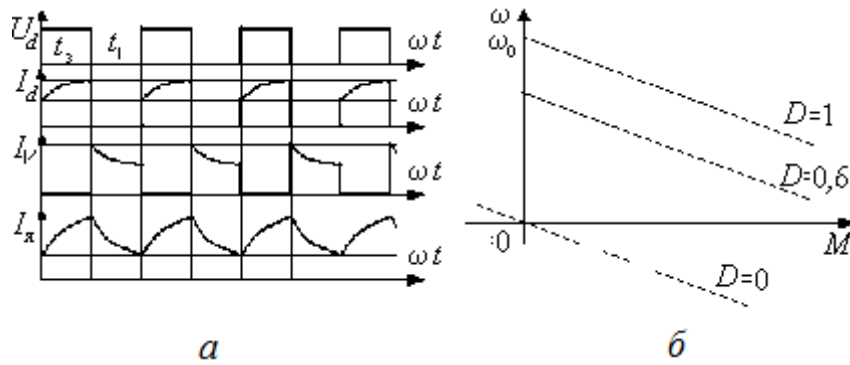


Рис. 2.22. Сквозность и характеристики ДПТ НВ

Электронные ключи выполняются на транзисторах, тиристорах и запираемых тиристорах. Схема электронного ключа на тиристоре с искусственной коммутацией представлена на рис. 2.23.

Для включения привода в работу вначале сигнал подается на вспомогательный тиристор $VS2$, при открывании которого по якорной цепи двигателя протекает ток заряда конденсатора C . Потенциал на верхней обкладке конденсатора становится положительным после окончания заряда, а ток уменьшается до нуля.

Затем поочередно подаются сигналы на отпирание тиристоров $VS1$ и $VS2$. При открывании основного тиристора $VS1$ двигатель подключается к сети. Через тиристор $VS1$ проходит ток якоря и ток перезаряда конденсатора C , замыкающийся по контуру $C-VS1-VD1-L$. В результате перезаряда конденсатор получает отрицательный потенциал на верхней обкладке.

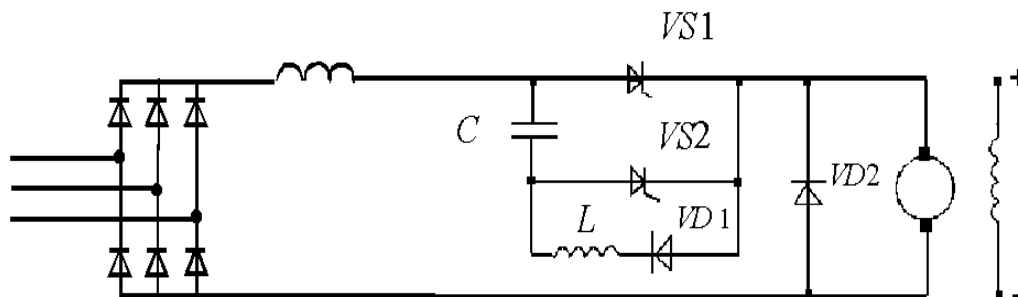


Рис. 2.23. Схема электронного ключа на тиристоре с искусственной коммутацией

Последующее отпирание $VS2$ приводит к шунтированию основного тиристора конденсатором. При этом потенциал анода $VS1$ становится отрицательным по отношению к катоду, что вызывает его запираение

в результате перезаряда ёмкости. Верхняя обкладка конденсатора по окончании процесса становится положительной.

Достоинство импульсного способа – простота, $\cos \varphi = 1$. Недостаток – пульсации тока.

Схема преобразователя переменного тока с регулированием напряжения при постоянной частоте представлена на рис. 2.24.

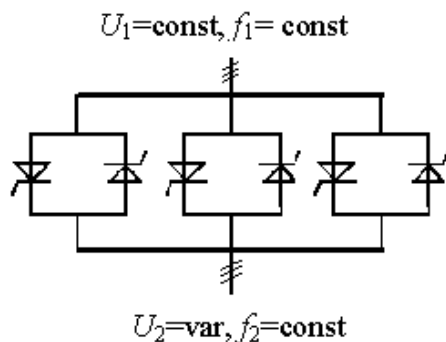


Рис. 2.24. Схема преобразователя переменного тока с регулированием напряжения при постоянной частоте

Схема преобразователя частоты с непосредственной связью представлена на рис. 2.24.

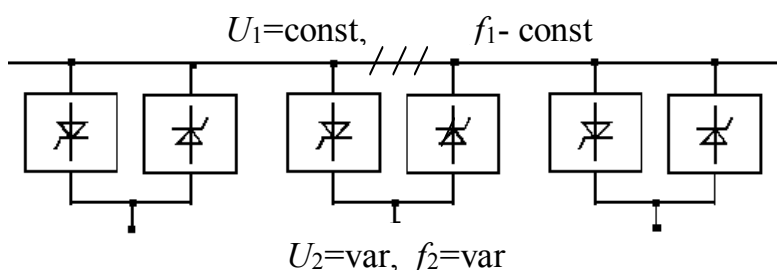


Рис. 2.24. Схема преобразователя частоты с непосредственной связью

Такой преобразователь оказывает меньшее влияние на сеть вследствие большего числа выпрямительных мостов (6 штук) – выше частота пульсации, но меньше амплитуда. Управление осуществляется по частотному закону $\frac{U}{f} = \text{const}$. Однако выходная частота преобразователя не превышает 30 % от входной, т.е. 15 Гц. Кроме того, преобразователь имеет сложную систему управления.

Схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока с автономным инвертором (АИ) представлена на рис. 2.26.

Преобразователь состоит из управляемого выпрямителя УВ, с помощью которого производится регулирование напряжения, и АИ с ис-

кусственной коммутацией, с помощью которого регулируется частота. Коммутация тиристоров инвертора осуществляется за счет энергии, накопленной в реактивных элементах L и C . Диоды $VD1$ - $VD6$ служат для отделения коммутирующего тока от тока нагрузки.

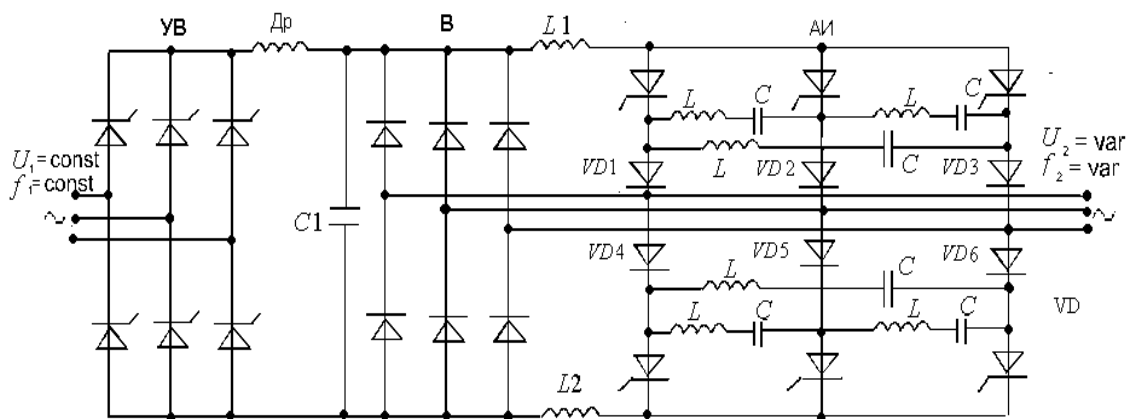


Рис. 2.26. Схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока с АИ

Для отдачи реактивной энергии в сеть служит выпрямитель В, включенный встречно основному выпрямителю. Дроссель Dr и ёмкость $C1$ служат для сглаживания тока и напряжения на входе инвертора. Ёмкость $C1$ указывает на то, что инвертор выполнен по схеме источника напряжения (выходной ток синусоидальной формы, а напряжение ступенчатой). Индуктивности $L1$, $L2$ предназначены для ограничения тока разряда через диоды выпрямителя В.

Такой преобразователь отличается высоким КПД (около 0,96) и быстродействием. Недостатки – значительная установленная мощность преобразователя ($\approx 2,5 P_H$), наличие реактивных элементов и сложность системы управления.

2.3.3. Статические преобразователи на управляемых электронных приборах

Массовое производство преобразователей для электропривода на основе современных двухоперационных приборов освоено практически всеми ведущим электротехническими компаниями мира. При этом многообразию существующих преобразователей свойственно использование в качестве силовой схемы одной и той же классической структуры (рис. 2.27): трехфазный мостовой неуправляемый (нерегулируемый) выпрямитель В, LC -фильтр звена постоянного тока, трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения (АИН) с ШИМ.

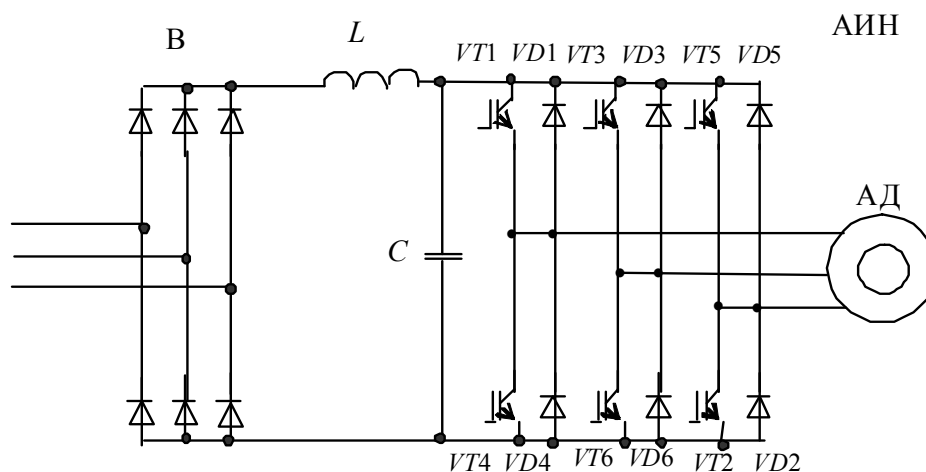


Рис. 2.27. Схема электромеханического преобразователя

Неуправляемый режим работы выпрямителя и свойства силовых управляемых ключей инвертора снимают вопросы ограничения di/dt и du/dt в цепях вентилях, применения громоздких снабберов для защиты от перенапряжений и т.п.

Разнообразие силовых схем сводится лишь к различию типов и способов включения коммутационных и защитных аппаратов (электромагнитные пускатели, автоматические выключатели, предохранители, токоограничивающие реакторы), датчиков тока и напряжения, устройств торможения (сетевой инвертор для рекуперации, ключ электродинамического торможения). Акцент разработки силовой части преобразователей сместился из области схемотехники (существенной для тиристорных устройств) в область оптимизации конструкторско-компоновочных решений и теплофизических расчётов, повышения устойчивости к аварийным режимам.

Основное влияние на потребительские свойства преобразователей и электроприводов оказывает их информационный канал – используемые алгоритмы управления и регулирования и реализующие их микроконтроллерные системы (МСУ). Именно последние определяют регулировочные свойства и динамические характеристики электропривода, его функциональность и адаптивность к сложным системам автоматического управления различными технологическими процессами.

Автономный инвертор (рис. 2.27) питается от постоянного напряжения с выхода неуправляемого диодного выпрямителя либо от автономного источника постоянного напряжения. Емкость C сглаживает пульсации с выхода выпрямителя. Ключ состоит из биполярного ключа VT с полевым управлением (IGBT-ключ) и диода VD , включенного про-

тивоположно питающему напряжению. Диод VD предназначен для возврата энергии в сеть в случае, когда ток через ключ имеет направление, противоположное направлению напряжения на нем. Подобная ситуация наблюдается при реактивно-активной нагрузке. Схема соединения диодов $VD1-V D6$ представляет собой трехфазный мостовой шестиполупериодный диодный выпрямитель, позволяющий осуществить возврат энергии от двигателя в сеть.

Для реализации режима рекуперации вместо неуправляемого выпрямителя используют управляемый реверсивный преобразователь на тиристорах. Режим электродинамического торможения осуществляется подключением внешнего реостата через дополнительный ключ IGBT параллельно автономному инвертору [2].

В типовой схеме автономного инвертора напряжения содержится 6 ключей. Транзисторные ключи, переключаясь в определенной последовательности, формируют на выходе инвертора периодический трехфазный сигнал. В таком инверторе фазы двигателя могут быть подключены к потенциалам постоянного напряжения $2^3 = 8$ различными способами. Результирующий вектор напряжения на выходе АИН имеет, соответственно, 8 положений, из которых 2 положения являются вырожденными, т.к. они приводят к нулевому значению результирующего вектора.

Регулирование частоты трехфазного напряжения на выходе АИН осуществляется путем изменения частоты переключений транзисторных ключей. Изменение амплитуды трехфазного напряжения производится с помощью широтно-импульсного регулирования.

В современных IGBT время переключения составляет менее одной микросекунды. Столь высокая скорость переключения позволяет в полной мере использовать достоинства метода широтно-импульсной модуляции: осуществлять коммутацию на частоте свыше 16 кГц, что решает проблему акустических шумов, уменьшает массу и габариты реактивных элементов – фильтров высших гармоник. Наконец, при большой кратности частоты коммутации и низкой частоте выходного напряжения значительно повышается быстродействие системы регулирования, что позволяет улучшить динамические характеристики преобразователя.

В то же время при повышении частоты коммутации значительно возрастает доля коммутационных потерь, из-за чего приходится снижать допустимые токи и напряжения при частотах 5 кГц и выше. Увеличение коммутационных потерь уменьшает перегрузочную способность транзисторов. Быстрое переключение транзисторов из-за эффекта di/dt на паразитных индуктивностях в контуре коммутации приводит к появлению значительных перенапряжений на элементах схемы. При быстрых переключениях транзисторов на выходе преобразователя ско-

рость изменения напряжения может достигать значений 5000 В/мкс. При длине соединительных кабелей между преобразователем и нагрузкой 10–100 м и более напряжения могут достигать двухкратных по отношению к номинальным значениям. Это явление особо опасно в регулируемых электроприводах. Под влиянием этих быстро нарастающих, с крутым фронтом, значительных по величине импульсов напряжения может быть повреждена изоляция двигателя.

Отмеченные проблемы возникают при так называемой жесткой коммутации и использовании широтно-импульсной модуляции в ее классическом варианте. Очевидный путь преодоления указанных трудностей – снижение скорости переключений. Снижение частоты ШИМ является желательным, однако оно приводит к росту амплитуд ближайших к основной высших гармоник на выходе инвертора, что влечет за собой увеличение потерь в двигателе. С другой стороны, ШИМ существенно ослабляет лишь ближайшие к основной гармонике. Для ослабления гармоник более высокой частоты необходимо повышать частоту коммутаций ключей инвертора, что, естественно, приводит к увеличению потерь в преобразователе частоты.

Другое направление этих работ связано с возрождением техники резонансных инверторов, при которой «мягкое» переключение вентиля происходит при нуле тока или напряжения.

Недостатком такой схемы является то, что форма получаемого фазного напряжения отличается от синусоиды. В результате энергетические характеристики АД ухудшаются, если их сравнить с энергетическими характеристиками двигателя, питающегося от трехфазного синусоидального напряжения. Для улучшения энергетических характеристик привода используются различные способы широтно-импульсной модуляции: синусоидальная, линейная и их различные модификации. Широтно-импульсная модуляция преследует цель ослаблять существенные по амплитуде высшие гармоники, наиболее близкие к основной. Это достигается тем, что в течение периода повторяемости $T/6$ осуществляется периодическое изменение основной диаграммы работы ключей инвертора при одновременном введении нулевых участков.

На рис. 2.28 показаны фазовые плечи GTO, IGCT и IGBT инверторов напряжения, откуда видно число основных компонентов в инверторе. В этом отношении IGBT предлагает наиболее изящное решение, поскольку имеется возможность использования минимального количества элементов, так как управляющие блоки являются частью IGBT-модулей. Действительно, для токов до 200 А полный инвертор мог бы быть сделан в виде одного модуля и число компонентов будет равно

единице, но при 1200 А это число будет шести (6 отдельных ключевых модулей), а для 3600 А – восемнадцати (3×1200 А).

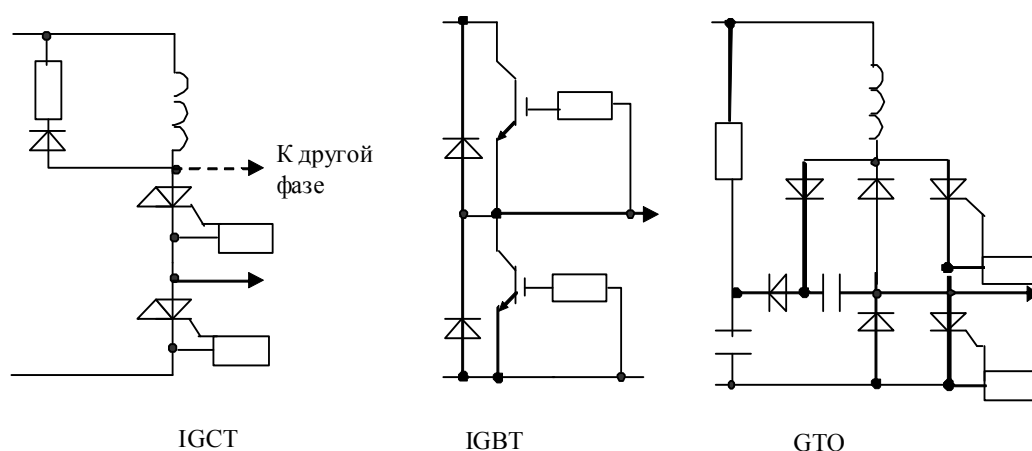


Рис. 2.28. Фазовые плечи GTO, IGCT и IGBT инверторов напряжения

С точки зрения надежности число компонентов – это число требуемых дискретных компонентов в модульном или другом исполнении, поставляемых изготовителем полупроводников. Таким образом, инвертор на силовых IGBT на ток 50 А (с требованием не применять параллельного соединения приборов) имел бы 18 устройств (IGBT + диод + управляющий блок), у каждого из которых определенная норма наработки на отказ. Эти нормы зависят от многих факторов: числа кристаллов, монтажных проводов, паяных соединений, разъемных соединений, рабочей температуры, электрических и механических нагрузок и т.д. Единичный полупроводниковый элемент будет иметь типовую, свойственную ему норму наработки на отказ, например 10 (10 отказов в течение 1 000 000 000 ч работы), и непосредственно управляющий драйвер, состоящий из многих активных и пассивных компонентов, имел бы норму отказа приблизительно 500.

IGBT состоят из многих стандартных индивидуальных кристаллов, установленных параллельно, что одновременно является как сильной, так и слабой стороной. Стандартные кристаллы позволяют производить стандартные пластины, заканчивающиеся одним изделием на ток от 50 до 1000 А, а монолитный подход, основанный на использовании кристаллов, вырезанных из большой пластины, гарантирует наилучшее использование кремния. С другой стороны, с ростом тока прибора пропорционально увеличивается норма отказа.

В тоже время GTO, несмотря на монолитную проводниковую структуру, требует многих вспомогательных компонентов, и, как видно

из рис. 2.28, каждый ключ имеет определенный коэффициент нормы отказа (не говоря уже о стоимости и массогабаритных параметрах).

Характерной чертой перечня качеств «идеального» ключа является надежность, т.е. чтобы полный составляющий показатель был ограничен, вне зависимости достигают ли компоненты видимых размеров или нет. В этом смысле IGBT-технология гарантирует, что не только внешних компонентов в инверторе будет немного (примерно 3), но и что все «внутренние» полупроводники будут монолитными. На рис. 2.29 сравнивается число силовых компонентов (пассивные элементы + кристаллы, исключая элемент управления) для инвертора, работающего от 2,8 кВ с двухпозиционным ШИМ на частоте 600 Гц для всех трех технологий.

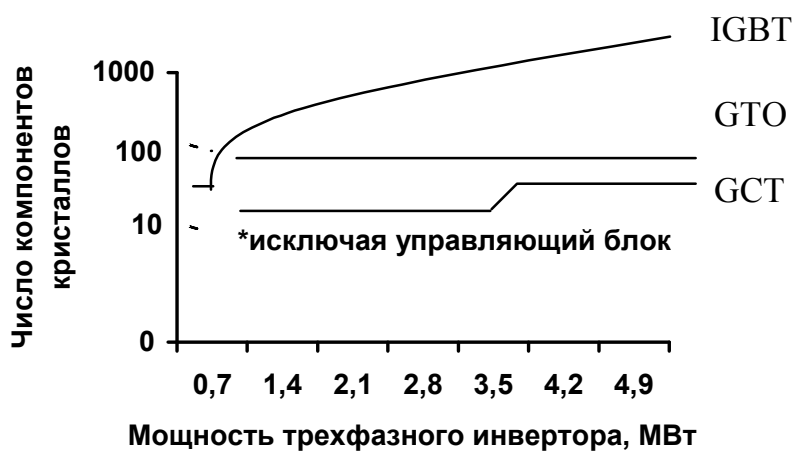


Рис. 2.29. Число компонентов

На рис. 2.30 представлена схема двухключевого «интеллектуально-го» силового IGBT-модуля с полными функциями защит от перегрузки по току, короткого замыкания, перенапряжений и перегрева силовых элементов.

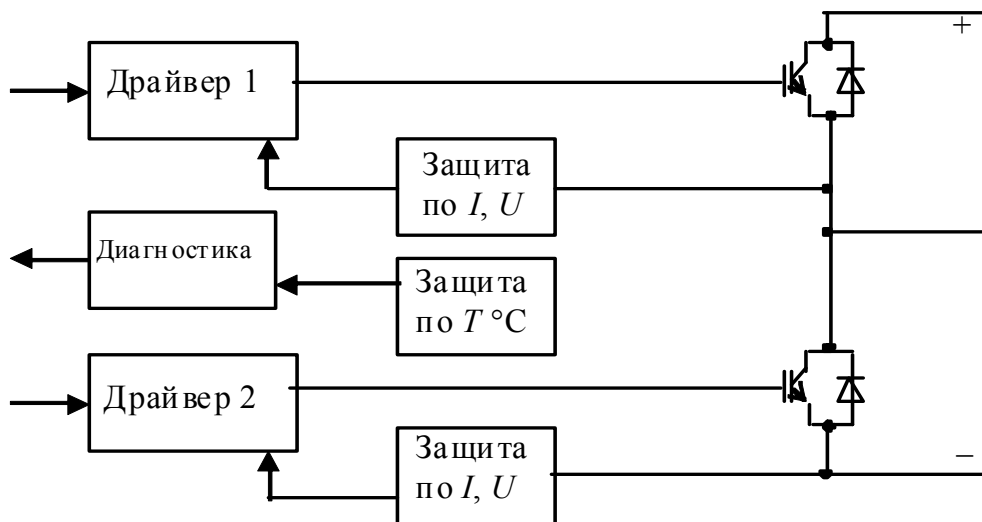


Рис. 2.30. Схема двухключевого «интеллектуального» силового IGBT-модуля

В электроприводе постоянного тока основные способы управления осуществляются посредством изменения напряжения якоря и потока возбуждения. В общем случае требуется обеспечить управление двигателем постоянного тока во всех режимах работы, в том числе в реверсивном режиме с рекуперацией энергии в первичный источник питания. Наиболее эффективно все эти режимы реализуются в схеме, обеспечивающей работу в четырех квадрантах на стороне постоянного тока. Схема выполнена на полностью управляемых ключах и регулируемой по способу широтно-импульсной модуляции (рис. 2.31).

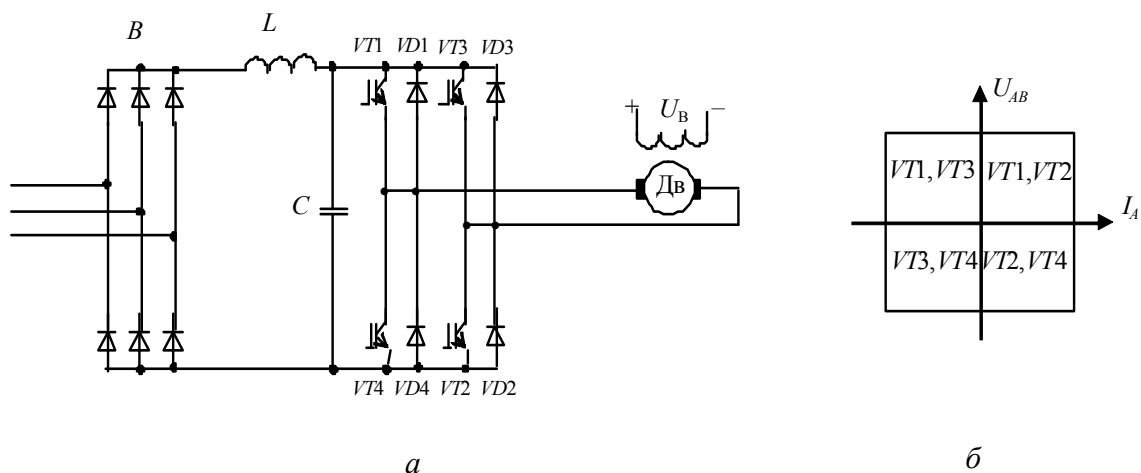


Рис. 2.31. Схема на полностью управляемых ключах:

a – схема; *б* – диаграмма состояний транзисторов

2.4. Энергетические характеристики электромеханических преобразователей (нерегулируемого электропривода) в статическом режиме

2.4.1. Потери мощности

Потери мощности в электрической машине делятся на постоянные и переменные

$$\Delta P = K + V.$$

Постоянные потери мощности не зависят от тока двигателя (нагрузки) и включают в себя потери:

- в стали K_c ;
- механические от трения в подшипниках и вентиляционные K_m ;
- от тока возбуждения K_b .

Потери в стали зависят от амплитуды и частоты изменения потока

$$K_c = K_{сн} \left(\frac{f}{f_n} \right)^\beta \left(\frac{\Phi}{\Phi_n} \right)^2,$$

где $K_{сн}$ – потери при номинальной скорости; $\beta = 1,2 \div 1,5$ – показатель, зависящий от марки электротехнической стали.

Механические потери определяются угловой скоростью двигателей

$$K_m = K_{мн} \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^n,$$

где $n = 1 \div 2$.

Потери от тока возбуждения для ДПТ НВ

$$K_b = I_b^2 r_b.$$

В асинхронных двигателях нет специальной обмотки возбуждения, предназначенной для создания магнитного потока. Поток АД создаётся реактивной составляющей тока статора I_μ , называемой током намагничивания. Поэтому потери АД от тока намагничивания составляют

$$K_b = 3I_\mu^2 r_1,$$

где r_1 – активное сопротивление обмотки статора.

Постоянные потери в АД состоят из механических K_m , потерь в стали статора K_{c1} и ротора K_{c2} , а также потерь в меди обмотки статора от намагничивающего тока I_μ :

$$K = K_M + K_{c1} + K_{c2} + 3I_{\mu 1}^2 r_1.$$

Переменные потери определяются потерями в меди обмоток двигателей при протекании по ним изменяющегося тока нагрузки. Для ДПТ

$$V = I^2 r_{я} = I_H^2 r_{я} \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 = V_H \left(\frac{I}{I_H} \right)^2,$$

где $V_H = I_H^2 r_{я}$ – номинальные переменные потери.

Для асинхронных двигателей переменные потери состоят из потерь в обмотках статора и ротора за вычетом потерь от тока намагничивания:

$$V = V_1 + V_2 = 3I_1^2 r_1 + 3(I_2')^2 r_2' = 3(I_2')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma^2} \right),$$

где V_1, V_2 – потери в меди статора и ротора; I_2', r_2' – ток и сопротивление ротора, приведенные к обмотке статора; $\sigma = \frac{I_2'}{I_1}$.

$$\text{Тогда } V = 3(I_{2H}')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_H^2} \right) \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'} \right)^2 = V_H \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'} \right)^2,$$

где $V_H = 3(I_{2H}')^2 \left(r_2' + \frac{r_1}{\sigma_H^2} \right)$ – номинальные переменные потери;

$$\sigma_H = \frac{I_{2H}'}{I_{1H}} \approx 0,85 \div 0,95.$$

Для СД переменные потери мощности

$$V = 3I_1^2 r_1 = 3I_{1H}^2 r_1 \left(\frac{I_1}{I_H} \right)^2 = V_H \left(\frac{I_1}{I_H} \right)^2.$$

Если обозначить кратность тока двигателей через X , то переменные потери мощности для различных двигателей

$$V = V_H X^2.$$

Полные потери мощности в электромеханическом преобразователе

$$\Delta P = K + V_H X^2 = V_H (a + X^2),$$

где $a = \frac{K}{V_n}$ – коэффициент потерь (для двигателей нормального исполнения в зависимости от мощности и скорости $a \approx 0,5 \div 2$).

Потери мощности в номинальном режиме ($X = 1$) определяются по паспортным данным:

$$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}.$$

Постоянные потери мощности

$$K = \Delta P_n - V_n.$$

Анализ энергоиспользования двигателя как электромеханического преобразователя энергии показывает, что уровень потерь энергии в нем зависит как от режима энергопотребления, так и от качества подводимой к нему энергии. Потери мощности в электрической машине равны

$$\Delta P = K_m + K_c + K_v + V.$$

Кроме первой, составляющей эти потери можно отнести к классу «греющих» потерь, определяющих тепловой режим электрической машины. Так как ток якоря зависит от статического момента и магнитного потока, то для каждой статической нагрузки имеется ток возбуждения, при котором суммарные потери минимальны.

Однако поиск минимума суммарных потерь приводит к перераспределению потерь по активным частям электрической машины, в результате чего некоторые из них оказываются в большем температурном поле, чем без оптимизации, что сказывается на работоспособности двигателя. Особенно это ощутимо для машин, прошедших ремонт с частичной либо полной заменой обмотки якоря.

Ремонтные работы, предремонтная подготовка и эксплуатация приводят к тому, что результирующая индукция после каждого из ремонтов снижается. При этом наблюдается рост составляющих потерь, вызванных вихревыми токами. Установлено, что каждый последующий ремонт увеличивает потери в стали на 5–13 %. Возрастающие потери в основном сосредотачиваются в местах локальных или распределенных дефектов в верхней части зубцов. Это приводит к резкому увеличению тепловой напряженности и быстрому нарушению изоляции.

В электрических машинах переменного тока причина увеличения потерь остается без изменений, а на их перераспределение в значительной степени влияют как изменение характеристик электротехнической стали, так и режим питающего напряжения. При этом установлено, что

ремонт асинхронных двигателей массовых серий приводит к уменьшению их надежности.

В высоковольтных электрических машинах в случае наличия неисправности удаляется часть секций обмотки статора, в результате чего двигатель изменяет свой режим работы, являясь при этом уже несимметричным по конструкции. Как установлено, низкое качество питающего напряжения, несимметрия конструкции являются первопричинами вибрации обмотки и других частей двигателя. Вибрация приводит к преждевременному износу и механической части, в частности, подшипников.

Потери энергии за время работы двигателя с постоянной нагрузкой определяются произведением мощности потерь на время работы:

$$\Delta W = \Delta P t_p.$$

При работе двигателя с циклической нагрузкой потери энергии

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P(t) dt \approx \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i,$$

где $\Delta P_i, t_i$ – потери мощности и время работы при нагрузке $X_i = \frac{I_i}{I_{\text{н}}}$;

n – число значений нагрузки на отдельных участках; $\sum_{i=1}^n t_i = t_{\text{ц}}$ – время цикла.

2.4.2. Коэффициент полезного действия электропривода

Затраченная энергия отличается от полезной на величину потерь. Величина потерь энергии содержит постоянную и переменную составляющие. Постоянная составляющая не зависит от нагрузки (полезной мощности), вторая – пропорциональна полезной мощности в степени больше единицы.

Коэффициент полезного действия электромеханического преобразователя представляет собой отношение полной механической мощности на валу к мощности, потребляемой из сети. Примем условие, что при работе на естественной характеристике $X = \frac{I}{I_{\text{н}}} = \frac{P}{P_{\text{н}}}$, тогда КПД

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{н}}} = \frac{P}{P + \Delta P} = \frac{X}{X + \left(\frac{V_{\text{н}}}{P_{\text{н}}}\right)(a + X^2)}.$$

В номинальном режиме $X = 1$

$$\eta_n = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_H}{P_H}\right)(1 + a)}$$

Зависимость КПД от кратности нагрузки имеет максимум при

$$X_{\text{опт}} = \sqrt{a}$$

Максимальное значение КПД

$$\eta_{\text{max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_H}{P_H}\right)\sqrt{a}}$$

На рис. 2.32 представлена зависимость коэффициента полезного действия от мощности.

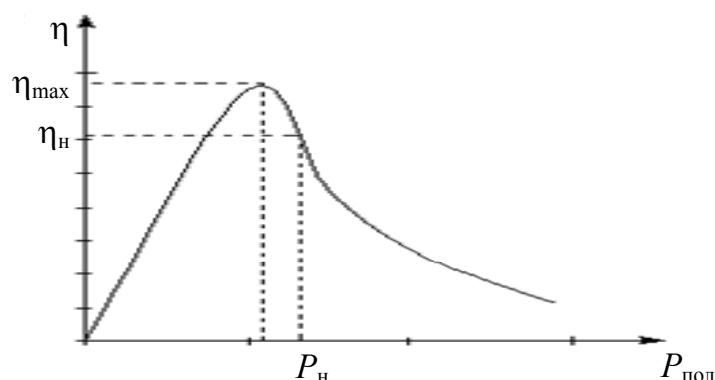


Рис. 2.32. Зависимость коэффициента полезного действия от мощности

Значения КПД, соответствующие рабочему диапазону, находятся в пределах $0 \div P_H$. Не случайно номинальное значение нагрузки (мощности) выбирается при $\eta < \eta_{\text{max}}$. Объясняется это тем, что практически все устройства работают в режимах с переменным во времени уровнем нагрузки. Кроме того, при расчёте электромашин предусматриваются запасы по мощности. Это приводит к тому, что фактическая нагрузка устройств оказывается меньше номинальной, а значение КПД выше.

Указанное соотношение между максимальным и номинальным значениями КПД способствует повышению КПД цикла, так как мгновенные значения сосредотачиваются около максимума. Учитывая, что реально нагрузка асинхронных двигателей составляет $(0,6-0,7)P_H$, разработчики массовой серии двигателей 4А наибольший расчетный КПД расположили именно около этих значений. Зависимость номинального КПД

асинхронных двигателей от номинальной мощности показана на рис. 2.33 (1 – АД серии А2; 2 – АД серии А4 ($\omega_0 = 157$ и 107 с^{-1}); 3 – АД серии А4 ($\omega_0 = 314 \text{ с}^{-1}$)).

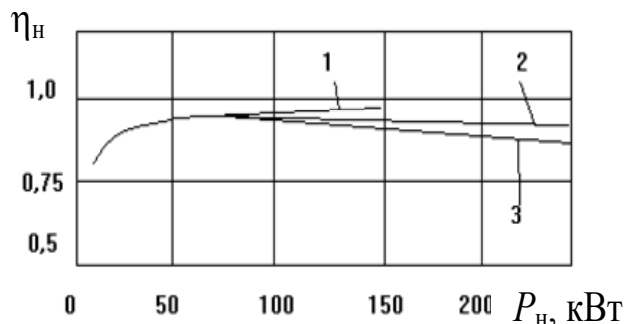


Рис. 2.33. Зависимость номинального КПД асинхронных двигателей от номинальной мощности

Если привод постоянно работает с постоянной нагрузкой, то выгоднее, чтобы при этом КПД было максимальным. В этом случае целесообразно специально проектировать элементы силовой цепи с малыми удельными потерями (меньшими плотностями токов, индукций, коэффициентами трения в механической части), с применением более высококачественных материалов. Дополнительные затраты на материалы окупятся меньшими потерями энергии и в итоге – меньшими суммарными затратами.

Наибольшее значение КПД двигателей находится в области номинальной нагрузки. Поэтому для уменьшения потерь мощности необходимо обеспечить полную нагрузку и ограничить их холостой ход. При наличии малозагруженных двигателей целесообразно произвести их замену на двигатели меньшей мощности.

2.4.3. Коэффициент мощности электропривода

Электропривод переменного тока потребляет из сети активную P и реактивную Q мощности. Активная мощность расходуется на осуществление электроприводом полезной работы и покрытия потерь в нем, а реактивная мощность обеспечивает создание электромагнитных полей двигателя и непосредственно полезной работы не производит.

Коэффициент мощности электропривода

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}},$$

где S – полная потребляемая мощность.

Угол φ определяет сдвиг фаз между напряжением сети и током электропривода. Электропривод, потребляя реактивную мощность, дополнительно нагружает систему электроснабжения, вызывая дополнительные потери напряжения и энергии в ее элементах.

Если электропривод работает в каком-то цикле при различных нагрузках или скоростях, то он как потребитель электрической энергии характеризуется средневзвешенным (или цикловым) коэффициентом мощности, который определяется отношением потребленной активной энергии за цикл W_a к полной W :

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{W} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}.$$

Активная и реактивная мощности АД определяются:

$$P = M \omega_0 + 3I_1^2 r_1;$$

$$Q = 3I_\mu^2 x_\mu + 3I_1^2 x_1 + 3(I'_2)^2 x'_2.$$

Для большинства АД $\cos \varphi_n \approx 0,8 \div 0,9$. Для этих значений $Q = (0,5 \div 0,75)P$, т.е. АД на каждый киловатт активной мощности потребляет из сети 0,5–0,75 квар реактивной мощности. Чем ниже $\cos \varphi$, тем большую реактивную мощность потребляет АД из сети, загружая её дополнительным током и вызывая в ней дополнительные потери.

Коэффициент мощности АД существенно зависит от его нагрузки. При холостом ходе АД коэффициент невелик, т.к. относительно велика доля реактивной мощности по сравнению с активной. По мере увеличения нагрузки АД возрастает и $\cos \varphi$, достигая своего максимального значения примерно в области номинальной нагрузки. Зависимость $\cos \varphi$ от кратности механической нагрузки для АД серии 4А при различных уровнях номинальных $\cos \varphi_n$ представлена на рис. 2.34 (1 – $\cos \varphi = 0,9$; 2 – $\cos \varphi = 0,8$; 3 – $\cos \varphi = 0,7$).

Асинхронные двигатели являются основными потребителями реактивной мощности в системе электроснабжения.

Для снижения потребления АД реактивной мощности и тем самым повышения коэффициента мощности необходимо выполнить следующее:

- заменить малозагруженный АД двигателем меньшей мощности. При замене АД меньшей мощности будет работать в области больших

нагрузок с более высоким $\cos\varphi$. Кроме того, КПД полностью загруженного двигателя будет высоким;

- понизить напряжение у АД, работающего с малой нагрузкой. При этом уменьшаются потребляемый из сети ток и реактивная мощность и повышается $\cos\varphi$. Реализуется это с помощью регулятора напряжения или переключением обмотки статора со схемы треугольника на звезду, что приводит к снижению напряжения на обмотке каждой фазы в $\sqrt{3}$ раз;

- сократить время холостого хода АД;
- заменить АД на СД;
- использовать компенсирующие устройства в виде конденсаторов.

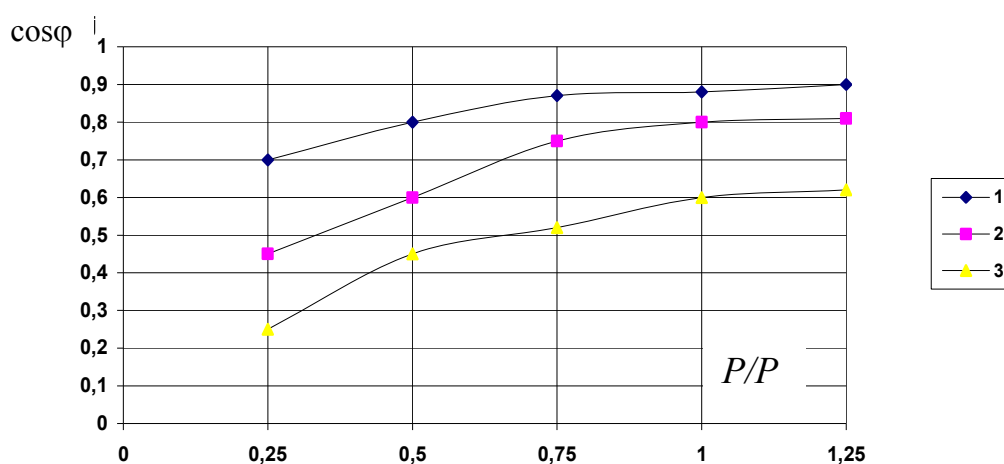


Рис. 2.34. Зависимость $\cos\varphi$ от кратности механической нагрузки для АД серии 4А при различных уровнях номинальных $\cos\varphi_n$

2.5. Энергетические характеристики регулируемых электроприводов в статическом режиме

2.5.1. Регулируемый электропривод с двигателем постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения

При определении энергетических показателей регулируемых приводов необходимо учитывать следующее:

- изменение скорости двигателя вызывает изменение постоянных потерь в двигателе. Особенно существенно постоянные потери изменяются при регулировании тока возбуждения ДПТ;
- наличие силового преобразователя вызывает дополнительные потери мощности в преобразователе и двигателе;

- преобразователь является потребителем реактивной мощности и вносит искажения в синусоидальную форму кривых напряжения и тока.

По критерию потерь мощности способы регулирования скорости могут быть экономичные (характеризуются малыми потерями) и неэкономичными. К экономичным относится – регулирование скорости ДПТ с помощью управляемых преобразователей.

Постоянные потери ДПТ

$$K = K_c + K_{\text{MH}} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 + K_B.$$

Переменные потери в якорной цепи

$$V = I^2 r_a = M (\omega_{0p} - \omega),$$

где ω_{0p} – скорость идеального холостого хода при работе двигателя на регулировочной (искусственной) характеристике.

При регулировании скорости реостатным способом переменные потери растут пропорционально относительному перепаду скорости:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega}.$$

Суммарные потери

$$\Delta P = K_c + K_{\text{MH}} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 + K_B + M (\omega_{0p} - \omega).$$

При регулировании скорости с помощью преобразователя необходимо учитывать потери в преобразователе. Постоянные потери $K_{\text{П}}$ определяются потерями в стали силового трансформатора и реакторов. Переменные потери преобразователя определяются потерями в меди обмоток трансформатора, реактора и вентиляей:

$$V_{\text{П}} = 3I_1^2 r_1 + 3I_2^2 r_2 + \Delta P_p + \Delta P_{\text{вн}},$$

где I_1, I_2 – первичный и вторичный токи трансформатора.

При регулировании скорости ДПТ изменением тока возбуждения меняются постоянные потери от тока возбуждения и потери в стали:

$$\Delta P = I_B^2 r_B + K_{\text{CH}} \left(\frac{f}{f_H} \right)^\beta \left(\frac{\Phi}{\Phi_H} \right)^2 + K_{\text{MH}} \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^2 + M (\omega_{0p} - \omega).$$

2.5.2. Регулируемый электропривод с асинхронным двигателем

При реостатном регулировании потери в стали [3]

$$K_c \approx K_{c1H} (1 - s^{1,3}).$$

С уменьшением скорости увеличение потерь в стали компенсируется уменьшением механических потерь, поэтому постоянные потери почти не меняются.

Переменные потери мощности

$$V = V_1 + V_2 = M \omega_0 s + M \omega_0 s \frac{r'_1}{r'_2}.$$

При частотном способе регулирования скорости АД рабочее скольжение двигателя небольшое во всем диапазоне регулирования. Тогда потерями в стали ротора из-за малой частоты можно пренебречь и при законе регулирования $\frac{u}{f_1} = \text{const}$

$$K_c \approx K_{c1H} \left(\frac{f_1}{f_H} \right)^{3,3}.$$

Экспериментальные исследования показали, что при питании АД от преобразователя частоты с несинусоидальной формой напряжения возникают дополнительные потери, влияющие на нагрев, допустимую нагрузку, рабочие характеристики и другие характеристики двигателей. Так, при $f = 50$ Гц потери в стали статора повышаются на 30 %, ток холостого хода на 32 %, КПД снижается на 1,5 %, коэффициент мощности на 0,05, ток в обмотке статора в рабочем режиме увеличивается на 8 %, а скольжение на 3 %. На рис. 2.35 показана рекомендуемая изготовителем предельно допустимая нагрузка двигателя.

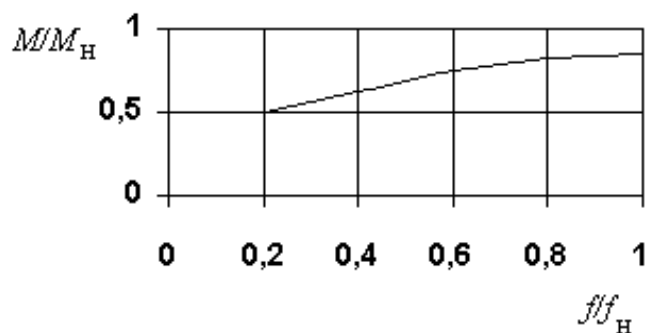


Рис. 2.35 Рекомендуемая изготовителем предельно допустимая нагрузка двигателя

Видно, что в номинальном режиме двигатель развивает мощность на 15 % меньшую, чем при питании от сети с синусоидальной формой напряжения. При частоте 10 Гц развиваемый двигателем момент составляет половину от номинального, а развиваемая им мощность – 10 % от номинальной. КПД составляет лишь 72 % от КПД при $f = 50$ Гц. Происходит также снижение максимального момента на 10–20 % при $f > 25$ Гц.

2.6. Энергетические характеристики механических преобразователей в статических режимах

Потери энергии в механической части электропривода связаны с наличием трения между взаимно перемещающимися элементами передаточных и исполнительных механизмов. Есть два типа трения:

- скольжения;
- качения.

Трение скольжения обусловлено взаимодействием шероховатостей скользящих друг о друга элементов механизмов (рис. 2.36).

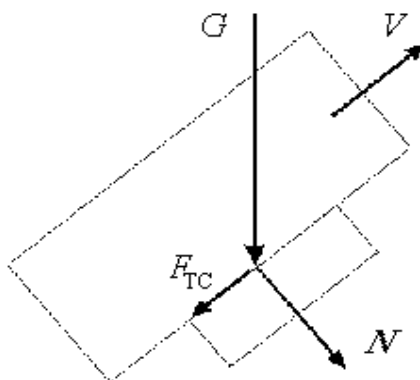


Рис. 2.36. Воздействие силы трения на предмет

Силы трения, возникающие как реакция на взаимное движение, зависят от материалов взаимодействующих деталей и силы нормального давления N , действующей перпендикулярно линии взаимодействия. Трение скольжения характерно для подшипников скольжения, направляющих лифтовых установок и т.д.

Коэффициент трения скольжения

$$\mu = \frac{F_{\text{тр}}}{N},$$

где $F_{\text{тр}}$, N – соответственно силы трения скольжения и нормального давления.

Трение качения возникает при качении круглых тел по поверхностям. При этом возникает сила, касательная к окружности катящегося тела и определяющая момент сопротивления относительно оси вращения (рис. 2.37).

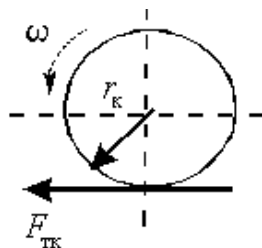


Рис. 2.37

Трение качения возникает в подшипниках качения, в механизмах перемещения на колёсном ходу, шариковых, роликовых опорах. Величина, характеризующая сопротивление при качении, есть момент трения относительно оси вращения катящегося тела. Диаметр катящегося тела (плечо момента трения качения) при данной силе определяет момент – чем больше плечо, тем больше момент. С другой стороны, при большем диаметре меньше крутизна смятия, препятствующего качению. Поэтому момент трения зависит в первом приближении только от материалов взаимодействующих тел и нормального давления их друг на друга.

Коэффициент трения качения

$$f_{\text{тк}} = \frac{M_{\text{тк}}}{N}, \text{ м},$$

где $M_{\text{тк}}$ – момент трения качения ($M_{\text{тк}} = F_{\text{тк}} r_{\text{тк}}$).

Указанные силы, вызванные трением, определяют потери энергии при взаимном перемещении соприкасающихся деталей механизма, при этом потери мощности зависят и от относительной скорости взаимного перемещения:

$$\Delta P = F_{\text{тк}} V';$$

$$\Delta P = M_{\text{тк}} \omega',$$

где V' , ω' – относительные линейная и угловая скорости трущихся поверхностей.

В любом механизме, даже при отсутствии передачи или преобразования энергии, действуют внутренние силы (силы тяжести, силы конструктивных сопряжений деталей и т.д.), поэтому трение и потери энергии возникают и при холостом движении механизмов. При передаче

и преобразовании энергии нормальные усилия возрастают и, следовательно, увеличиваются соответствующие силы и моменты трения, потери. Поэтому момент трения можно представить линейной зависимостью от полезных моментов:

$$M_{\text{тр}} = M_x + bM_{\text{пол}},$$

где M_x – момент, обусловленный силами трения при холостом ходе; b – коэффициент пропорциональности, определяющий увеличение потерь на трение при полезной нагрузке для данного механизма.

При расчете потерь в механической части электропривода пользуются не значениями сил трения и моментов в отдельных элементах механизма, а интегральной оценкой соотношения между полезными моментами и соответствующими им потерями на трение:

$$\eta = \frac{M_{\text{пол}}}{M_{\text{пол}} + M_{\text{тр}}}.$$

Для данного класса механизмов конструкторы-механики задают зависимость КПД от нагрузки, с помощью которой определяются значения M_0 и b . Номинальные значения КПД некоторых механических передач представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

КПД типов передач

Вид передачи	Тип передачи		КПД
Зубчатые колёса на подшипниках качения	закрытая с жидкой смазкой	цилиндрическая	0,97–0,99
		коническая	0,96–0,98
	открытая с консистентной смазкой	цилиндрическая	0,95–0,97
		коническая	0,94–0,95

2.7. Потери электроэнергии в переходных процессах электропривода и способы их снижения

В переходных режимах протекающие по обмоткам двигателя токи существенно превышают номинальные значения и вызывают повышенные потери энергии, т.е. дополнительный нагрев двигателя. Особенно важно определение потерь электроэнергии в переходных процессах для электроприводов, у которых динамический режим является основным или занимает заметное время в течение цикла (электропривода прокатных станов, подъёмных кранов, шахтных подъёмных машин).

Потери энергии за время переходного процесса

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пр}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пр}}} (K + V) dt = \int_0^{t_{\text{пр}}} K dt + \int_0^{t_{\text{пр}}} V dt = \Delta W_K + \Delta W_V,$$

где ΔW_K и ΔW_V – потери энергии, обусловленные соответственно постоянными и переменными потерями мощности.

Обычно принимают, что постоянные потери мощности не меняются за время переходного процесса:

$$\Delta W_K = \int_0^{t_{\text{пр}}} K dt = K t_{\text{пр}}.$$

Точное вычисление интеграла переменных потерь во многих случаях оказывается затруднительным из-за того, что необходимо знать закон изменения токов двигателя в переходном процессе $i(t)$ и располагать данными об изменении R . Более удобно выразить потери электроэнергии в переходных процессах, если переменные потери мощности представить через механические величины.

Мощность переменных потерь в ДПТ

$$\Delta P = I^2 r_{\text{я}} = M(\omega_0 - \omega) = M \omega_0 s \quad (\Delta P = P_c - P = P_c s),$$

где $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ – относительный перепад скорости.

С учетом уравнения движения электропривода

$$\Delta P = M \omega_0 s = \left(M_c + J \frac{d\omega}{dt} \right) \omega_0 s = M_c \omega_0 s + J \omega_0 s \frac{d\omega}{dt}.$$

Потери энергии

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пр}}} \Delta P dt = \int_0^{t_{\text{пр}}} M_c \omega_0 s dt + \int_0^{t_{\text{пр}}} J \omega_0 s d\omega.$$

Принимаем $M_c = 0$. Заменяем $d\omega$ на ds :

$$\omega = \omega_0 (1 - s);$$

$$d\omega = -\omega_0 ds;$$

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пр}}} -J \omega_0^2 s ds.$$

Изменим предел интегрирования. Моменту времени $t = 0$ будет соответствовать $s = s_{\text{нач}}$, а времени $t_{\text{пр}}$ – соответствовать $s = s_{\text{кон}}$.

$$\Delta W = \int_{s_{\text{нач}}}^{s_{\text{кон}}} -J\omega_0^2 s ds = \int_{s_{\text{кон}}}^{s_{\text{нач}}} J\omega_0^2 s ds = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2).$$

Определим потери энергии при пуске, реверсе и торможении двигателей.

При пуске двигателей вхолостую $\omega_{\text{нач}} = 0$, $\omega_{\text{кон}} = \omega_0$. Тогда $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} = 0$ (рис. 2.38):

$$\Delta W_{\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

Потери энергии при пуске равны запасу кинетической энергии, которая будет запасена к концу пуска в движущихся частях электропривода.

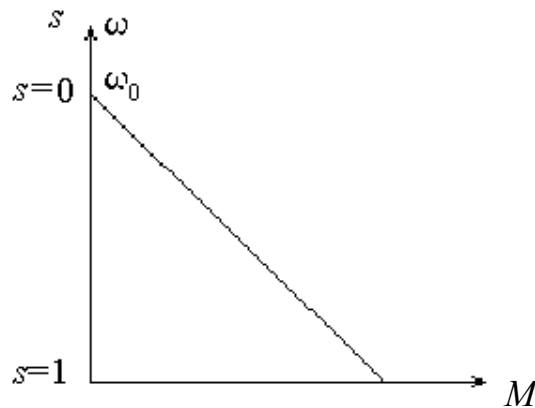


Рис. 2.38. Зависимость относительного перепада скорости от момента при пуске вхолостую

Для динамического торможения $s_{\text{нач}} = 0$, $s_{\text{кон}} = 1$ (рис. 2.39):

$$\Delta W_{\text{дт}} = -J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

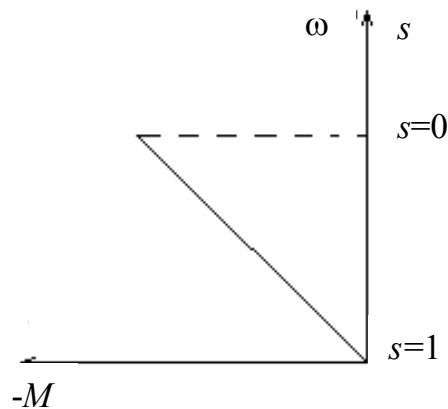


Рис. 2.39. Зависимость относительного перепада скорости от момента при динамическом торможении

При динамическом торможении весь запас кинетической энергии превращается в потери энергии, выделяемые в двигателе в виде тепла.

Для режима противовключения $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$ и $\omega_{\text{кон}} = 0$. Тогда $s_{\text{нач}} = 2$, $s_{\text{кон}} = 1$ (рис. 2.40):

$$\Delta W_{\text{пв}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (4 - 1) = 3J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

При противовключении потери энергии равны тройному запасу кинетической энергии электропривода.

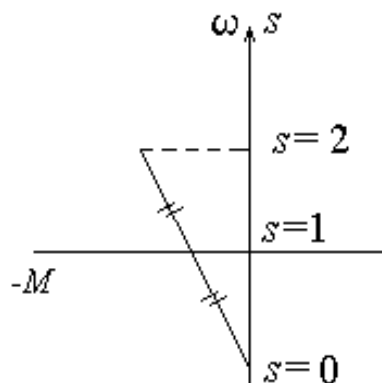


Рис. 2.40. Зависимость относительного перепада скорости от момента для режима противовключения

Для режима реверса $\omega_{\text{нач}} = \omega_0$, $\omega_{\text{кон}} = -\omega_0$. Тогда $s_{\text{нач}} = 2$, $s_{\text{кон}} = 0$ и потери энергии составят (рис. 2.41):

$$\Delta W_{\text{р}} = 4J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

Потери энергии равны сумме потерь при торможении противовключением и пуске.

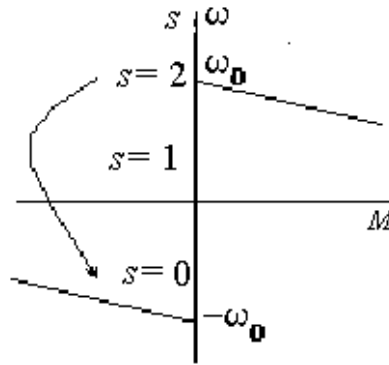


Рис. 2.41. Зависимость относительного перепада скорости от момента для режима реверса

Потери энергии в роторе АД выражаются также, как и для цепи якоря ДПТ независимого возбуждения. Потери энергии в меди статора АД выразим через потери мощности:

$$V_1 = 3I_1^2 r_1 \approx 3(I_2')^2 r_1 = 3(I_2')^2 r_2' \frac{r_1}{r_2'} = V_2 \frac{r_1}{r_2'}$$

Полные потери энергии в АД

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'} \right)$$

Потери в роторе АД не зависят от его сопротивления, в то время как потери в статоре АД обратно пропорциональны сопротивлению ротора.

Для определения потерь энергии при работе двигателя под нагрузкой необходимо вычислить выражение

$$\Delta W = \int_0^{t_{\text{пп}}} M_c (\omega_0 - \omega) dt + J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2)$$

В общем виде решение затруднено, т.к. момент нагрузки и скорость могут быть нелинейными функциями времени. Для упрощения примем $M_c = \text{const}$, тогда

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) + M_c \omega_0 t_{\text{пп}} - M_c \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt$$

Для определения потерь необходимо знать аналитическое выражение изменения скорости во времени. Если выражение $\omega(t)$ сложное, то для определения интеграла используется графоаналитический метод (рис. 2.42).

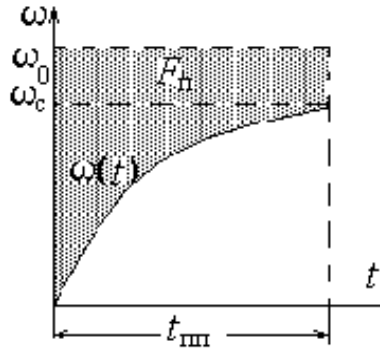


Рис. 2.42. Графоаналитический метод

Интеграл $\int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt$ представляет собой площадь, ограниченную кривой $\omega(t)$, осью времени и вертикальной линией $t = t_{\text{пп}}$. Заштрихованная на рисунке площадь

$$F_{\text{п}} = \omega_0 t_{\text{пп}} - \int_0^{t_{\text{пп}}} \omega dt .$$

Тогда потери запишем в виде

$$\Delta W = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) + M_{\text{с}} F_{\text{п}} .$$

Таким образом, для нахождения потерь энергии в якоре ДПТ и роторе АД при $M_{\text{с}} = \text{const}$ следует определить потери энергии при $M_{\text{с}} = 0$, выполнить построение зависимости $\omega(t)$ и, найдя площадь $F_{\text{п}}$, определить вторую составляющую потерь.

Для определения потерь в статоре АД найденные потери в роторе умножаются на отношение сопротивлений цепей статора и ротора:

$$\Delta W_1 = \Delta W_2 \frac{r_1}{r_2'} ,$$

после чего определяются суммарные потери АД

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 .$$

Анализ полученных соотношений определяет два основных способа снижения потерь электроэнергии в переходных процессах:

- уменьшение момента инерции электропривода;
- регулирование скорости идеального холостого хода в переходных процессах.

Уменьшить момент инерции привода можно следующими способами:

- применением малоинерционных электродвигателей, имеющих пониженный момент инерции якоря или ротора (увеличена длина якоря и уменьшен диаметр);
- рациональным конструированием механической передачи (выбором оптимального передаточного числа редуктора, рациональных размеров и форм элементов механической передачи и конструкционных материалов);
- заменой одного двигателя двумя, имеющими половинную мощность заменяемого двигателя (суммарный момент инерции меньше момента инерции одного двигателя на полную мощность). Например, два двигателя типа 4АН200 мощностью по 45 кВт имеют суммарный момент инерции $2 \times 1,38 = 2,76 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Двигатель 4АН250 мощностью 90 кВт на ту же скорость имеет момент инерции $3,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, что почти на 30 % больше.

Наиболее эффективным средством снижения потерь является реализация управляемых переходных процессов. Рассмотрим самый простой способ управления пуском, когда скорость идеального холостого хода задается в два этапа. Такой пуск возможен при использовании двухскоростного АД (рис. 2.43).

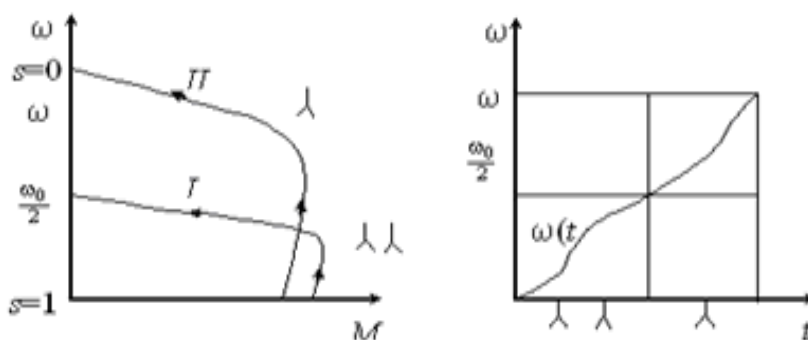


Рис. 2.43. Характеристики при пуске двухскоростного АД

Потери энергии в роторе АД при прямом пуске на характеристику II, с учетом $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} = 0$:

$$\Delta W_{\text{п}} = J \frac{\omega_0^2}{2} (s_{\text{нач}}^2 - s_{\text{кон}}^2) = J \frac{\omega_0^2}{2}.$$

Потери энергии при ступенчатом пуске при разгоне по характеристике I (первая ступень пуска), с учетом $s_{\text{нач}} = 1$, $s_{\text{кон}} = 0$, $\omega'_0 = \frac{\omega_0}{2}$:

$$\Delta W_I = J \left(\frac{\omega_0}{2} \right)^2 \frac{1}{2} = J \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Потери энергии при разгоне по характеристике II (вторая ступень пуска), с учетом $s_{\text{нач}} = 0,5$, $s_{\text{кон}} = 0$:

$$\Delta W_{II} = J \frac{\omega_0^2}{2} (0,5)^2 = J \frac{\omega_0^2}{8}.$$

Суммарные потери при двухступенчатом пуске

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W_I + \Delta W_{II} = J \frac{\omega_0^2}{4}.$$

Потери сократились вдвое по сравнению с пуском в одну ступень. Отметим, что снижение потерь энергии в роторе вызывает снижение потерь в статоре АД. Если скорость идеального холостого хода в переходном процессе имеет n ступеней регулирования, потери энергии в роторе уменьшаются в n раз:

$$\Delta W_n = J \frac{\omega_0^2}{2n},$$

где ω_0 – максимальная скорость идеального холостого хода, соответствующая последней ступени.

При плавном задании скорости идеального холостого хода потери снижаются в $2t_M/t_{\text{пп}}$ раз. Чем медленнее разгон, тем меньше момент, потери мощности, суммарные потери за время пуска. Однако это справедливо при отсутствии потерь, связанных с наличием статической нагрузки, которые увеличиваются с ростом времени пуска.

3. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ И ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

3.1. Расчет мощности и выбор электродвигателей

Главным требованием при выборе электродвигателя является соответствие его мощности условиям технологического процесса рабочей машины.

Применение двигателя недостаточной мощности приводит к нарушению технологического режима работы установки, снижению производительности, повышению нагрева, ускорения старения изоляции и выхода двигателя из строя.

Недопустимым является также использование двигателя завышенной мощности, т.к. при этом повышается стоимость привода, увеличиваются потери электроэнергии за счет снижения КПД двигателя, а для асинхронного электропривода, кроме того, снижается коэффициент мощности.

Коэффициент загрузки двигателя рассчитывается по формуле

$$k_3 = \frac{P_{\phi}}{P_{н}} \approx \frac{P_{с}}{P_{нс}},$$

где P_{ϕ} – фактическая мощность, развиваемая приводом; $P_{с}$ – мощность, потребляемая из сети, определяется по показаниям приборов за период времени как мощность, потребляемая двигателем из сети при данной нагрузке. Тогда за номинальную мощность берут мощность, потребляемую двигателем из сети при номинальной нагрузке

$$P_{нс} = \frac{P_{н}}{\eta},$$

где η – КПД системы электропривода.

Нормативные документы Министерства угольной промышленности России рекомендуют [5,22]:

- при $0 \leq k_3 < (0,4 \div 0,5)$ – необходима установка двигателя меньшей мощности;
- при $(0,4 \div 0,5) \leq k_3 < (0,7 \div 0,75)$ – целесообразность снижения установленной мощности привода должна быть подтверждена расчетами;
- при $(0,7 \div 0,75) \leq k_3 \leq 0,9$ – мощность привода выбрана верно.

Ограничение максимального значения k_3 величиной 0,9 позволяет предотвратить возможную перегрузку двигателя в случае падения напряжения питающей сети.

На рис. 3.1 представлена усредненная зависимость КПД от коэффициента загрузки, которая показывает, насколько нежелательна работа привода с малым коэффициентом загрузки.

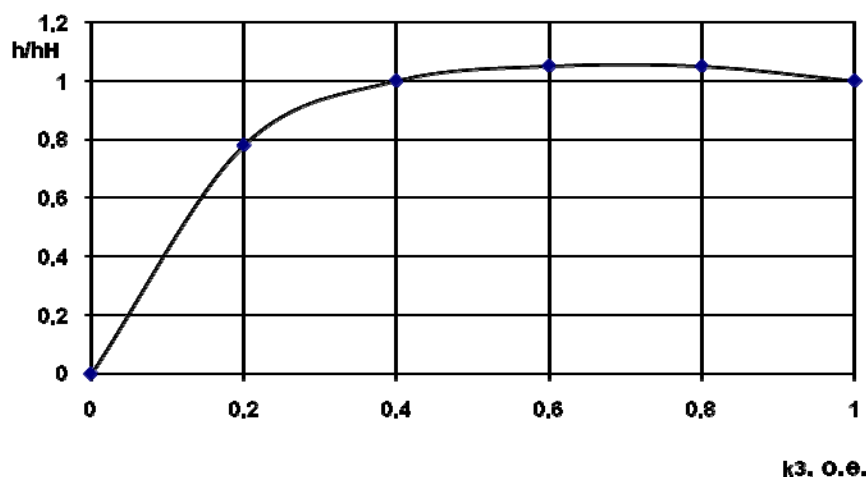


Рис. 3.1. Усредненная зависимость КПД от коэффициента загрузки

Для более точного определения КПД в зависимости от величины коэффициента загрузки существует несколько эмпирических выражений:

$$\eta = \frac{k_3 \eta_n}{0,6(1 - \eta_n) + 0,6k_3 \eta_n + 0,4k_3},$$

или

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{a}{k_3} + b},$$

где $a = 0,6 \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$; $b = 0,4 \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$ – для механизмов со сложными кинематическими схемами;

$a = b = 0,5 \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$ – для приводов конвейеров и других механизмов с простыми кинематическими схемами.

Значение экономии электроэнергии, получаемое в результате повышения загрузки машин, можно определить из рис. 3.2.

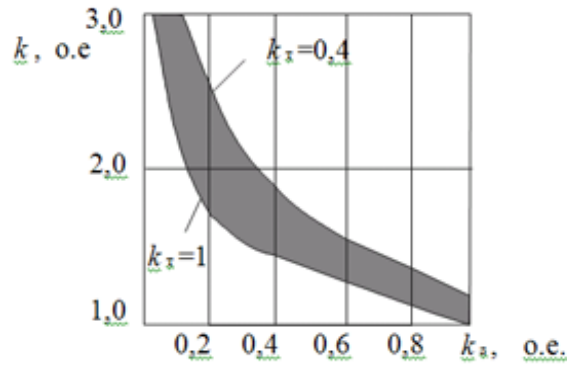


Рис. 3.2. Количество сэкономленной электроэнергии

Здесь k_W – коэффициент увеличения удельного расхода электрической энергии

$$k_W = \frac{W_y}{W_{y0}},$$

где W_y – фактическое значение удельного расхода электроэнергии за фиксированный промежуток времени, кВт·ч/(час, сутки и т.д.); W_{y0} – удельный расход энергии при отсутствии холостого хода и загрузке $k_3 = 1$ кВт·ч/(час, сутки и т.д.).

Коэффициент использования рабочей машины

$$k_T = \frac{t_H}{t_H + t_X},$$

где t_H – время работы под нагрузкой, ч; t_X – время холостой работы, ч.

Выбор электродвигателей производится с учетом следующих показателей:

- род тока. Двигатель должен иметь род и величину напряжения, соответствующие сетям переменного или постоянного тока данного предприятия;
- значение скорости. Выбор номинальной скорости двигателя при уже имеющемся редукторе производится по заданной скорости исполнительного органа и передаточному числу редуктора;
- конструктивное исполнение. Конструкция выбранного двигателя должна соответствовать условиям его компоновки с исполнительным органом;
- способ вентиляции и защиты от действия окружающей среды.

По способам защиты от действия окружающей среды различают открытые, защищенные и герметичные двигатели. По способу вентиля-

ции различают двигатели с естественной вентиляцией, самовентиляцией и принудительной вентиляцией.

Выбор двигателя производится в следующей последовательности:

- расчет мощности и предварительный выбор двигателя;
- проверка выбранного двигателя по условиям пуска и перегрузки;
- проверка выбранного двигателя по нагреву.

Основой для расчета мощности и выбора двигателя являются нагрузочные диаграммы исполнительного органа рабочей машины, куда входят:

- диаграмма скорости (тахограмма) $V(t)$ или $\omega(t)$;
- зависимость ускорения во времени $a(t)$ или $\varepsilon(t)$;
- нагрузочная диаграмма исполнительного органа (зависимость приведенного к валу двигателя статического момента от времени $M_c(t)$);
- зависимость момента (тока) и мощности во времени $M(t)$, $I(t)$, $P(t)$.

Нагрузочные диаграммы связывают режим работы двигателя с технологическим процессом. Их можно разделить на две группы:

- диаграммы, у которых статический момент меняется случайным образом по неизвестному закону;
- диаграммы, у которых статический момент меняется по известному закону.

В первом случае экспериментально снимается зависимость тока двигателя во времени, которая далее разбивается на ряд участков. Для каждого участка по среднему значению тока из статических характеристик определяются величины скорости и момента. Ускорение определяется как тангенс угла наклона кривой скорости к оси времени.

Для второго случая, исходя из предположения, что никаких преобразований не осуществляется на механической, гидравлической, пневматической и т.д. стороне привода, механические характеристики могут быть разделены на следующие четыре основные категории.

Момент постоянный, т.е. не зависит от скорости (рис. 3.3). Типичный пример – это подъёмный кран. Принятый неизменным вес поднятого груза создаёт силу и, таким образом, момент двигателя. Возможны незначительные отклонения, обусловленные изменениями в трении при изменениях скорости. В этом случае мощность на валу, являющаяся произведением момента и скорости, линейно зависит от скорости.

В некоторых случаях, например, при перемешивании веществ с низкой частотой вращения, момент пропорционален частоте вращения (рис. 3.4). Мощность, будучи произведением момента и скорости, пропорциональна второй степени (квадрату) скорости. Таким образом, при скорости, равной половине номинальной, требуемый момент равен так-

же половине номинального, а мощность – четверти номинального значения.

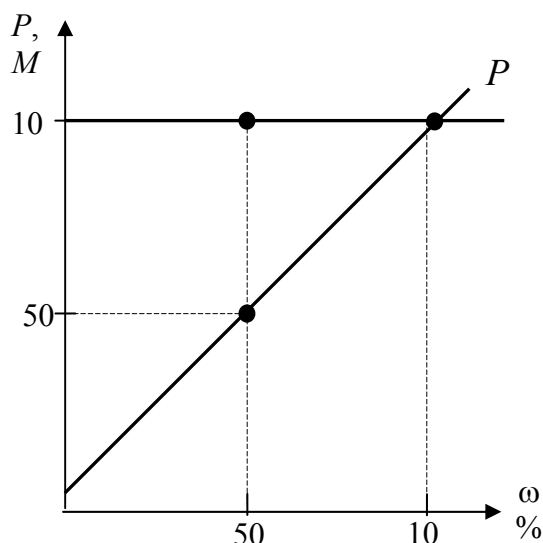


Рис. 3.3. Для подъёмного крана

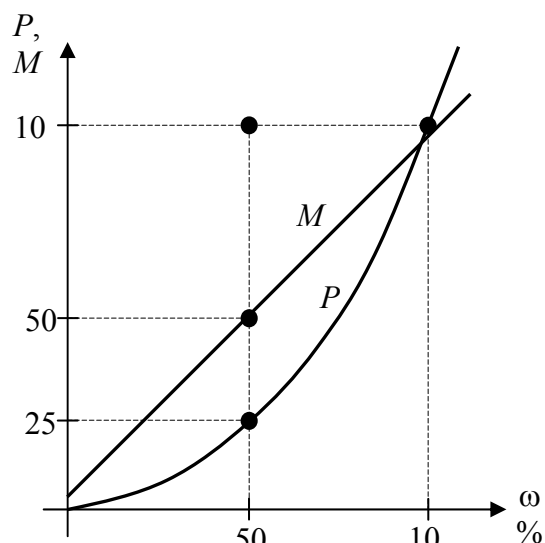


Рис. 3.4. Для смесителей

Для передвижения жидкостей и газов требуется давление, пропорциональное квадрату скорости (т.е. перемещаемому объёму). Так как центробежный насос перемещает объём, пропорциональный скорости, то давление и момент двигателя будут пропорциональны квадрату скорости (рис. 3.5). Следовательно, мощность будет пропорциональна третьей степени скорости. В этом случае, при уменьшении потока вдвое, требуется только 12,5 процентов мощности, потребляемой при полном потоке.

Есть некоторые очень вязкие вещества (например, хлебное тесто), которые становятся менее вязкими при увеличении скорости перемешивания. Эти типы нагрузок имеют характеристики момента и мощности, как показано на рис. 3.6. В этих случаях момент при пуске (скорость равна 0) может быть значительно выше, если, например, вещество стало более вязким после продолжительного простоя. Этот тип нагрузки может иметь интересное свойство: максимальная мощность может потребляться при скорости, меньшей, чем номинальная.

На рис. 3.7 приведены типовые нагрузочные диаграммы электропривода подъема. Число периодов (участков) у таких диаграмм может быть от трех до семи.

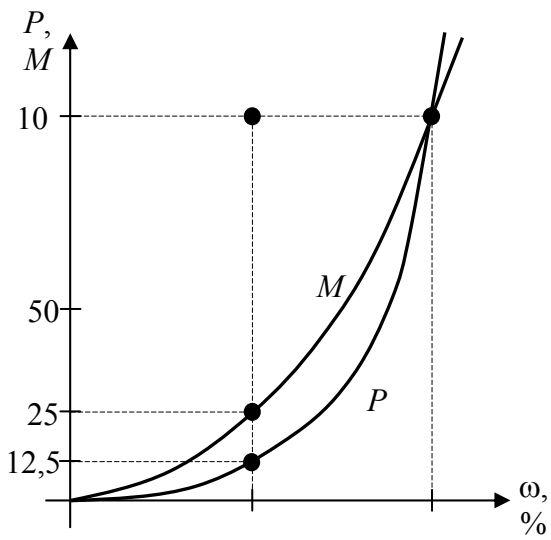


Рис. 3.5. Для центробежного насоса

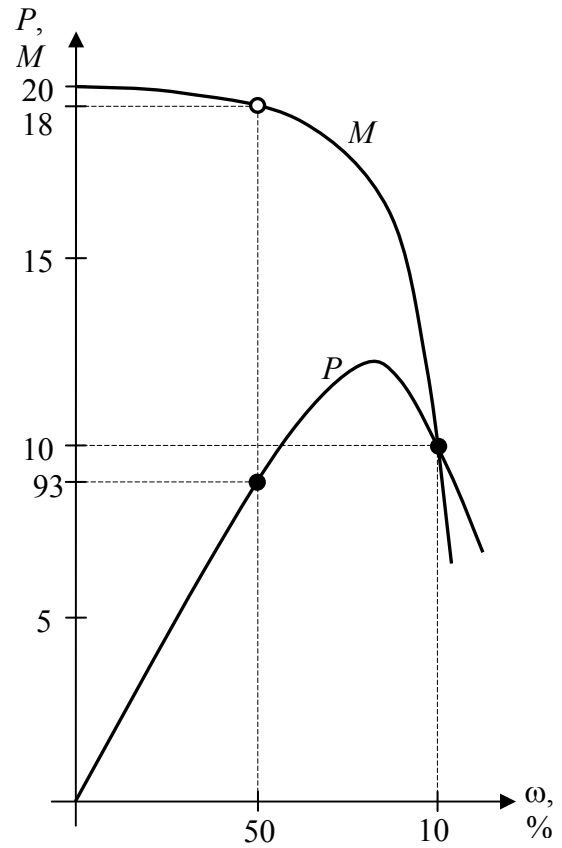


Рис. 3.6. При вязкой нагрузке (тесто)

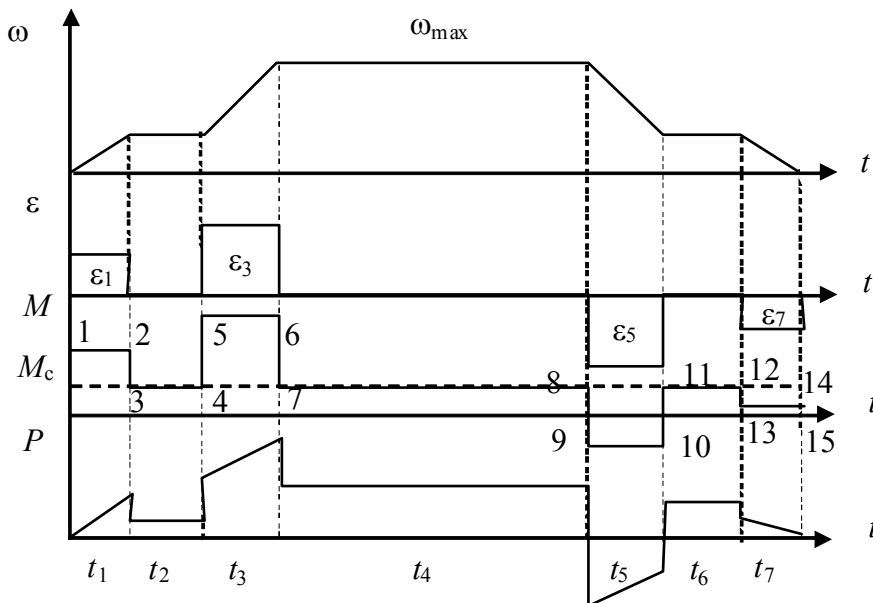


Рис. 3.7. Нагрузочные диаграммы электропривода подъёма

В зависимости от величины и знака тормозного момента (участок t_5) возможны три режима торможения:

- $M_{9-10} > 0$, в двигательном режиме;
- $M_{9-10} \approx 0$, свободным выбегом;
- $M_{9-10} < 0$, электрическое с отрицательным моментом (динамическое торможение).

Моменты сопротивления некоторых машин и механизмов определяются по следующим формулам.

Механизмы подъема лебедки

$$M_c = \frac{FR}{i_p \eta_p},$$

где F – сила тяжести поднимаемого груза, Н; R – радиус барабана лебедки, м; i_p , η_p – передаточное число и КПД редуктора.

Механизмы передвижения подъемных кранов

$$M_c = \frac{k_1 F(\mu R + f)}{i_p \eta_p},$$

где F – сила тяжести перемещаемой массы, Н; $f = (5 \div 12) \cdot 10^{-4}$ – коэффициент трения качения ходовых колес по рельсам, м; $k_1 = 1,8 \div 2,5$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления движению из-за трения реборд ходовых колес о рельсы; $\mu = 0,015 \div 0,15$ – коэффициент трения в опорах ходовых колес; R – радиус шейки оси ходового колеса, м.

Вентиляторы

$$M_c = \frac{kQH}{\eta_b \omega_b},$$

где Q – производительность вентилятора, м³/с; H – напор (давление) газа, Па; $\eta_b = (0,4 \div 0,85)$ – КПД вентилятора; ω_b – частота вращения рабочего колеса вентилятора, с⁻¹; $k = 1,1 \div 1,5$ – коэффициент запаса.

Насосы

$$M_c = \frac{k_3 g \rho Q (H + \Delta H)}{\eta_{nc} \omega_{nc}},$$

где Q – производительность насоса, м³/с; H – статический напор, м; ΔH – потери напора в трубопроводе, м; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; $k = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса; $\eta_{nc} = 0,45 \div 0,75$ – КПД насоса; ω_{nc} – частота вращения насоса, с⁻¹.

По нагрузочной диаграмме находим:

- в случае небольших изменений статического момента среднее его значение

$$M_{c \text{ ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ci} t_i}{\sum_{i=1}^n t_i};$$

- в случае значительного изменения статического момента эквивалентное его значение

$$M_{c \text{ экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i}{\sum_{i=1}^n t_i}}.$$

Далее определяется расчетная мощность привода с учетом максимальной скорости:

$$P_p = M_c \omega_{\max} k \cdot 10^{-3}, \text{ кВт},$$

где $k = 1,1 \div 1,3$ – коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы работы двигателя.

С учетом падения напряжения питающей сети установленную мощность привода определяют по формулам:

- для двигательного режима

$$P_y = \frac{P_p}{\delta \eta k};$$

- для тормозного режима

$$P_y = \frac{P_p \eta}{\delta \eta k},$$

где δ – коэффициент запаса по установленной мощности привода, необходимый для учета падения напряжения питающей сети:

$$\delta = \left(1 - \frac{\Delta U}{U_H}\right)^2 \text{ – для приводов переменного тока; } \delta = \left(1 - \frac{\Delta U}{U_H}\right) \text{ – для}$$

приводов постоянного тока; ΔU – максимальное длительное падение напряжения питающей сети в процессе эксплуатации; k – коэффициент запаса по установленной мощности многодвигательного привода ($k = 1$ для однодвигательного).

Из каталога выбирается двигатель по условиям

$$P_n \geq P_p, \quad \omega_n \approx \omega_{\max}, \quad U_n = U_{\text{сети}}.$$

Далее строится зависимость момента двигателя от времени по уравнению механического движения:

$$M_i = M_{ci} \pm J\varepsilon_i,$$

где J – приведенный момент инерции привода, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Для проверки выбранного двигателя по перегрузочной способности сопоставляется максимальный момент двигателя из паспортных данных M_{\max} с максимальным моментом, взятым из зависимости $M(t)$. Например, $M_{\max} \geq M_{5-6}$ (рис. 3.7).

Если соотношение не выполняется, то двигатель не обеспечит требуемое ускорение на участке основного разгона.

Для двигателя постоянного тока обычно пользуются моментом, пропорциональным допустимому току, который определяется из условий коммутации коллектора:

$$M_{\max} = M_{\text{доп}} = (2 \div 2,5) M_n.$$

Для асинхронного двигателя с фазным ротором максимальный момент принимают равным критическому:

$$M_{\max} = M_{\text{кр}} = (1,8 \div 2,2) M_n = \frac{mU^2}{2\omega_0 x_k},$$

где m – число фаз; x_k – сопротивление короткого замыкания двигателя.

Для синхронного двигателя

$$M_{\max} = \frac{mUE}{\omega_0 x_c} = (2 \div 3) M_n,$$

где E – ЭДС синхронного двигателя; x_c – синхронное сопротивление двигателя.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором должен быть проверен по условиям пуска, для чего сопоставляется его пусковой момент $M_{\text{п}}$ с моментом нагрузки M_{c0} при $\omega = 0$:

$$M_{\text{п}} \geq M_{c0}.$$

Если выбранный двигатель удовлетворяет рассмотренным условиям, то далее осуществляется его проверка по нагреву.

3.2. Проверка двигателей по нагреву прямым методом

Электрический двигатель при работе может нагреваться лишь до определённой, допустимой температуры, определяемой нагревостойкостью изоляционных материалов. Соблюдение установленной изготовителем допустимой температуры нагрева обеспечивает нормативный срок службы двигателя 15–20 лет. Превышение допустимой температуры ведёт к преждевременному разрушению изоляции обмоток и сокращению срока службы. Так, для изоляции класса *A* превышение температуры нагрева на $8 \div 10$ °С сокращает срок службы вдвое.

В современных двигателях применяются следующие классы изоляции (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Классы изоляции

Класс изоляции	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>	<i>C</i>
Предельно допустимая температура, °С	105	120	130	155	180	>180

Основными классами являются *B*, *F*, *H*.

Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с той, которую он имеет при работе. Очевидно, что если рабочая температура двигателя не превышает допустимую, то двигатель работает в допустимом тепловом режиме, и наоборот. Обычно оценивается не абсолютная температура, а перегрев, или превышение температуры τ , которое представляет собой разность температур двигателя θ_d и окружающей среды θ_c :

$$\tau = \theta_d - \theta_c.$$

При выполнении тепловых расчетов принимается стандартная температура окружающей среды, равная 40 °С.

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

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

где τ_{\max} – максимальный перегрев при работе двигателя; $\tau_{\text{доп}}$ – допустимый перегрев двигателя, определяемый классом изоляции.

Проверка этого условия может быть выполнена прямым методом, предусматривающим построение кривой нагрева $\tau(t)$ за цикл работы двигателя.

В связи с невозможностью проведения точного изучения теплового режима работы обычно принимают следующие допущения:

- двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках;
- теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна разности температур двигателя и окружающей среды;
- окружающая среда обладает бесконечно большой теплоёмкостью, т.е. в процессе нагрева двигателя её температура не меняется;
- теплоёмкость двигателя и его теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

Составим уравнение теплового баланса:

$$\Delta P dt = A \tau dt + C dt,$$

где ΔP – потери мощности в двигателе, или количество тепла, выделяемое в двигателе за 1 с; $\Delta P dt$ – количество теплоты, выделяемое в двигателе за время dt ; $A \tau dt$ – количество теплоты, отдаваемое в окружающую среду; $C dt$ – количество теплоты, поглощаемое двигателем; A – теплоотдача двигателя – количество теплоты, отдаваемое двигателем в окружающую среду за 1 с при разности температур двигателя и окружающей среды в 1 °С, Дж/(с·град); C – теплоёмкость двигателя – количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С, Дж/град.

Разделим обе части уравнения на $A dt$

$$T_{\text{H}} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \tau_{\text{уст}},$$

где $T_{\text{H}} = \frac{C}{A}$ – постоянная времени нагрева двигателя; $\tau_{\text{уст}} = \frac{\Delta P}{A}$ – установившееся превышение температуры двигателя.

Тепловые процессы двигателя при принятых допущениях описываются линейным дифференциальным уравнением первого порядка. При постоянных потерях $\Delta P = \text{const}$ его решение имеет вид

$$\tau = \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{H}}}}\right) + \tau_{\text{нач}} e^{-\frac{t}{T_{\text{H}}}}.$$

Физическое толкование постоянной времени нагрева состоит в том, что это время нагрева двигателя до установившегося превышения температуры при отсутствии теплоотдачи теплоты в окружающую среду.

Уравнение нагрева может быть использовано как при нагреве, так и при охлаждении.

Количественно ухудшение теплоотдачи характеризуется коэффициентом ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе

$$\beta_0 = \frac{A_0}{A},$$

где A_0 , A – теплоотдача соответственно при неподвижном двигателе и номинальной скорости.

Примерные значения коэффициента β_0 для двигателей с различной системой охлаждения представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения коэффициента ухудшения теплоотдачи

Исполнение двигателя	β_0
Закрытый с независимой вентиляцией	1
Закрытый без принудительного охлаждения	0,95÷0,98
Закрытый самовентилируемый	0,45÷0,55
Защищенный самовентилируемый	0,25÷0,35

Постоянная времени охлаждения при неподвижном двигателе

$$T_0 = \frac{T_n}{\beta_0}.$$

Так как $\beta_0 \leq 1$, то $T_0 \geq T_n$, т.е. охлаждение неподвижного двигателя происходит медленнее, чем его нагрев.

На рис. 3.8, а приведены кривые нагрева двигателя для различных $\tau_{нач}$ и ΔP . Большим потерям мощности в двигателе соответствует большее значение установившегося превышения температуры.

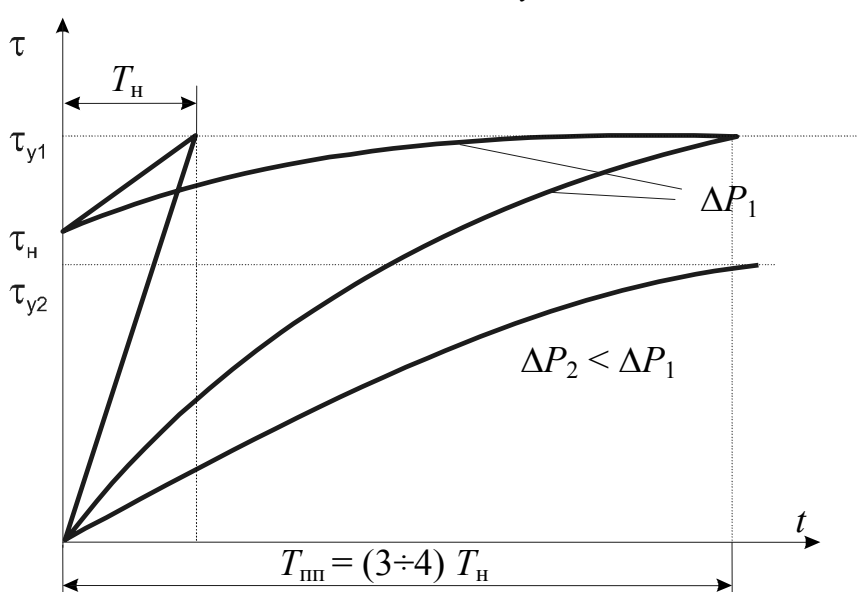
Таким образом, время достижения перегревом своего установившегося значения зависит от постоянной времени нагрева двигателя. Так как теплоёмкость двигателя пропорциональна его объёму, а теплоотдача – площади, то двигатели большей мощности, имеющие большие габари-

ты, имеют и большую постоянную времени нагрева (её величина составляет от нескольких минут до нескольких часов).

Охлаждение двигателя (рис. 3.8, б) сопровождается снижением перегрева по кривой 1 при уменьшении нагрузки и по кривым 2 и 3 при отключении двигателя от сети.

Порядок проверки двигателя по нагреву прямым методом состоит в следующем. По известному графику нагрузки двигателя определяются потери мощности на отдельных участках цикла и с их помощью находят значения установившегося перегрева на каждом участке по формуле

$$\tau_{уст\ i} = \frac{\Delta P_i}{A_i}.$$



a

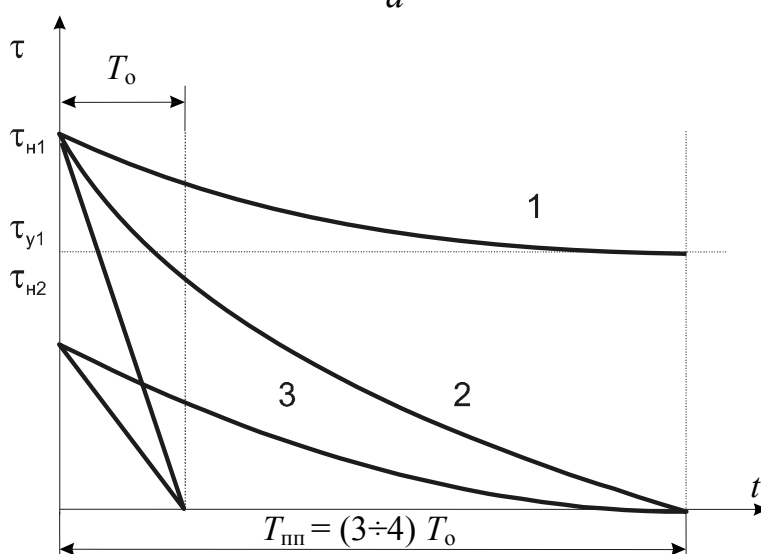


Рис. 3.8. Кривые нагрева и охлаждения двигателя

Далее для участков работы (нагрева) и паузы (охлаждения) определяются постоянные времена нагрева и охлаждения

$$T_0 = \frac{C}{A_0} = \frac{C}{\beta_0 A} = \frac{T_H}{\beta_0}.$$

Затем по уравнению нагрева строится кривая $\tau(t)$, при этом начальным значением $\tau_{\text{нач}i}$ на каждом следующем участке является его конечное значение $\tau_{\text{кон}i-1}$ на предыдущем участке.

Из построенной таким образом кривой перегрева $\tau(t)$ находится его максимальное значение и проверяется выполнение условие

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

3.3. Проверка двигателей по нагреву косвенными методами

3.3.1. Метод средних потерь

Прямой метод проверки двигателей по нагреву даёт наиболее точную оценку нагрева двигателя, однако имеет существенный недостаток – необходимо знать значения теплоотдачи и теплоёмкости, которые в каталогах и справочниках отсутствуют. В связи с этим в большинстве случаев проверка двигателей по нагреву осуществляется косвенными методами, не требующими построения графика $\tau(t)$.

Сущность метода заключается в определении средних потерь мощности $\Delta P_{\text{ср}}$ за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями $\Delta P_{\text{н}}$. При этом рассматривается достаточно длительный цикл работы двигателя, в котором средний перегрев не изменяется. В этом случае количество теплоты Cdt , аккумулируемое двигателем за цикл, равно нулю, и уравнение теплового баланса принимает вид

$$\int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt = A \tau_{\text{ср}} t_{\text{ц}}.$$

Откуда

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{\int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt}{A t_{\text{ц}}} = \frac{\Delta P_{\text{ср}}}{A},$$

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

В соответствии с уравнением средние потери за цикл определяют средний перегрев двигателя. Аналогично номинальные потери мощности в двигателе определяют его допустимый нагрев

$$\tau_{\text{доп}} = \frac{\Delta P_{\text{н}}}{A}.$$

Допустимый нагрев двигателя будет при условии

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{н}}.$$

В случае когда на отдельных участках цикла нагрузка постоянна, средние потери определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum t_i} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

График работы двигателя с циклической нагрузкой представлен на рис. 3.9.

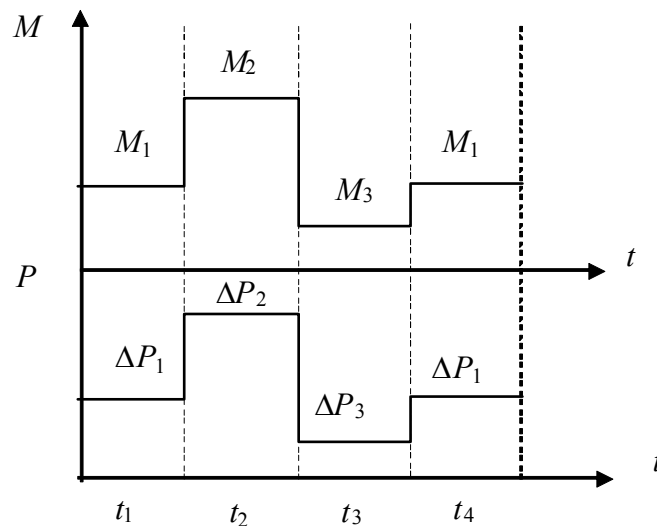


Рис. 3.9. График работы двигателя с циклической нагрузкой

Номинальные потери мощности двигателя определяются по паспортным данным:

$$\Delta P_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{1 - \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}.$$

Метод средних потерь является наиболее точным и универсальным из косвенных методов. Точность метода тем выше, чем больше постоянная нагрева двигателя будет превышать значение t_{\max} наиболее продолжительного участка цикла, т.е. в случае выполнения неравенства $t_{\max} \leq T_{\text{н}}$. При этом $\tau_{\text{ср}} \approx \tau_{\max}$.

3.3.2. Метод эквивалентных величин

Метод эквивалентных величин основан на том положении, что действительную величину заменяют эквивалентной, которая за рабочий цикл создаёт такие же потери в двигателе, как и действительная.

Метод эквивалентного (среднеквадратичного) тока целесообразно использовать в том случае, если известен график изменения тока двигателя во времени. График изменения тока двигателя при циклической нагрузке представлен на рис. 3.10.

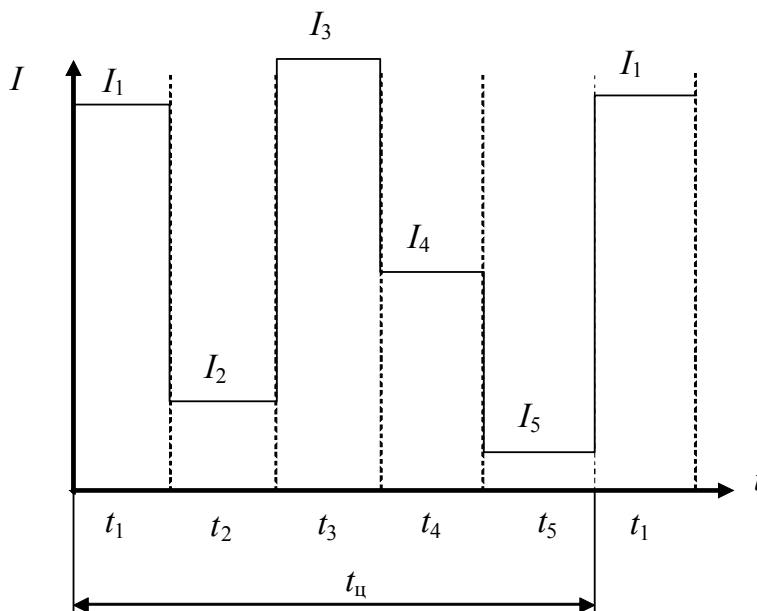


Рис. 3.10. График изменения тока двигателя при циклической нагрузке

Эквивалентный ток определяется по формуле

$$I_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\text{Ц}}}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + \dots + I_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}}.$$

Нагрев двигателя не будет превосходить допустимого уровня, если эквивалентный ток за цикл его работы не будет превосходить номинального тока

$$I_{\text{ЭКВ}} \leq I_{\text{Н}}.$$

Метод справедлив, если постоянные потери и сопротивления главных цепей двигателя остаются неизменными за цикл работы. Метод неприменим для короткозамкнутых двигателей с глубокими пазами или двойной клеткой, т.к. их сопротивления сильно меняются в динамических режимах.

Метод эквивалентного момента удобно использовать в том случае, когда известен график изменения момента двигателя во времени. При применении метода магнитный поток должен быть постоянен. Тогда

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = M_{\text{ЭКВ}} \leq M_{\text{Н}}.$$

Метод эквивалентной мощности используется, если известен график изменения мощности во времени, а также при выполнении условий применимости метода эквивалентного момента и постоянства скорости двигателя на всех участках рабочего цикла. Тогда

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}} = M_{\text{ЭКВ}} \omega_{\text{Н}} = P_{\text{ЭКВ}} \leq P_{\text{Н}}.$$

Если выполняется данное равенство, то нагрев двигателя не превысит допустимого уровня.

3.4. Особенности проверки двигателей по нагреву при различных тепловых режимах работы

3.4.1. Продолжительный режим работы

Работа двигателей по характеру изменения нагрузки на их валу, а тем самым по виду их нагрева и охлаждения подразделяются на восемь режимов S1÷S8.

Продолжительный режим работы S1 двигателя характеризуется неизменной нагрузкой в течение времени, за которое перегрев его частей достигает установившегося значения

$$t_{\text{p}} \geq (3 \div 4) T_{\text{Н}},$$

где t_p – время работы двигателя.

Режим $S1$ характеризуется неизменными потерями в течение всего времени работы. Работа двигателя в режиме $S1$ может происходить с постоянной или переменной циклической нагрузкой.

График изменения мощности на валу P , момента M , потерь мощности ΔP и перегрева τ для режима $S1$ при постоянной нагрузке представлены на рис. 3.11.

Так как двигатель выбирается по условию $P \leq P_n$, то выполняется и условие $\Delta P \leq \Delta P_n$, и $\tau_{\max} = \tau_{\text{уст}} \leq \tau_{\text{доп}}$.

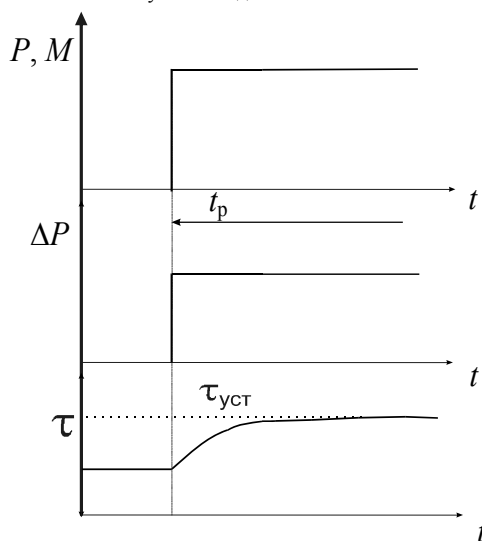


Рис. 3.11

Если нагрузка на валу двигателя периодически меняется, то также периодически будут меняться потери в двигателе и его температура. Проверка двигателя в этом случае выполняется методами средних потерь или эквивалентных величин.

3.4.2. Кратковременный режим работы

Кратковременный режим работы $S2$ характеризуется чередованием периодов неизменной нагрузки с периодами отключения двигателя. При этом за время работы t_p превышение температуры не достигнет установившегося значения, а за время паузы t_0 все части двигателя охлаждаются до температуры окружающей среды:

$$t_p \leq (3 \div 4)T_n, \quad t_0 \geq (3 \div 4)T_0.$$

ГОСТ 183–74 устанавливает стандартные значения продолжительности рабочего периода – 10, 30, 60 и 90 мин.

Графики, характеризующие кратковременный режим работы S_2 , представлены на рис. 3.12.

Если двигатель рассчитан на продолжительный режим работы, то при кратковременном режиме его перегрев к концу рабочего периода не достигнет установившегося значения. В этом случае двигатель будет недоиспользован по нагреву, а тем самым по своей мощности.

Для полного использования в кратковременном режиме работы двигателя, предназначенного для продолжительного режима, его следует перегружать по мощности на валу. Тогда к концу рабочего периода его перегрев достигнет допустимого уровня.

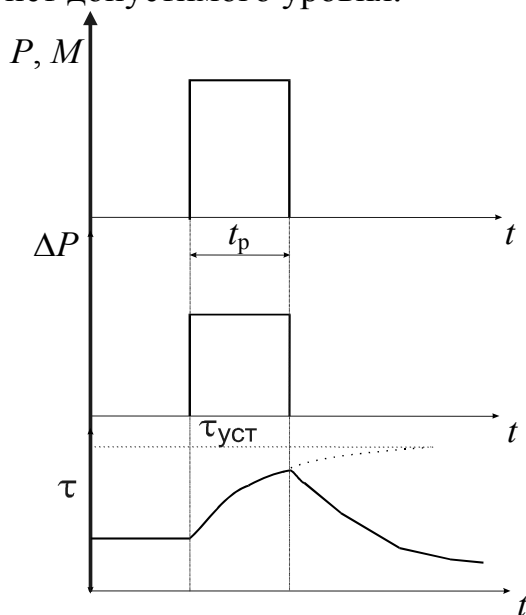


Рис. 3.12. Графики, характеризующие кратковременный режим работы

Для количественной оценки перегрузки и нагрева двигателя используются коэффициенты термической и механической перегрузок.

Коэффициентом термической перегрузки p_T называется отношение потерь мощности при кратковременном режиме ΔP_K к номинальным потерям мощности ΔP_H :

$$p_T = \frac{\Delta P_K}{\Delta P_H} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T_H}}} > 1.$$

Коэффициентом механической перегрузки p_M называется отношение мощности нагрузки двигателя в кратковременном режиме P_K к номинальной мощности P_H в продолжительном режиме:

$$p_M = \frac{P_K}{P_H}.$$

Коэффициенты механической и термической перегрузок связаны между собой выражениями

$$p_T = \frac{\Delta P_K}{\Delta P_H} = \frac{k + V_H p_M^2}{k + V_H} = \frac{a + p_M^2}{a + 1};$$

$$P_M = \sqrt{(1 + a)p_T - a},$$

где $a = \frac{k}{V_H}$ – коэффициент потерь.

Если пренебречь постоянными потерями, то $a = 0$,

$$p_M = \sqrt{p_T}.$$

Зависимость коэффициентов термической и механической перегрузок при кратковременном режиме работы от относительной длительности рабочего периода t_p/T_H показана на рис. 3.13.

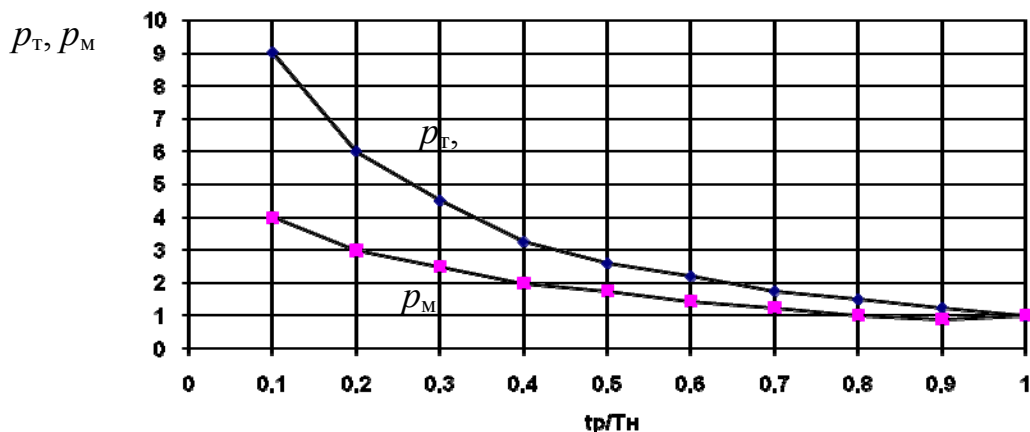


Рис. 3.13. Зависимость коэффициентов термической и механической перегрузок

При отношениях $t_p/T_H = 0,3 \div 0,4$ допустимый по условиям нагрева коэффициент механической перегрузки примерно равен 2,5, что в среднем соответствует перегрузочной способности двигателей общепромышленных серий. Вследствие этого при меньших отношениях t_p/T_H полное использование таких двигателей по нагреву ограничивается их перегрузочной способностью. Другими словами, при малых отношениях t_p/T_H двигатели недоиспользуются по нагреву и поэтому в этом слу-

чае можно вообще не проводить проверку двигателя по нагреву, а следует ограничиться только его проверкой по условиям перегрузки.

Полное использование двигателей по нагреву возможно только при больших значениях t_p/T_n . Промышленность выпускает специальные двигатели, рассчитанные для кратковременного режима работы. Они имеют повышенную перегрузочную способность, что позволяет полнее использовать их по нагреву.

Время работы этих двигателей нормируется. Это значит, что двигатель, имеющий, например, номинальную мощность $P_n = 10$ кВт при $t_p = 30$ мин, может развивать в течение 30 минут мощность 10 кВт, не перегружаясь. Затем он должен быть отключен от сети пока не охладится.

В общем случае проверка таких двигателей по нагреву может выполняться по двум вариантам. Если данные нагрузочной диаграммы соответствуют номинальным данным, то проверки по нагреву не требуется. Если же данные нагрузочной диаграммы отличаются от паспортных данных, то следует рассчитывать эквивалентную мощность, приведя её к ближайшему стандартному времени $t_{p\text{ст}}$:

$$P_n \geq P_{\text{экв}} \sqrt{\frac{t_p}{t_{p\text{ст}}}},$$

где t_p – действительное время кратковременной работы двигателя из нагрузочных диаграмм.

Для более точной оценки можно воспользоваться выражением

$$P_k = P_n \sqrt{\frac{(1+a)(1 - e^{-\frac{t_{p\text{ст}}}{T_n}})}{(1 - e^{-\frac{t_p}{T_n}}) - a}}.$$

Если рассчитанная по формуле допустимая мощность P_k превышает эквивалентную мощность, т.е. $P_k \geq P_{\text{экв}}$, то двигатель будет работать в нормальном тепловом режиме, не перегреваясь сверх допустимого уровня.

Необходимо отметить, что двигатели, предназначенные для кратковременного режима работы, нецелесообразно использовать в продолжительном режиме из-за присущих им повышенных постоянных потерь мощности. Иногда такие двигатели не могут работать в продолжительном режиме даже вхолостую, перегреваясь при этом выше допустимого уровня.

3.4.3. Повторно-кратковременный режим работы

Повторно-кратковременный режим работы $S3$ характеризуется кратковременными рабочими периодами t_p неизменной нагрузки, которые чередуются с периодами t_o отключения двигателя (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений:

$$t_p \leq (3 \div 4)T_n, \quad t_o \leq (3 \div 4)T_o.$$

Графики нагрузки для повторно-кратковременного режима работы представлены на рис. 3.14.

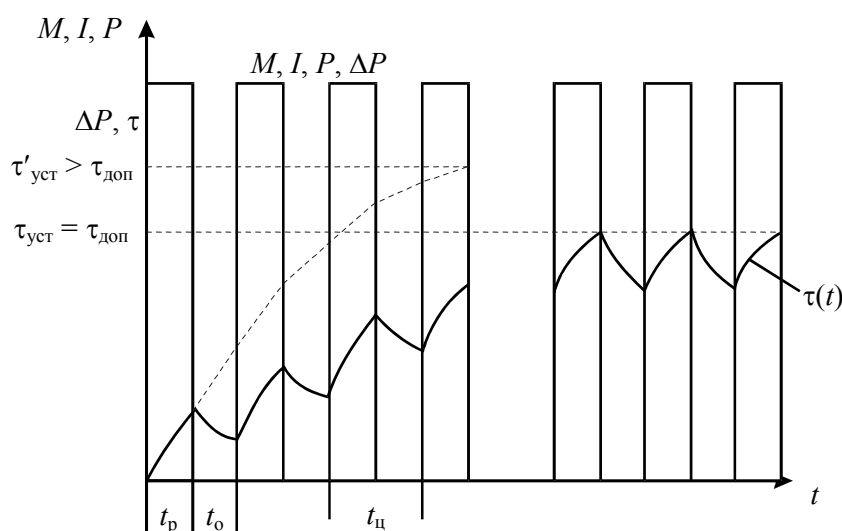


Рис. 3.14. Графики нагрузки для повторно-кратковременного режима работы

Режим характеризуется относительной продолжительностью включения

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100 = \frac{t_p}{t_{ц}} 100, \%$$

Для повторно-кратковременного режима работы выпускаются специальные двигатели, в паспортных данных которых указывается номинальная мощность при нормативной продолжительности включения $ПВ_n = 15, 25, 40, 60$ и 100% .

Длительность рабочего цикла для них не должна превышать 10 мин, в противном случае двигатель считается работающим в продолжительном режиме.

Если мощность нагрузки и ПВ близки к номинальным данным двигателя, то проверка его по нагреву не требуется, поскольку работа при таких параметрах нагрузочной диаграммы гарантируется изготовителем.

Рассмотрим проверку двигателя по нагреву для случая, когда продолжительность включения в реальном цикле $ПВ_1$ заметно отличается от нормативной величины $ПВ_n$, т.е. $ПВ_1 \neq ПВ_n$. Пусть $ПВ_1$ соответствует нагрузке P_1 , а стандартной $ПВ_n$ соответствует номинальная мощность P_n (рис. 3.15).

На основании метода средних потерь можно утверждать, что среднее превышение температуры двигателя при его работе с мощностью $P_1 \neq P_n$ при $ПВ_1 \neq ПВ_n$ не будет превышать допустимой температуры, если средние потери мощности за цикл при P_1 и $ПВ_1$ не будут превышать потери за тот же цикл при P_n и $ПВ_n$, т.е. $\Delta P_1 ПВ_1 \leq \Delta P_n ПВ_n$.

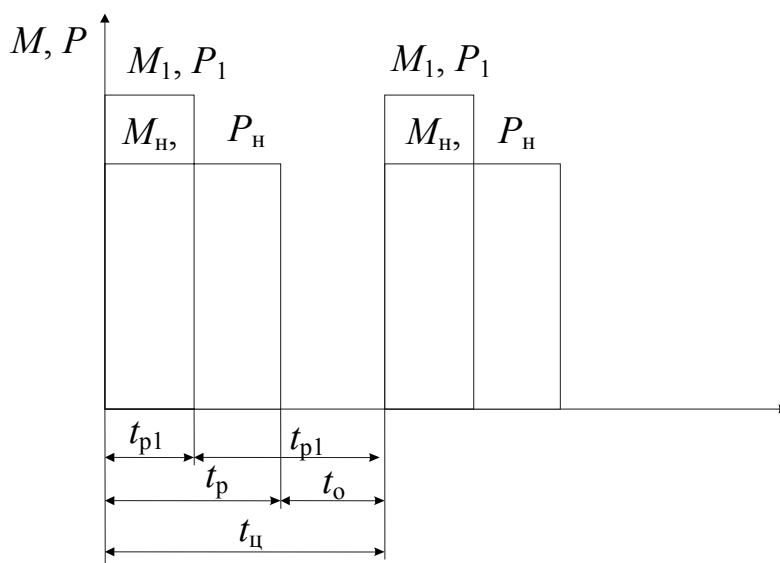


Рис. 3.15. График нагрузки

Отсюда следует, что для того, чтобы при работе с мощностью P_1 и $ПВ_1$ средняя температура двигателя не превышала допустимую, между потерями мощности должно выполняться соотношение

$$\frac{\Delta P_1 ПВ_1}{ПВ_n} \leq \Delta P_n .$$

Порядок проверки двигателя по нагреву состоит в следующем. Определяются ΔP_1 и $ПВ_1$. Затем по паспортным данным двигателя для ближайшей нормативной $ПВ_n$ находятся номинальные потери двигателя и проверяется условие $\frac{\Delta P_1 ПВ_1}{ПВ_n} \leq \Delta P_n$. При его выполнении нагрев двигателя не будет превышать нормативного.

Проверка двигателя по нагреву может быть произведена также сопоставлением номинальной и эквивалентной мощности двигателя:

$$P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_1 + \beta_0(1 + \alpha)(1 - ПВ)}}$$

Если это условие выполняется, то температура двигателя не будет превосходить допустимого значения. Когда реальная продолжительность включения ненамного отличается от нормативной, произведением $\alpha(ПВ_n - ПВ_1)$ можно пренебречь, тогда получим

$$P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_n}}$$

Проверка двигателей по нагреву, предназначенных для продолжительного режима работы, но используемых для повторно-кратковременной нагрузки, может быть выполнена с помощью вышеприведенных формул, если положить в них $ПВ_n = 100\%$.

Для двигателей продолжительного режима работы, у которых теплоотдача в период пауз ухудшается, проверка по нагреву выполняется по формуле

$$P_n \geq P_1 \sqrt{\frac{ПВ_1}{ПВ_1 + \beta_0(1 + \alpha)(1 - ПВ_1)}}$$

где $\beta_0 = \frac{A_0}{A}$ – коэффициент ухудшения теплоотдачи.

При $ПВ > 70 \div 80\%$ выбор двигателя можно производить, как для двигателя, работающего в режиме $S1$.

3.4.4. Дополнительные режимы работы

Рассмотренные режимы $S1$, $S2$ и $S3$ являются основными и наиболее характерными для электродвигателей. Есть ещё пять режимов $S4-S8$, которые являются разновидностями первых трех и встречаются гораздо реже. Проверка двигателей по нагреву в этих режимах производится методами средних потерь или эквивалентных величин.

Повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками $S4$ – это режим, при котором периоды пуска и кратковременной неизменной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, при этом превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения. В режиме нормируются относительная продолжительность вклю-

чения в процентах, число пусков в час (30, 60, 120 или 240) и коэффициент инерции $F1$ электропривода. Коэффициент $F1$ равен отношению суммарного приведенного момента инерции привода к моменту инерции якоря (ротора) двигателя (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0; 6,3; 10).

Продолжительность включения

$$\text{ПВ} = \frac{t_n + t_p}{t_n + t_p + t_0} 100 \%,$$

где t_n – время пуска, с.

Повторно-кратковременный режим работы с частыми пусками и электрическим торможением $S5$ – это режим, в котором периоды пуска, кратковременной неизменной нагрузки и электрического торможения t_T чередуются с периодами отключения двигателя, причём превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения.

Нормируемые величины те же, что и для режима $S4$, но ПВ определяется следующим образом:

$$\text{ПВ} = \frac{t_n + t_p + t_T}{t_n + t_p + t_0 + t_T} 100 \%.$$

Переключающийся режим работы $S6$ – это режим, при котором периоды неизменной рабочей нагрузки чередуются с периодами холостого хода, во время которых двигатель не отключается, при этом превышение температуры двигателя не достигает установившегося значения. Режим характеризуется относительной продолжительностью нагрузки ПН

$$\text{ПН} = \frac{t_p}{t_p + t_x} 100 \%,$$

где t_x – продолжительность периода холостого хода.

Нормируемые значения ПН равны 15, 20, 40 и 60 % .

Переключающийся режим работы с частыми реверсами $S7$ – это режим, в котором периоды работы с неизменной нагрузкой чередуются периодами реверса с электрическим торможением, причём температура двигателя не достигает установившегося значения. Нормируется число включений в час (30, 60, 120 и 240) и коэффициент $F1$ (1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 4,0).

Переключающийся режим работы с двумя или более угловыми скоростями $S8$ – это режим, в котором периоды работ с одной нагрузкой на одной скорости чередуются с периодами работы на другой скорости, с иной, но также неизменной нагрузкой. При этом превышение температуры двигателя не превышает установившегося уровня. Нормируются

число циклов в час (30, 60, 120 или 240), коэффициент инерции $F1(1,2; 1,6; 2,0; 2,5$ и $4,0)$ и относительная (в процентах к длительности цикла) продолжительность нагрузки на каждой из частот вращения.

Для электроприводов, работающих в режимах $S4$, $S5$, целесообразно выбирать двигатели, предназначенные для работы в режиме $S3$.

Для электроприводов, работающих в режимах $S6$, $S7$ и $S8$, обычно выбирают двигатели, предназначенные для работы в режиме $S1$.

4. ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1. Экономия электроэнергии технологическими установками и механизмами

4.1.1. Подъемные установки

Пути экономии электроэнергии в подъемных установках: выполнение оптимальной диаграммы скорости; обеспечение нормированной загрузки подъемных сосудов; ликвидация или сокращение работы на холостом ходу; контроль состояния подъемных сосудов; применение совершенных видов электропривода; специфические способы, обусловленные типом электропривода.

Оптимальной диаграммой скорости с точки зрения расхода электроэнергии будет та, где множитель скорости принимает наименьшее значение:

$$\lambda = \frac{V_{\max}}{V_{\text{ср}}} = \frac{V_{\max} T_{\text{п}}}{H_{\text{п}}},$$

где V_{\max} , $V_{\text{ср}}$ – максимальная и средняя скорости движения подъемного сосуда, м/с; $H_{\text{п}}$ – высота подъема, м; $T_{\text{п}}$ – время подъема сосуда, с.

Оптимальную диаграмму скорости можно получить увеличением ускорения при запуске и замедления при торможении (в последнем случае это целесообразно при двигательном замедлении или свободном выбеге), а также при увеличении в допустимых пределах максимальной скорости подъема.

Выполнение оптимальной диаграммы скорости обеспечивается полной автоматизацией управления, в результате чего повышается как производительность установки, так и обеспечивается работа с минимальным расходом электроэнергии.

Для проверки соответствия фактической диаграммы скорости оптимальной необходимо не реже одного раза в полугодие производить замеры графика скорости с последующей коррекцией при отклонении параметров в схеме управления установкой.

При недогрузке скипов и вагонеток, при выдаче горной массы, неполной загрузке клетей при спуске – подъёме людей нерациональный расход электроэнергии составит

$$\Delta W = W_{\text{ц}} n_{\text{нр}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где $W_{\text{ц}} = W_{\text{сут}}/n_{\text{ф}}$ – расход электроэнергии за один цикл подъёма, кВт·ч; $W_{\text{сут}}$ – суточное потребление электроэнергии подъемной установки (определяется по показаниям счетчика активной энергии), кВт·ч; $n_{\text{ф}}$ – фактическое число подъёмов за сутки; $n_{\text{нр}} = n_{\text{ф}} - n_{\text{рац}}$ – нерациональное число циклов за расчётный период времени T (дн.); $n_{\text{рац}} = \frac{A_{\text{ф}}}{Q_{\text{норм}}}$ – рацио-

нальное число циклов за расчётный период при нормированной загрузке подъёмного сосуда; $A_{\text{ф}}$ – фактическое количество выданной горной массы за расчетный период, т; $Q_{\text{норм}}$ – нормированная грузоподъёмность подъёмного сосуда.

Работа на холостом ходу связана с увеличением нерациональных циклов и дополнительным расходом электроэнергии. Для её устранения необходимо иметь график работы подъемной установки и строго его соблюдать.

В результате налипания горной массы на внутреннюю поверхность скипа снижается его фактическая ёмкость и, как следствие, снижается общая производительность подъёма, что влечёт дополнительный расход электроэнергии. Контроль за состоянием скипов должен производиться не реже одного раза в месяц.

Недостатком реостатных систем управления работой подъёма являются значительные потери энергии при пуске и торможении. Частотно-управляемые, ТП–Д (тиристорный преобразователь–двигатель) системы и другие обладают высокими регулировочными свойствами и имеют лучшие технико-экономические показатели, в том числе при меньшем расходе электрической энергии.

При двухдвигательном электроприводе, при ремонтных и профилактических работах, а также в начальный момент ускорения или торможения возможно использовать один двигатель.

4.1.2. Вентиляторные установки

Суммарная установленная мощность приводных двигателей вентиляторов, компрессоров, насосов составляет около 20 % от мощности всех электростанций СНГ; при этом только вентиляторы потребляют около 10 % от всей энергии, вырабатываемой в содружестве.

Обследования Криворожского бассейна показали, что большинство вентиляторных установок шахт имеют КПД значительно ниже нормы (0,6, а в некоторых 0,3÷0,4). Только 22 % вентиляторов работают в зоне экономичного использования. Фактически удельный расход мощности в 1,5–2 раза превышает допустимую величину, а общая стоимость перерасхода электроэнергии приводами главных вентиляторов составляет четвертую часть расхода электроэнергии всеми установками за год.

Это объясняется тем, что большинство вентиляторов эксплуатируется вне зоны экономичной работы, т.е. режим работы вентиляторов не соответствует параметрам вентиляционных сетей (несоответствие фактических значений эквивалентных отверстий вентиляционных направлений шахт их проектным значениям; наличие больших подсосов воздуха с поверхности через зону обрушения и надшахтные сооружения; оборудование вентиляторов нерегулируемым приводом и т.д.).

Причиной низких энергетических показателей вентиляторов являются:

- переменное аэродинамическое сопротивление сети в процессе разработки шахтного поля. Вентилятор выбирается на максимальные значения производительности и давления, которые достигаются только через несколько лет работы. Поэтому вентилятор длительное время работает в режимах, отличных от расчётного;
- отличие реальных величин параметров вентиляции (количество метана, протяженность и сечение выработок, утечки воздуха и др.) от расчетных приводит к тому, что фактический режим работы вентилятора значительно отличается от расчетного;
- изменение величины естественной тяги по времени года, а иногда и в течение суток в зависимости от температуры воздуха на поверхности;
- изменение метановыделения, которое зависит от атмосферных, горно-геологических факторов, приводящее или к простоям в случае повышения допустимой концентрации или к перерасходу электроэнергии.

Экспериментально установлено, что колебания депрессии между февралем и сентябрем на некоторых шахтах составляет ~20 мм вод.ст. при изменении расхода воздуха более чем на 12 %. Особенно велики колебания естественной тяги в районах с низкоконтинентальным климатом, где естественная тяга имеет переменное направление в разное время года, а иногда и суток.

Пути экономии электроэнергии в вентиляторных установках: согласование режима работы вентилятора с характеристикой вентиляционной сети, повышение КПД вентиляционной сети, повышение экс-

плуатационного КПД вентиляторных установок; регулирование производительности вентиляторных установок.

Рабочая точка вентилятора определяется как рабочая точка пересечения напорной характеристики вентилятора с характеристикой вентиляционной сети. Она должна лежать на устойчивой части характеристики вентилятора и быть по возможности ближе к точке, соответствующей максимальному КПД вентилятора. Если имеет место неэффективная работа вентилятора, то рабочую точку можно переместить в зону экономической работы как с помощью изменения рабочих параметров вентилятора, так и изменением характеристики вентиляционной сети. Определение рабочей точки вентилятора при уточненной характеристике вентиляционной сети должно производиться не реже одного раза в полугодие.

Повышение КПД вентиляционной сети обеспечивается за счёт снижения подсосов (утечек) воздуха через надшахтное здание и каналы вентилятора и снижением сопротивления (депрессии) вентиляционной сети. Для снижения подсосов воздуха через надшахтное здание необходимо отштукатурить стены, заделать щели, оборудовать окна двойными рамами, а также упорядочить работу шлюзовых и разгрузочных устройств. Клетевые подъёмы должны быть оборудованы специальными воздушными клапанами. Для уменьшения подсосов воздуха в вентиляционных каналах необходимо уплотнять ляды, обеспечив тщательную подгонку уплотняющей резины к раме и надежное крепление последней к бетону каналов; оборудовать смотровые колодцы и входы в канал двойными плотно прилегающими лядами с прокладкой из мягкой резины.

Для определения изменяющегося состояния вентиляционной сети шахты необходимо периодически производить депрессивные съёмки вентиляционных сетей, что даёт общую картину распределения общешахтной депрессии, на которой можно выделить участки резкого увеличения аэродинамических сопротивлений.

Применительно к этим участкам и ко всей вентиляционной сети проводятся мероприятия по снижению сопротивления протяженных участков и местных сопротивлений:

- увеличение площади поперечного сечения вентиляционных выработок путем их перекрепления;
- улучшение аэродинамических свойств выработок за счёт их затяжек, обшивки, штукатурки стен, сглаживания углов при изгибах выработок, установка обтекателей на расстрелах и т.п.;
- снижение местных сопротивлений путем уборки вагонеток и оборудования из выработок, уборки завалов и др.

Мощность, потребляемая из сети двигателем вентиляторной установки, определяется выражением

$$P = \frac{HQ \cdot 10^{-3}}{\eta_v \eta_d}, \text{ кВт.}$$

Так, если в шахту подать $Q = 200 \text{ м}^3/\text{с}$ свежего воздуха при $\eta_v = 0,65$, $\eta_d = 0,85$, и за счет реконструкции вентиляционной сети снизить общешахтную депрессию на 400 Па (раскрепление 500 м вентиляционного штрека с увеличением сечения с 4 до 6 м², удаление со штрека двух вагонеток с инертной пылью, сглаживание угла поворота струи воздуха), то получим годовую экономию (за $T_v = 8760$ ч работы вентилятора)

$$\Delta W = 400 \cdot 200 \cdot 8760 \cdot 10^{-3} / (0,65 \cdot 0,85) \approx 1270 \text{ тыс. кВт}\cdot\text{ч/год.}$$

Повышение эксплуатационного КПД вентиляторных установок достигается:

- устранением работ осевого вентилятора с перевернутым колесом;
- обеспечением нормативных зазоров рабочего колеса;
- наличием обтекателя перед входом рабочего колеса осевого вентилятора;
- обеспечением нормативных параметров диффузора на выходе осевого вентилятора;
- точной установкой лопаток направляющего аппарата;
- эксплуатационными изменениями параметров рабочих колес слабозагруженных двухступенчатых осевых вентиляторов;
- повышением активной загрузки двигателя вентилятора.

Регулирование производительности вентиляторных установок может осуществляться аэродинамическими способами и изменением частоты вращения рабочего колеса вентилятора с помощью регулируемого электропривода.

4.1.3. Водоотливные установки

Пути экономии электроэнергии в водоотливных установках: повышение КПД насосов и трубопроводов; регулирование производительности водоотливной установки; упорядочение графика нагрузок водоотливной установки; организационные мероприятия.

Повышение КПД насосов обеспечивается за счёт тщательной балансировки рабочих колес, регулярной заменой уплотнителей, обеспечения рабочей точки насоса в зоне максимальных значений КПД.

Повышение КПД трубопровода может быть достигнуто за счёт:

- увеличения сечения труб по всей длине и на отдельных участках;
- включения на параллельную работу резервного нагнетательного става;
- сокращения длины трубопровода, замена наклонных участков вертикальными;
- регулярной очистки трубопровода;
- ликвидации в трубопроводе излишней арматуры и ненужных поворотов или снижения их сопротивления сглаживанием острых углов;
- использования арматуры с меньшими значениями коэффициента местного сопротивления (например, замена в приемных устройствах на всасывающих трубопроводах тарельчатых клапанов на шаровые).

Расход электроэнергии по насосной установке в год определяется выражением

$$W = \frac{0,00272HQ T}{\eta_{nc} \eta_{тр} \eta_d}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/год},$$

где T – число часов работы насоса в год, ч/год; $\eta_{тр}$ – КПД трубопровода.

При изменении значений величин, входящих в формулу, подсчитывается расход энергии по базовому варианту, и, с учётом внедрения энергосберегающих мероприятий, разница расходов энергии даст экономию электроэнергии.

Регулирование производительности насосной установки при использовании центробежных насосов в настоящее время практически не используется, так как одновременно меняется напор и подача. Поэтому регулирование возможно лишь в небольшом диапазоне для отработки рабочей точки с максимальным КПД.

Это может быть осуществлено за счет:

- дросселирования на стороне нагнетательного трубопровода;
- использования различного вида муфт;
- использования регулируемого электропривода.

Путем изменения времени включения насосной установки на период минимальной подземной нагрузки можно уменьшить потерю энергии в ствольном кабеле. Указанное мероприятие, возможно, будет связано с увеличением водосборника водоотливной установки, однако последнее может иметь дополнительный эффект за счет внепикового электропотребления насосами.

Организационные мероприятия включают в себя:

- устранение утечек в трубопроводе;

- использование напора трубопровода для орошения (отпадает необходимость в насосах орошения);
- регулярная чистка водосборника (улучшается работа приемного устройства насосной установки и насоса);
- предупреждение проникновения воды в шахту;
- правильная эксплуатация электродвигателей насосов.

4.1.4. Компрессорные установки

Пути экономии электроэнергии в компрессорных установках: периодический контроль КПД компрессоров; применение резонансного наддува поршневых компрессоров; снижение сверхнормативных утечек сжатого воздуха и потерь давления в пневмосетях шахт; согласование режимов работы компрессорной станции с режимом потребляемого сжатого воздуха; замена пневмооборудования на электрооборудование; использование регулируемого электропривода.

Чтобы не происходило снижение КПД компрессоров, необходимо осуществлять мероприятия по повышению эффективности их работы, а именно:

- контроль сопротивления воздухозаборного устройства;
- регулярная очистка фильтров;
- регулировка прижимных пружин клапанов;
- применение высококачественной смазки трущихся частей и строго регламентированная её подача в цилиндры;
- поддержание в исправном состоянии регуляторов производительности и обеспечение их четкой работы;
- контроль интенсивности охлаждения компрессоров.

Температура сжатого воздуха на выходе из промежуточного холодильника не должна превышать температуру охлаждающей воды на входе более чем на 5–10 °С.

Применение резонансной длины всасывающих трубопроводов поршневых компрессоров сокращает удельный расход электроэнергии на 3–5 % при одновременном повышении производительности на 5–8 %. Резонансная длина (м) определяется выражением $L = 5160/n$ (n – скорость вращения коленчатого вала компрессора, об/мин).

В соответствии с «Правилами технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт», утечки сжатого воздуха не должны превышать 20 %. Для соблюдения этого требования необходимо:

- вести систематический контроль за утечками сжатого воздуха;

- заменять резинотканевые воздухопроводы на типовые гибкие с металлопленкой и унифицированной пневмоаппаратурой;
- не допускать установку толстостенных труб вместо тонкостенных, увеличивать диаметр труб на отдельных участках;
- устанавливать необходимое количество водоотделителей;
- использовать передвижные компрессоры для подачи небольшого количества сжатого воздуха удаленным потребителям;
- при возможности использовать теплоизоляцию трубопровода;
- исключить нерациональный расход сжатого воздуха.

Мощность электродвигателя компрессора определяется выражением

$$P = \frac{1380}{\eta_{\text{из}} \eta_{\text{д}}} \frac{p_1 Q \gamma_{\text{н}}}{\gamma_{\text{д}}} \lg \frac{p_2}{p_1}, \text{ кВт},$$

где $\eta_{\text{из}}$ – изотермический КПД компрессора; $\gamma_{\text{н}}$ – плотность воздуха при 273 К и давлении 0,1 МПа, кг/м³; $\gamma_{\text{д}}$ – плотность всасываемого воздуха при действительных условиях, кг/м³; p_1 – начальное давление всасываемого воздуха, МПа; p_2 – давление сжатого воздуха, МПа; Q – подача компрессора, м³/с.

Снижение давления вырабатываемого сжатого воздуха на 1 % уменьшает расход электроэнергии приблизительно на 0,5 %. График работы компрессорной станции должен быть согласован с графиком потребления сжатого воздуха, что сокращает избыточную выработку сжатого воздуха и дополнительные потери.

При возможности замены пневматической энергии на электрическую отдельных потребителей имеет место 7–10-кратная экономия энергии.

4.1.5. Конвейерные установки

Пути экономии электроэнергии на конвейерном транспорте: повышение средней загрузки конвейеров до номинального значения; исключение дополнительной работы конвейеров вхолостую; исключение нерационального использования скребковых конвейеров; поддержание высокого технического состояния конвейера; применение регулируемого электропривода.

Расход электроэнергии одним конвейером за расчётный период времени определяется выражениями:

- для ленточного конвейера

$$W_{\text{л}} = 0,013L\delta \left[C_{\text{л}} V_{\text{л}} t_{\text{п}} + 0,28Q_{\text{п}} \left(1 \pm \frac{\sin \beta}{\delta} \right) \right], \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

- для скребкового конвейера

$$W_c = 0,01L_r\delta [C_c V_c t_p + 0,34Q_p (1 \pm 2\text{tg}\beta)], \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где L – длина конвейера, м; если принимается груз из выемочных участков, его длина определяется исходя из его длины на начало планируемого периода $L_{\text{п}}$ и половины продвижения линии забоя L_3 за расчетный период времени работы при удлинении (укорачивании) конвейера: $L=L_{\text{п}} \pm L_3 / 2$; β – угол установки конвейера, градус; $L_r = L\cos\beta$ – горизонтальная длина конвейера, м; δ – коэффициент сопротивления движению: для стационарных конвейеров $\delta = (0,02\div 0,03)$; для конвейеров, установленных в пределах выемочных участков, $\delta = (0,04\div 0,06)$; для конвейеров, работающих в особо тяжелых условиях, $\delta = (0,08\div 0,12)$; $C_{\text{л}}$, $C_{\text{с}}$ – погонная масса движущихся частей конвейера, кг/м, величина табличная в зависимости от типа конвейера; t_p – время работы конвейера за расчетный период, ч;
 $V_{\text{л}}$, $V_{\text{с}}$ – скорость соответственно ленты и цепи конвейера, м/с; Q_p – расчетная масса груза, перевозимого конвейером за время работы t_p , т.

Для определения нерационального расхода электроэнергии при работе конвейеров вхолостую используется только первое слагаемое указанных выражений, и вместо t_p подставляется время t_x холостого хода конвейера за расчетный период.

С целью увеличения загрузки конвейера до номинальных значений следует за конвейером, принимающим уголь (породу), устанавливать бункер или другую усредняющую емкость, из которой осуществляется загрузка последовательно работающих конвейеров с номинальной загрузкой. Следует регулярно следить за состоянием бункеров и усредняющих емкостей, за работой загрузочных устройств; при бункерах емкостью 1000 м³ и выше использовать датчики верхнего и нижнего уровня, сблокированные со схемой автоматизации конвейерной линии.

В некоторых случаях имеет место нерациональное использование скребковых конвейеров, которые можно заменить ленточными. Экономический эффект этого мероприятия, а также использование бункеров можно рассчитать, используя приведенные аналитические выражения расхода энергии конвейерами.

Для поддержания высокого технического состояния конвейеров, влияющего на электропотребление, следует:

- периодически производить смазку механических узлов в соответствии с картой смазки завода-изготовителя;
- не допускать заштыбовки конвейера и концевых станций;

- не допускать эксплуатацию конвейера при чрезмерном износе отдельных узлов;
- в ленточных конвейерах систематически проверять состояние устройств для очистки ленты и барабанов;
- в скребковых конвейерах поддерживать в нормальном состоянии замковые соединения и стыки секций регулированием натяжения скребковой цепи в заданных пределах;
- своевременно производить планово предупредительный ремонт.

4.2. Выбор рационального способа и диапазона регулирования скорости электропривода в зависимости от технологических условий работы машин и механизмов

4.2.1. Регулирование производительности вентиляторных установок и требования к электроприводу

Вентиляторные установки главного проветривания – одни из наиболее ответственных и наиболее энергоемких агрегатов шахты. Режимы работы вентилятора меняются и зависят от многих факторов. Параметры расхода и депрессии меняются на достаточную величину, поэтому необходимо обеспечить, возможно, большую область экономичных режимов.

При выборе рационального способа и диапазона регулирования скорости электропривода необходимо учитывать следующее:

- сезонное колебание давления и температуры окружающей среды требует регулирования производительности в пределах 10÷15 %;
- за период эксплуатации шахты производительность может возрасти в 1,5÷2 раза;
- изменение суточного ритма горных работ (взрывные работы в конце смен) требует повышения производительности на 15÷20 %;
- в праздничные и ремонтные дни производительность может составлять 30÷50 % рабочей.

Аэродинамическое регулирование осуществляется следующими методами: дросселированием; поворотом лопаток направляющего аппарата; поворотом лопаток рабочего колеса (для осевых вентиляторов) или поворотом закрылок (для центробежных вентиляторов).

Первый метод не применяется из-за низкой экономичности. Наиболее распространено регулирование направляющим аппаратом. Но у такого метода малая глубина экономичного регулирования. Также появляются пульсации потока и чрезмерные вибрации. Наиболее эффектив-

но применение этого метода при поддержании постоянной производительности, так как кривая экономичной работы более пологая.

Более экономичным методом является третий метод, но из-за сложности и ненадежности конструкции применяется мало.

Наиболее перспективным является регулирование изменением скорости вращения рабочего колеса. Законы пропорциональности или законы эксплуатации турбомашин формулируются следующим образом: с изменением частоты вращения рабочего колеса турбомашин при постоянной характеристике внешней сети подача (производительность) изменяется пропорционально первой степени, напор – пропорционально квадрату, а потребляемая мощность – пропорционально кубу частоты вращения:

$$Q_1 = Q(n_1/n); \quad H_1 = H(n_1/n)^2; \quad P_1 = P(n_1/n)^3,$$

откуда

$$H_1 = H(Q_1/Q)^2; \quad P_1 = P(Q_1/Q)^3.$$

Последние два уравнения являются соответственно уравнениями квадратической и кубической парабол, представляющих собой геометрическое место точек, координаты которых определяют подобные режимы турбомашин при изменении ее частоты вращения.

На рис. 4.1 приведены графики мощности при регулировании центробежного вентилятора ВЦД-32 направляющим аппаратом (НА) и изменением скорости (ИС).

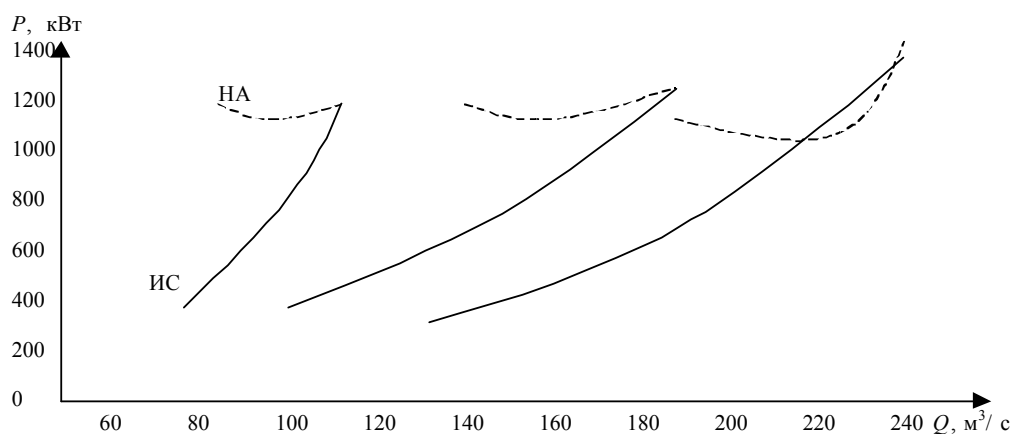


Рис. 4.1. Графики мощности при регулировании центробежного вентилятора ВЦД-32 НА и ИС

Анализ характеристик показывает, что при небольшой глубине регулирования в области малых и средних расходов экономичность обоих

методов одинакова. Но с ростом глубины изменения расхода эффективность регулирования резко возрастает.

Области экономичной работы центробежных и осевых вентиляторов в зависимости от способа регулирования представлены на рис. 4.2 (1 – ВЦД-3,5 и 2 – ВЦД-32 – регулирование направляющим аппаратом; 3 – ВОД-30 – регулирование направляющим аппаратом и поворотом лопаток колеса; 4 – ВЦД-32 – регулирование скорости вращения с помощью регулируемого электропривода).

Из рис. 4.2 видно, что наибольшая зона экономичной работы у центробежного вентилятора с регулированием скорости работы. Расширение зоны экономичной работы позволяет с большей вероятностью обеспечить экономичность вновь проектируемой или повысить КПД действующей установки.

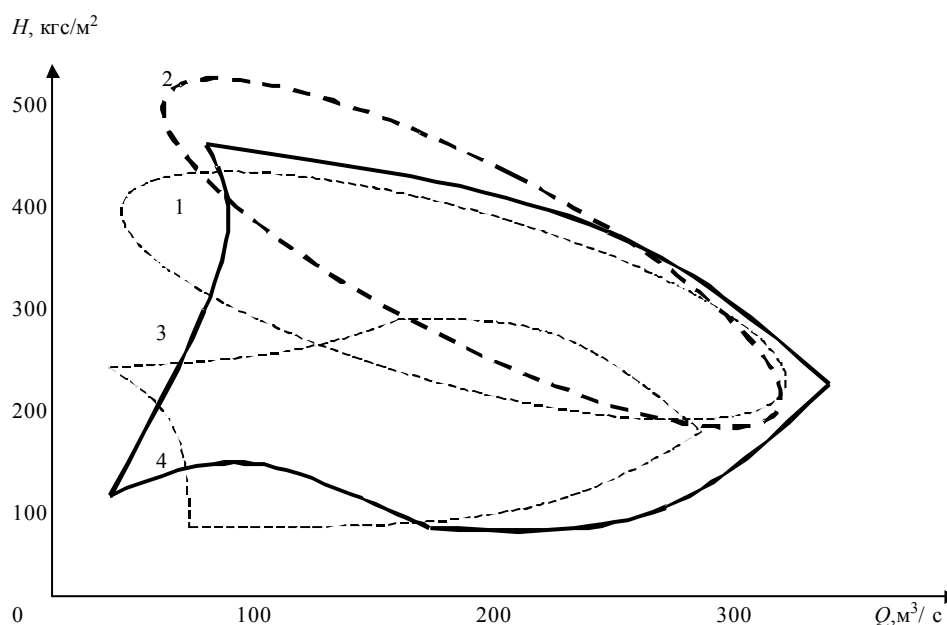


Рис. 4.2. Области экономичной работы центробежных и осевых вентиляторов в зависимости от способа регулирования

На рис. 4.3 приведены кривые, характеризующие экономичность регулирования вентиляторных установок различными способами (1 – дроссельное регулирование; 2 – регулирование направляющим аппаратом; 3 – регулирование муфтами скольжения; 4 – реостатное регулирование с АД; 5 – регулирование каскадными схемами с АД).

Анализ кривых показывает, что наиболее экономичным способом регулирования производительности вентиляторов главного проветривания является регулирование посредством изменения скорости вращения, наименее экономичное – дроссельное регулирование. Расчеты по-

казывают, что регулируемый привод позволяет значительно сократить расход потребляемой электроэнергии (до 40 %). Более половины этого экономится за счет сокращения потребления в нерабочие дни, когда производительность вентилятора может быть уменьшена до 50 % от предельного значения.

К достоинствам способа регулирования частоты вращения относятся: высокая экономичность работы; постоянный КПД вентилятора при регулировании с постоянным эквивалентным отверстием; простота конструкции вентилятора за счет исключения направляющего и поворотного устройств; увеличение области экономичной работы и снижение энергопотребления.

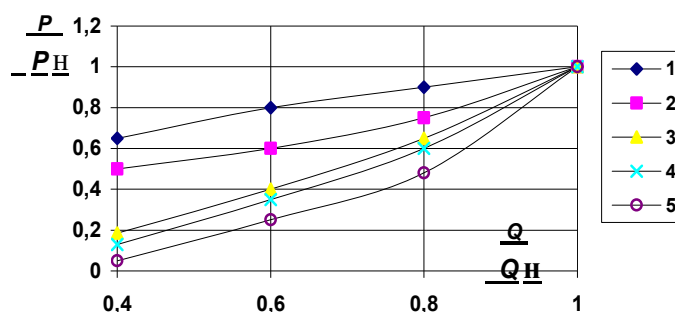


Рис. 4.3. Экономичность регулирования вентиляторных установок различными способами

Регулирование скорости вращения производится на ходу и позволяет осуществить настройку вентилятора на требуемый режим работы. Регулируемый электропривод наиболее удобно соединять со схемами автоматизации и автоматического регулирования проветривания. Существует практическая возможность длительной работы вентиляторных установок с пониженной в сравнении с расчетной производительностью.

Применение регулируемого электропривода дополнительно дает:

- снятие ограничений по газовому фактору на ведение технологического процесса добычи и возможность повышения производительности шахты при том же оборудовании и затратах;
- существенное увеличение области экономической работы вентилятора, уменьшение числа типоразмеров вентиляторов, повышение серийности и снижение стоимости вентилятора;

- увеличение срока службы вентилятора за счет работы в облегченных режимах при пониженной скорости вращения;
- снижение затрат на производство, передачу и распределение электроэнергии, которое обусловлено сокращением ее потребления почти в два раза.

Дополнительно новая технология энергосбережения в вентиляторных установках с большой суммарной мощностью позволяет регулировать мощность в часы максимума нагрузки и тем самым сократить затраты на электроэнергию при двухставочном тарифе [9].

Электропривод и система регулирования вентиляторов главного проветривания угольных шахт должны обеспечивать:

- глубину регулирования по расходу 1:2, по давлению 1:3 при плавном характере изменения параметров;
- возможно большую зону экономичной работы вентилятора;
- высокие энергетические показатели – КПД и коэффициент мощности;
- устойчивую скорость при падении или броске нагрузки и колебаниях напряжения питающей сети;
- возможность оперативного регулирования режима работы вентилятора.

Приведенный сравнительный анализ показывает безусловную целесообразность оборудования мощных шахтных вентиляторов регулируемым электроприводом.

4.2.2. Управление производительностью насосных установок

Насосные агрегаты можно условно разделить на три большие группы: мощные (более 500 кВт) агрегаты энергетических объектов; промышленные агрегаты и насосные станции централизованного водоснабжения (50÷300 кВт); массовые установки (2÷50 кВт), к которым относятся насосы с подачей 12÷100 м³/ч и напором 20÷80 м.вод.ст.

В первой группе в силу ее специфики применяются прогрессивные виды электропривода. Во второй, и особенно в третьей, наиболее массовой, до настоящего времени преобладает нерегулируемый электропривод с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, а управление производительностью осуществляется крайне неэффективным способом – дросселированием. Это не позволяет обеспечить режим рационального энергопотребления и расхода воды, пара, воздуха и т.д. при изменении технологических потребностей в широких пределах.

Характерным примером таких механизмов являются насосные станции холодного и горячего водоснабжения и систем отопления жи-

лых и промышленных зданий. Выбранные исходя из максимальной производительности, эти механизмы значительную часть времени работают с меньшей производительностью, что определяется изменением потребности в разные периоды времени. По некоторым данным среднесуточная загрузка насосов холодного водоснабжения составляет всего 50÷55 % максимальной. Существующие системы водоснабжения не обеспечивают заметного снижения потребляемой мощности при уменьшении расхода, а также обуславливают существенный рост давления (напора) в системе, что приводит к утечкам воды и неблагоприятно сказывается на работе технологического оборудования и сетей водоснабжения.

Насос имеет квадратичную зависимость момента сопротивления от скорости, а мощность на валу двигателя турбомеханизма уменьшается в кубической зависимости при снижении частоты вращения. Соответственно велики и возможности энергосбережения.

Традиционные способы регулирования подачи насосных установок состоят в дросселировании напорных линий насосов и изменении общего числа работающих агрегатов по одному из технологических параметров – давлению на коллекторе или в диктующей точке сети, уровню в приемном или регулирующем резервуаре и др. Эти способы регулирования направлены на решение технологических задач и практически не учитывают энергетических аспектов транспорта воды. При таком регулировании от 5 до 15 %, а в отдельных случаях до 25÷30 % потребляемой электроэнергии затрачивается нерационально:

- из-за потерь энергии в дросселирующем органе;
- создания избыточных напоров в трубопроводной сети;
- утечек и непроизводительных расходов воды в сети и у потребителя;
- увеличения геометрического подъема при откачке воды из резервуаров канализационных насосных станций и т.д.

Поэтому с появлением надежного регулируемого электропривода создались предпосылки для разработки принципиально новой технологии транспорта воды с плавным регулированием рабочих параметров насосной установки без непроизводительных затрат электроэнергии с широкими возможностями повышения точности и эффективности технологических критериев работы систем водоподачи. При этом геометрическим местом рабочих точек насосной установки становятся характеристики трубопроводов, а не характеристики насосов, как в случае регулирования подачи насосных агрегатов с постоянной частотой вращения.

Однако само по себе оснащение насосной установки регулируемым электроприводом не гарантирует экономии электроэнергии. Чтобы получить экономию электроэнергии необходимо следующее. Во-первых, убедиться в потенциальной возможности ее экономии на объекте с учетом его технологических, гидравлических и режимных характеристик, а во-вторых, разработать рациональные технические решения с учетом дополнительных капитальных затрат на их внедрение и осуществить такой алгоритм управления насосной установкой, при котором практически реализуется потенциальная возможность экономии электроэнергии.

Для решения обеих задач обязателен системный подход, когда насосная установка как объект анализа и управления рассматривается с точки зрения количественной определенности всех параметров взаимосвязывающих характеристик работающих насосов, характеристик трубопроводной сети, режимов энергопотребления насосной установки, частоты вращения электроприводов, и т.д.

Рис. 4.4 иллюстрирует возможности снижения мощности, потребляемой двигателем насоса, при регулировании скорости электропривода по сравнению с регулированием дроссельной заслонкой.

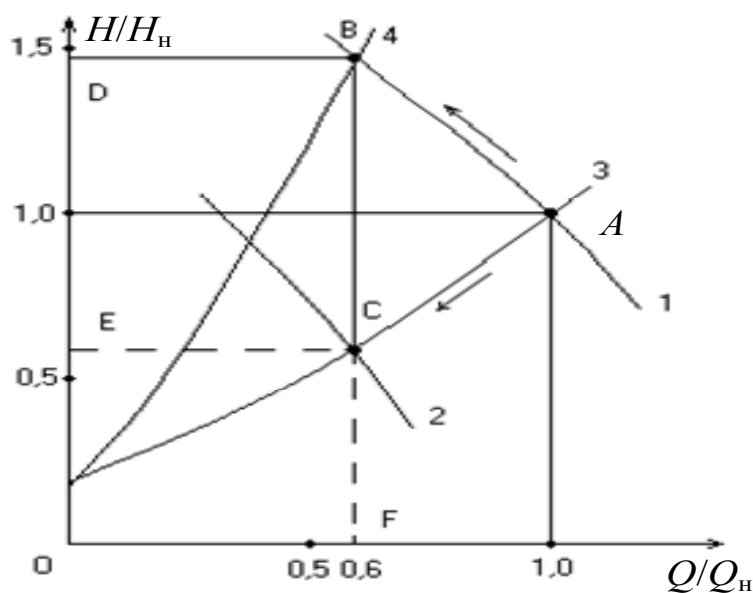


Рис. 4.4. Возможности снижения мощности

При номинальном расходе и напоре насос работает в точке *A*, которой соответствует характеристика магистрали *3* и характеристика *Q–H* насоса (кривая *1*) при номинальной скорости двигателя. С уменьшением расхода при нерегулируемом электроприводе (на ри-

сунке показан расход, составляющий $0,6Q_n$) за счет дроссельного регулирования происходит изменение сопротивления магистрали (кривая 4). Насос работает в точке B кривой 1, что приводит к возрастанию напора, который становится больше номинального. Мощность, потребляемая насосом, пропорциональна площади прямоугольника $ODBF$.

При использовании регулируемого электропривода за счет снижения скорости насос работает при снижении расхода в точке C , что соответствует другой характеристике $Q-H$ (кривая 2) при неизменной характеристике магистрали (кривая 3). Мощность, потребляемая электроприводом в этом случае, пропорциональна $OECF$, что наглядно иллюстрирует возможности существенного снижения энергопотребления при внедрении регулируемых электроприводов насосов. Наилучшие технико-экономические показатели при регулировании скорости насосов обеспечивает система ПЧ-АД (преобразователь частоты – асинхронный двигатель).

Чтобы полнее представить энергетические процессы в насосной установке, оборудованной регулируемым электроприводом, следует учитывать, что перемещение рабочих координат насоса по характеристике водовода при снижении подач насосной установки приводит, как правило, к выходу рабочих точек насоса из рабочей зоны, т.е. к снижению КПД работающих агрегатов, а в ряде случаев к кавитационному или помпажному режиму. Особенно значительные изменения претерпевает КПД регулируемых насосов – у них он может изменяться от номинальных значений до нуля, когда при снижении частоты вращения давление, развиваемое насосом, становится равным и ниже давления, создаваемого работой параллельных насосов, или геометрического подъема.

На рис. 4.5 показана в относительных единицах $n^* = n_i/n_n$ и $H_{ст}/H_{ф}$, область значений КПД регулируемого насоса η_i , ограниченная величинами $\eta_i = 0,95\eta_n$ и $\eta_i = 0,1\eta_n$. Здесь n_i , n_n – текущая и номинальная частота вращения насоса; $H_{ст}$ и $H_{ф}$ – геометрический подъем или противодействие и фиктивный напор насоса при нулевой подаче.

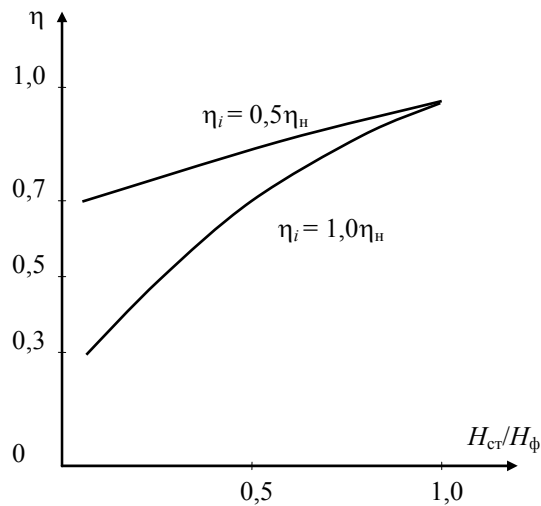


Рис. 4.5. Область значений КПД регулируемого насоса

Из рисунка видно, что значения КПД зависят как от частоты вращения, так и текущих координат насоса, водовода и противодействия в сети. Поэтому закономерна постановка вопроса, в какой мере снижение КПД насоса при уменьшении оборотов компенсируется снижением напоров при движении по траектории водовода. Определено, что для регулируемого насоса, в зависимости от его характеристик, а также характеристик параллельно работающих насосов и трубопроводной сети, существует ограниченный интервал частоты вращения, на котором его энергетические характеристики не хуже таковых при номинальной частоте вращения.

На рис. 4.6 показано семейство кривых, отражающих зависимости относительных удельных затрат электроэнергии W^* на перекачку единицы объема воды от относительной частоты вращения (n_i/n_n) насоса при различных значениях противодействия в сети.

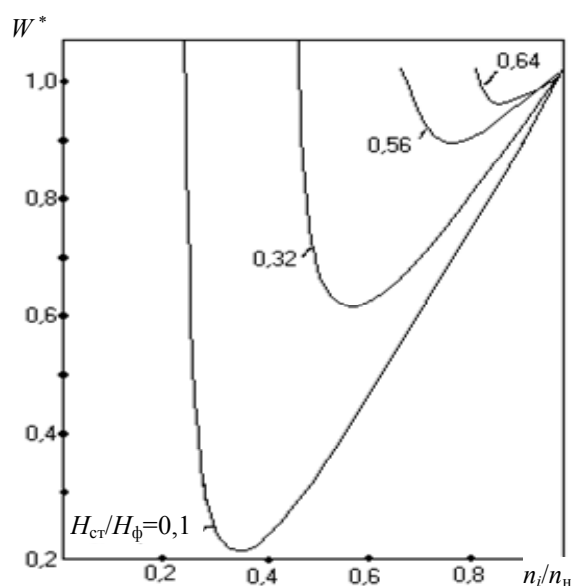


Рис. 4.6. Зависимости относительных удельных затрат электроэнергии на перекачку единицы объема воды от относительной частоты вращения насоса

Зависимости носят ярко выраженный экстремальный характер. Вначале, при снижении частоты вращения от номинальных оборотов, удельные затраты электроэнергии снижаются, а затем, когда экономия электроэнергии от снижения напора становится соизмерима с потерями от снижения КПД насоса, проявляется экстремум функции. В дальнейшем уменьшение частоты вращения приводит к резкому увеличению удельных затрат электроэнергии, и левый участок кривых уходит в бесконечность при стремлении КПД насоса к нулевому значению. Абсолютное значение экстремума кривых зависит от противодействия со стороны работающих насосов. При изменении числа насосов экстремум смещается в ту или иную сторону.

Так как системы водоподачи представляют собой динамические объекты с постоянно изменяющимися во времени рабочими параметрами, насосная установка может попасть в режим работы, при котором значения КПД окажутся слишком низкими (до 0,1). При некоторых условиях этот режим может быть длительным (до 3–5 ч в сутки). Чтобы избежать таких режимов, минимизировать энергопотребление насосной установки, уже на стадии разработки систем автоматического управления (САУ) рассчитывают режимные точки, при которых следует производить изменение общего числа работающих агрегатов. При реализации САУ применяются технические решения, позволяющие удерживать регулируемые агрегаты от вхождения в зону низких значений КПД насоса. Эти решения используют современную программируемую микропро-

цессорную регулируемую аппаратуру, способную идентифицировать объект управления и рассчитывать текущие значения настроечных параметров САУ. Затем с помощью регулируемого электропривода перемещать вектор параметров состояния объекта в соответствии с критерием регулирования, который рассчитывается этим же регулирующим устройством или задается по внешней программе.

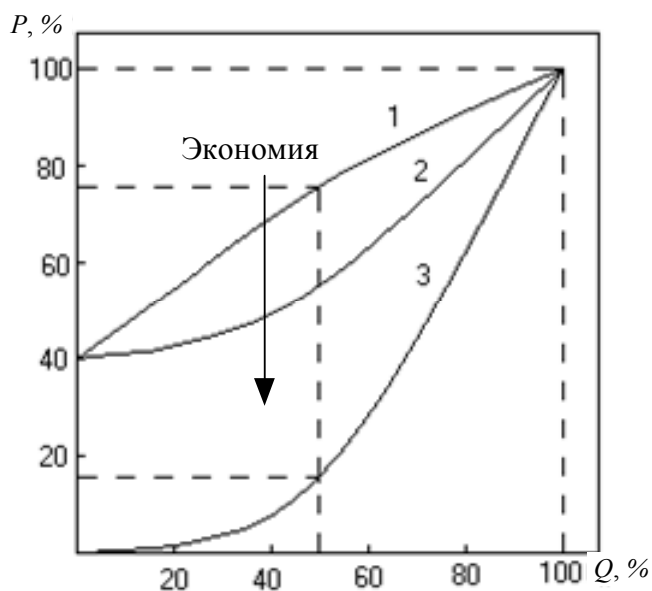


Рис. 4.7. Требуемые мощности насосных приводов трех принципов управления

На рис. 4.7 сопоставлены кривые требуемой мощности насосных приводов трех принципов управления. Как видно из рисунка, при расходе в объеме 50 % расчетного максимума требуемая мощность при дросселировании (кривая 1) составляет 73 %, при использовании запорно-регулирующей арматуры (кривая 2) – только 50 % номинальной, при регулировании частоты вращения электродвигателя (кривая 3) – всего 14 % номинальной мощности.

Экономичность определяется не только энергетическими расходами, учитываются также шумы при регулировании. Рис. 4.8 показывает изменение уровня звукового давления (шумов) при регулировке потока с тремя различными системами (1 – регулирование дросселем; 2 – использование запорно-регулирующей арматуры; 3 – регулирование частоты вращения электродвигателя).

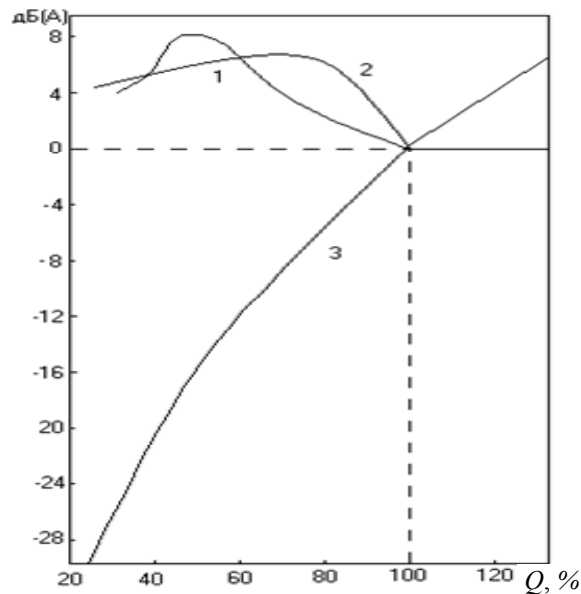


Рис. 4.8. Изменение уровня звукового давления при регулировке потока с тремя различными системами

Исходя из номинальной точки, показано увеличение давления звука для обеих механических систем, особенно в диапазоне частот нужного рабочего режима – от 40 до 80 % проектного максимума. В этом случае при электрической регулировке частоты вращения электродвигателя уровень давления звука падает на 20 дБ(А). По сравнению с механической системой выигрыш составляет 20÷30 дБ(А), благодаря чему расходы на шумоснижающие меры значительно уменьшаются.

Для количественной оценки экономии электроэнергии и воды при внедрении регулируемого электропривода на одной из подкачивающих насосных станций холодного водоснабжения жилых зданий был установлен частотно-регулируемый электропривод, обеспечивающий постоянство напора на выходе насоса независимо от расхода, и произведены запись давления на входе и выходе насосной станции и замеры расхода электроэнергии и воды при работе в нерегулируемом и регулируемом режимах. Насос с номинальной подачей $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и напором 32 м приводился во вращение асинхронным двигателем мощностью 15 кВт. Проведенные замеры показали, что за год экономия электроэнергии составляет 45457 кВт·ч (40,5 %), а экономия воды – 114135 м^3 (25 %). При экономическом эффекте только за счет экономии электроэнергии стоимость электрического оборудования для регулирования частоты вращения электродвигателя окупается за год эксплуатации.

Приведенный пример убедительно подтверждает возможности существенного снижения энергопотребления при использовании систем регулируемых асинхронных электроприводов (особенно ПЧ–АД). Пред-

варительные расчеты показывают, что при широком внедрении частотно-регулируемых приводов можно сэкономить 7÷10 % вырабатываемой электроэнергии.

Появление регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотведения позволит создать принципиально новую энергосберегающую технологию транспорта воды, в которой экономится не только электроэнергия, но и сберегается тепловая энергия и сокращается расход воды за счет утечек ее при превышениях давления в магистрали, когда расход мал. При частотном регулировании насосов можно в значительной степени избежать аварийных ситуаций за счет предотвращения гидравлических ударов, возникающих при изменении режимов работы и пуске системы при нерегулируемом электроприводе.

Получена возможность гибкого и оперативного решения задач водоподдачи и водоотведения при существенном снижении расхода электроэнергии при перекачке воды и стоков. Однако чтобы реализовать такую возможность, необходимо на всех стадиях разработки, внедрения и эксплуатации систем управления режимом водоподдачи располагать максимально полной количественной информацией о состоянии объекта автоматизации.

4.2.3. Регулирование скорости конвейерных установок

На рис. 4.9 изображен ленточный конвейер с движущейся лентой со скоростью V . Движение ленты передается от двигателя Д через редуктор Р и барабан Б.

Момент на валу приводного двигателя конвейера

$$M = \frac{FR}{i_p \eta_p},$$

где R – радиус барабана; F – усилие на приводном барабане.

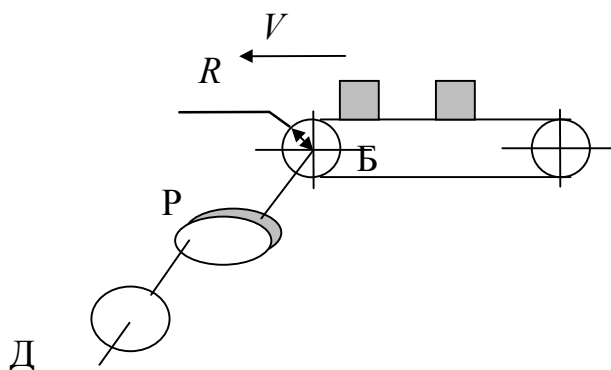


Рис. 4.9. Ленточный конвейер с движущейся лентой

Усилие на барабане имеет две составляющие

$$F = F_x + F_{\Gamma},$$

где F_x – усилие, затрачиваемое на перемещение ленты конвейера; F_{Γ} – усилие, необходимое для перемещения груза.

Когда груз на конвейере отсутствует, двигатель развивает момент холостого хода

$$M_x = \frac{F_x R}{i_p \eta_{px}},$$

где η_{px} – КПД редуктора, соответствующий усилию F_x .

Учитывая свойства механических передач, зависимость момента на валу двигателя от усилия на барабане

$$M_* = M_{x*} + (1 - M_{x*}) F_{\Gamma*},$$

где $M_* = \frac{M}{M_n}$; $M_{x*} = \frac{M_x}{M_n}$; $F_{\Gamma*} = \frac{F_{\Gamma}}{F_{\Gamma n}}$; M_n – номинальный момент на валу двигателя, необходимый для перемещения ленты и номинального груза при номинальной скорости; $F_{\Gamma n}$ – составляющая усилия F в тянущем органе конвейера, возникающая за счет перемещения только номинального полезного груза.

Составляющая F_{Γ} тянущего усилия и скорость перемещения ленты V конвейера определяют его производительность

$$Q_* = F_{\Gamma*} V_*,$$

где $Q_* = \frac{Q}{Q_n}$; Q_n – номинальная производительность конвейера; $V_* = \frac{V}{V_n}$; V_n и V – соответственно номинальная и фактическая скорости движения ленты.

При постоянной номинальной скорости конвейера ($V_* = 1$)

$$Q_* = F_{\Gamma*},$$

поэтому развиваемая двигателем мощность на валу

$$P_* = M_* \omega_* = M_{x^*} + (1 - M_{x^*}) Q_*,$$

где $P_* = \frac{P}{P_H}$; $\omega_* = \frac{\omega}{\omega_H} = 1$; $\omega = \frac{V i_p}{R}$; P_H , ω_H – номинальная мощность и угловая скорость на валу двигателя.

Анализ зависимости показывает, что по мере снижения производительности эффективность работы конвейера уменьшается, т.к. возрастает относительная доля мощности, расходуемой на преодоление момента холостого хода M_x . Очевидно, что при недогрузке конвейера более экономичным по затратам энергии является режим работы с переменной скоростью, обеспечивающей ту же производительность, но при постоянстве составляющей усилия $F_{r^*} = 1$. В соответствии с $Q_* = F_{r^*} V_*$ скорость в этом случае должна изменяться по закону

$$\omega_* = V_* = Q_*,$$

которому соответствует мощность на валу двигателя

$$P'_* = M_* \omega_* = [M_{x^*} + (1 - M_{x^*})] Q_* = Q_*.$$

На рис. 4.10 показаны зависимости мощности на валу двигателя для конвейера с моментом холостого хода $M_x = 0,3 M_H$ для постоянной ($V = \text{const}$) и регулируемой ($F_r = \text{const}$) скоростей ленты.

Заштрихованная на рисунке область соответствует экономии мощности, получаемой за счет регулирования скорости

$$\Delta P_* = P_* - P'_* = M_{x^*} (1 - Q_*).$$

Таким образом, эффект от регулирования скорости тем выше, чем больше момент холостого хода и чем значительнее снижается производительность конвейера.

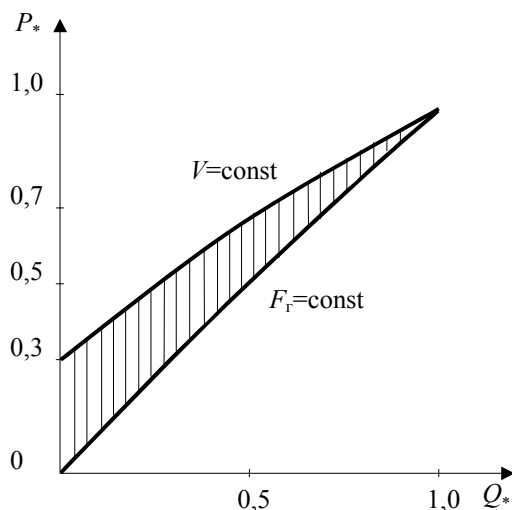


Рис. 4.10. Зависимости мощности на валу двигателя от производительности конвейера при холостом ходе

4.2.4. Регулирование скорости грузоподъемных машин

Для механизмов грузоподъемных машин (кранов, лифтов) применяются различные системы асинхронного привода, которые можно разделить на две группы. Первая реализуется на основе релейно-контакторной аппаратуры с использованием реостатного регулирования, динамического торможения, многоскоростных двигателей и т.д. Вторая группа выполняется с полупроводниковыми устройствами: с преобразователями напряжения, частоты, импульсными регуляторами. Для кранов и лифтов массового назначения до настоящего времени в основном находят применение системы электроприводов первой группы, в которых отсутствуют управляемые полупроводниковые преобразователи. Однако релейно-контакторные системы управления часто не обеспечивают желаемых энергетических показателей и качества регулирования координат в электроприводах рассматриваемого класса. Поэтому до сих пор имеется потребность разработки более совершенных электроприводов второй группы.

Выбор системы электропривода для данных механизмов зависит от стоимости, массогабаритных, энергетических показателей, надежности оборудования и существенно образом определяется условиями и уровнем эксплуатации. Поскольку грузоподъемные машины имеют массовое применение, то для них часто требуются максимально простые и дешевые электроприводы, которые имели бы по возможности простое схемное выполнение и вместе с тем обладали бы требуемыми техническими

показателями. Одной из таких систем является система преобразователь напряжения – асинхронный двигатель.

Приводные двигатели крановых и лифтовых механизмов работают в повторно-кратковременном режиме. При этом основную часть рабочего времени (60÷70 % и более) приводной двигатель вращается с высокой частотой, близкой к номинальной, и примерно до 15 % – с пониженной частотой. В процессе работы на высокой частоте АД лучше всего подключать непосредственно к сети. Следовательно, в течение большей части рабочего времени между питающей сетью и статором АД никакой преобразователь не нужен. В течение же небольшой части рабочего времени управляемый преобразователь электрической энергии необходим как для обеспечения пониженной частоты вращения ротора, так и для надлежащего формирования переходных процессов пуска и торможения.

В качестве управляемого преобразователя лучше всего подходит ПЧ, поскольку он обеспечивает более высокое качество регулирования координат АД (скорости, момента, тока). При работе на высокой скорости больше подходит ТРН, так как при нулевом угле управления тиристоры полностью открыты и сеть не загружается высшими гармониками. В случае же использования ПЧ при работе на высокой скорости (и номинальной частоте) возникают определенные проблемы, связанные либо с известными трудностями по обеспечению генераторного режима с рекуперацией энергии в сеть (такой режим является характерной особенностью для рассматриваемого класса механизмов) при наличии инвертора напряжения, либо с ухудшением коэффициента мощности при наличии инвертора тока.

Основным режимом работы системы ТРН–АД (тиристорный регулятор напряжения – асинхронный двигатель) является фазовый [13]. Исследования показывают, что технические возможности этой системы можно значительно расширить за счет специальных режимов АД: квазичастотного и шагового.

При осуществлении квазичастотного управления частоты значимых гармоник выражаются в виде

$$f_n = \frac{f_{n1}(m_1 + l_1)q_1 + f_{n2}(m_2 + l_2)q_2}{(m_1 + l_1)q_1 + (m_2 + l_2)q_2},$$

$$\text{где } f_{n1} = f_c \left[1 - \frac{T_c}{t_r} \frac{k_1}{(m_1 + l_1)} \right]; \quad f_{n2} = f_c \left[1 - \frac{T_c}{t_r} \frac{k_2}{(m_2 + l_2)} \right].$$

Здесь: $m_1, l_1, q_1, m_2, l_2, q_2$ – параметры квазичастотного управления; f_c – частота сети; t_T – минимальное время такта переключения; $k_1, k_2 = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа, удовлетворяющие неравенству

$$k_1 q_1 + k_2 q_2 \leq 2[(m_1 + l_1)q_1 + (m_2 + l_2)q_2] \frac{t_T}{T_c}.$$

Частоту f_n значимой гармоники напряжения можно приблизить к любой заданной частоте в области между f_{n1} и f_{n2} . Следовательно, изменив параметры квазичастотного управления, можно осуществить в широком диапазоне плавное регулирование частоты значимой гармоники.

На рис. 4.11 приведена схема управления АД, в которой обеспечивается как квазичастотный, так и фазовый режимы управления. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) снабжена двумя входами: входом управления и релейным входом блокировки, к которому подключен блок квазичастотного управления (БКЧУ). При изменении U_y осуществляется регулирование амплитуд значимых гармоник напряжения на статоре АД, а при изменении параметров квазичастотного управления – регулирование частоты этих гармоник.

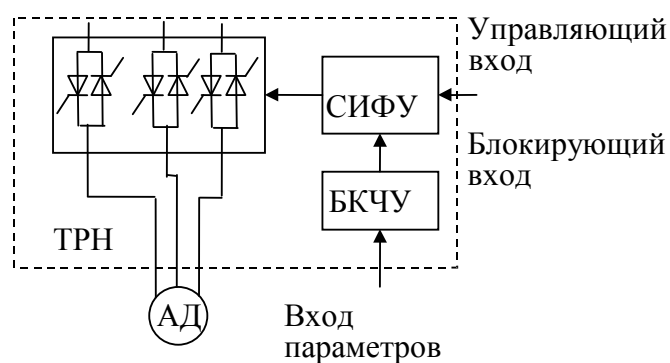


Рис. 4.11. Схема управления АД с квазичастотным и фазовым режимами

На рис. 4.12 изображены два семейства экспериментальных механических характеристик 1–5 и 6–8, которые получены при осуществлении указанного способа. На рисунке: 1 – $m_1 = 2, l_1 = 6$; 2 – $m_1 = 2, l_1 = 6, q_1 = 3, m_2 = 3, l_2 = 6, q_2 = 1$; 3 – $m_1 = 2, l_1 = 6, q_1 = 1, m_2 = 3, l_2 = 6, q_2 = 1$; 4 – $m_1 = 2, l_1 = 6, q_1 = 1, m_2 = 3, l_2 = 6, q_2 = 3$; 5 – $m_2 = 3, l_2 = 6$; 6 – $m_1 = 4, l_1 = 12$; 7 – $m_1 = 4, l_1 = 12, q_1 = 2, m_2 = 5, l_2 = 12, q_2 = 1$; 8 – $m_2 = 5, l_2 = 12$; 9 – естественная характеристика.

В каждом из этих семейств механические характеристики расположены близко друг к другу, что говорит о высокой плавности регулирования скорости.

Квазичастотное управление имеет следующие достоинства: обеспечение стабильной пониженной скорости в разомкнутой системе управления, регулирование момента в широком диапазоне с плавным переходом из двигательного режима АД в тормозной, осуществление электрического торможения в определенной зоне скоростей.

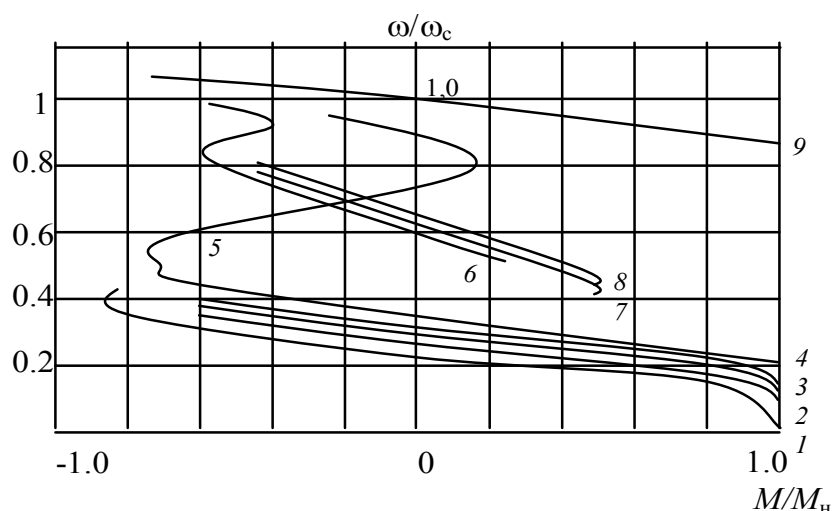


Рис. 4.12. Семейства экспериментальных механических характеристик

Кроме достоинств, такое управление имеет и недостатки: трудность обеспечения торможения вблизи синхронной скорости, а также наличие шума и вибраций АД. Последний недостаток является наиболее существенным. Вместе с тем квазичастотное управление представляет значительный интерес для виброприводов, в которых рабочий орган совершает колебательное движение. Квазичастотный режим представляет интерес и как специальный режим работы электропривода, выполненного по системе ТРН–АД. Рациональное сочетание квазичастотного, шагового и фазового режимов значительно расширяет функциональные возможности этой системы. На базе системы ТРН–АД разработаны электроприводы механизма передвижения однобалочных мостовых кранов и тельферов.

Значительный интерес представляет использование ТРН для управления низкоскоростными линейными асинхронными двигателями (ЛАД), которые, в отличие от АД, имеют ряд особенностей. Из-за повышенного воздушного зазора у ЛАД большой намагничивающий ток, а ток индуктора мало зависит от скорости (скольжения). Поэтому элек-

трические потери в первичных обмотках ЛАД при питании от ПЧ или ТРН не так резко отличаются между собой, как в АД. Также из-за повышенного воздушного зазора быстрее затухают электромагнитные переходные процессы и имеет место более высокая устойчивость работы электропривода в замкнутых системах регулирования. В системах ТРН–ЛАД при фазовом управлении с обратной связью по скорости обеспечивается регулирование в диапазоне до (150–200):1 без корректирующих устройств, а при квазичастотном управлении в разомкнутой системе регулирование скорости осуществляется в диапазоне (10–15):1 и выше при плавном переходе из двигательного режима в тормозной. Система ТРН–ЛАД, в частности, может быть использована для осуществления безредукторного электропривода кабины лифта.

4.3. Выбор рационального способа регулирования скорости в зависимости от характера изменения нагрузки

4.3.1. Выбор способа регулирования скорости при постоянной нагрузке

В регулируемом электроприводе при изменении скорости имеет место изменение нагрузки двигателя. В то же время для полного использования двигателя его мощность должна быть выбрана так, чтобы нагрузка при работе на новой скорости не превосходила допустимой по условиям нагрева. Достигается это выбором соответствующего способа регулирования, при котором соблюдается данное условие.

Способы регулирования скорости по условию допустимой нагрузки делятся на две группы:

- регулирование при постоянном моменте (изменение напряжения на якоре ДПТ или статоре СД, изменение сопротивления в роторе АД или якоре ДПТ, в некоторых каскадных схемах, в вентильном двигателе);
- регулирование при постоянной мощности (ослабление магнитного потока ДПТ, изменение числа пар полюсов АД, в некоторых каскадных схемах).

Регулирование скорости при постоянном моменте обеспечивает регулирование скорости вниз от номинальной, т.е. $\omega_H = \omega_{\max}$. Номинальный момент двигателя равен моменту нагрузки, т.е. $M_H = M_C$ и номинальная мощность равна

$$P_H = M_H \omega_H = M_C \omega_{\max} = P_{C \max}.$$

Таким образом, номинальная мощность двигателя равна максимально возможной и при этом на всех скоростях двигатель загружен

полностью и работает в нормальном тепловом режиме, т.е. способ регулирования скорости является рациональным.

Для регулирования скорости при постоянной мощности характерно регулирование скорости вверх от номинальной, поэтому за номинальную скорость двигателя принимают минимальную скорость в диапазоне, т.е. $\omega_n = \omega_{\min}$. Поскольку номинальная мощность двигателя равна максимальной мощности нагрузки $P_{c \max} = M_c \omega_{\max}$, то номинальный момент двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_{c \max}}{\omega_{\min}} = \frac{M_c \omega_{\max}}{\omega_{\min}} = M_c D,$$

где $D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ – диапазон регулирования.

Из выражения видно, что номинальный момент двигателя должен в D раз превосходить момент нагрузки. Двигатель загружен полностью только на максимальной скорости ω_{\max} , когда по якору протекает номинальный ток, а магнитный поток минимален. При других, меньших скоростях поток двигателя увеличивается, ток в якоре уменьшается и тем самым двигатель оказывается недоиспользуемым по условиям нагрева. Оказывается завышенным габарит двигателя, который определяется номинальным моментом.

Таким образом, при постоянной нагрузке использование способов регулирования скорости при постоянной мощности оказывается нерациональным, т.к. требует завышения габаритов двигателя.

4.3.2. Выбор способа регулирования скорости при постоянной статической мощности

Регулирование скорости при постоянном моменте возможно только вниз от номинальной, за номинальную скорость двигателя принимаем максимальную скорость в диапазоне, т.е. $\omega_n = \omega_{\max}$. Максимальный момент двигателя, на который он должен быть выбран при $P_c = \text{const}$, соответствует минимальной скорости

$$M_{c \max} = \frac{P_c}{\omega_{\min}} = M_n.$$

Следовательно, номинальная мощность двигателя

$$P_n = M_n \omega_n = \frac{P_c \omega_{\max}}{\omega_{\min}} = P_c D,$$

т.е. она должна быть в D раз больше мощности нагрузки P_c . Это означает, что при работе двигателя на всех скоростях, кроме минимальной, он будет недогружен и недоиспользован по нагреву.

Регулирование скорости при постоянной мощности обеспечивает регулирование скорости вверх от номинальной. Тогда в качестве номинальной должна быть принята минимальная скорость в заданном диапазоне, т.е. $\omega_n = \omega_{\min}$, а номинальный момент

$$M_n = \frac{P_c}{\omega_{\min}} = \frac{P_c}{\omega_n}.$$

Тогда номинальная мощность выбираемого двигателя

$$P_n = M_n \omega_n = \frac{P_n \omega_n}{\omega_n} = P_c,$$

т.е. равна мощности нагрузки. Двигатель при этом загружен полностью на всех скоростях и будет работать в нормальном тепловом режиме.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод – для выбора минимального по габариту двигателя и обеспечения его полного использования по нагреву необходимо, чтобы способ регулирования его скорости по показателю допустимой нагрузки соответствовал зависимости нагрузки от скорости. При нагрузке вида $M_c = \text{const}$ целесообразно использование способов регулирования при постоянном моменте, а при $P_c = \text{const}$ – при постоянной мощности.

4.4. Повышение загрузки электропривода. Исключение режима холостого хода

Повышение загрузки электропривода до номинального значения и максимально возможное исключение режима холостого хода позволяет снизить энергопотребление за счет увеличения КПД и коэффициента мощности привода.

При коэффициенте нагрузки, меньшем, чем $0,4 \div 0,5$, необходима замена на двигатель меньшей мощности. Если $(0,4 \div 0,5) \leq k_3 \leq (0,7 \div 0,75)$, целесообразность замены должна быть подтверждена уменьшением суммарных потерь энергии в двигателе и в сети:

$$\frac{1 - \eta_1}{\eta_1} + k_3 \frac{\text{tg}\varphi_1}{\eta_1} > \frac{1 - \eta_2}{\eta_2} + \frac{\text{tg}\varphi_2}{\eta_2},$$

где η_1, η_2 – КПД сравниваемых двигателей при заданной нагрузке; $\text{tg}\varphi_1, \text{tg}\varphi_2$ – тангенсы углов φ_1 и φ_2 , соответствующие значениям коэф-

фициента мощности $\cos\varphi_1$ и $\cos\varphi_2$; k_3 – коэффициент повышения потерь, кВт/квар, который определяет потери активной мощности, приходящиеся на передачу 1 квар в данной системе электроснабжения.

Величина коэффициента повышения потерь k_3 может быть определена из табл. 4.1, а если он не задан, его принимают равным 0,07 кВт/квар для высоковольтных потребителей или 0,125 кВт/квар для низковольтных потребителей.

Таблица 4.1

Характеристики трансформаторов и систем электроснабжения

Тип трансформатора	k_3 , кВт/квар	
	в часы максимума	в часы минимума
Трансформаторы, питающиеся непосредственно от шин электростанций	0,02	0,02
Сетевые трансформаторы, питающиеся от электростанций на генераторном напряжении	0,07	0,04
Понижающие трансформаторы 110/35/10 кВ, питающиеся от районных сетей	0,1	0,06
Понижающие трансформаторы 10/6/0,4 кВ, питающиеся от районных сетей	0,15	0,1

Режим холостого хода привода является экономически нецелесообразным, поскольку приводит к необоснованному потреблению активной энергии

$$W = P_x t_x,$$

где P_x – мощность, потребляемая из сети на холостом ходу за время t_x .

Кроме того, увеличиваются потери энергии при передаче излишней реактивной мощности. Ориентировочное потребление реактивной энергии Q в функции коэффициента загрузки при $Q_x = 0,4 P_n$ представлено на рис. 4.13.

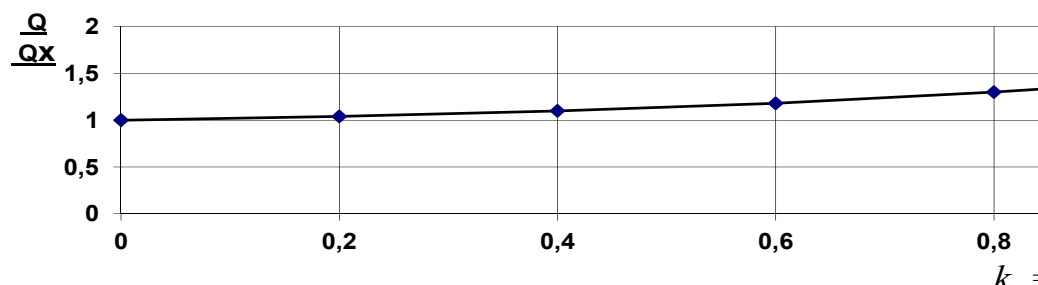


Рис. 4.13. Зависимость потребления реактивной энергии от коэффициента загрузки

Потери активной мощности $\Delta P_{\text{л}}$ и энергии $\Delta W_{\text{л}}$ в трехфазных линиях:

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r \cdot 10^{-3};$$

$$\Delta W_{\text{л}} = \Delta P_{\text{л}} t_{\text{р}},$$

где $r = \frac{\rho L}{S}$ – активное сопротивление провода или шины кабеля, Ом;

ρ – удельное сопротивление материала провода при 20 °С (для алюминия 0,026÷0,029; для меди 0,0175÷0,018; для стали 0,1÷0,14 Ом·мм²/м); L – длина линии, м; S – сечение проводника, мм²; P, Q – соответственно расчетная активная и реактивная мощности, передаваемые через линию, кВт, квар; U – линейное напряжение, кВ; $t_{\text{р}}$ – продолжительность работы за расчетный период, ч.

Потери активной мощности в двухобмоточном трансформаторе

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P'_{\text{x}} + \Delta P_{\text{по}} + k_{\text{зт}}^2 \Delta P'_{\text{к}},$$

где $\Delta P_{\text{по}}$ – потери на принудительное охлаждение (учитываются только для мощных трансформаторов, имеющих систему принудительного охлаждения); $\Delta P'_{\text{x}} = \Delta P_{\text{x}} + k_3 \Delta Q_{\text{x}}$ – приведенные потери мощности холостого хода; $\Delta P'_{\text{к}} = \Delta P_{\text{к}} + k_3 \Delta Q_{\text{к}}$ – приведенные потери мощности короткого замыкания; ΔP_{x} – потери холостого хода при номинальном напряжении (по паспорту); $\Delta P_{\text{к}}$ – потери короткого замыкания при номинальной нагрузке (по паспорту); $k_{\text{зт}} = \frac{S_{\text{ф}}}{S_{\text{н}}}$ – коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению фактической нагрузки трансформатора $S_{\text{ф}}$ к его номинальной мощности $S_{\text{н}}$; $\Delta Q_{\text{x}} = S_{\text{н}} \frac{I_{\text{x}}}{100}$ – реактивные потери холостого хода трансформатора; I_{x} – ток холостого хода трансформатора (по паспорту); $\Delta Q_{\text{к}} = S_{\text{н}} \frac{U_{\text{к}}}{100}$ – реактивные потери короткого замыкания трансформатора; $U_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания трансформатора (по паспорту).

При расчете экономического эффекта от замены незагруженных двигателей большей мощности на двигатели меньшей мощности необходимо знать суммарные потери активной мощности

$$\Delta P = \left[Q_{\text{x}} (1 - k_3^2) + k_3^2 Q_{\text{н}} \right] k_3 + \Delta P_{\text{x}} + k_3^2 P_{\text{н}},$$

где $Q_x = \sqrt{3} U_n I_x$ – реактивная мощность, потребляемая электродвигателем из сети при холостом ходе; I_x – ток холостого хода электродвигателя; $k_3 = \frac{P_{cp}}{P_n}$ – коэффициент загрузки электродвигателя; P_{cp} – средняя на-

грузка электродвигателя; $Q_n = \frac{P_n \operatorname{tg} \varphi_n}{\eta_n}$ – реактивная мощность электродвигателя при номинальной нагрузке; $\operatorname{tg} \varphi_n = \operatorname{tg}(\arccos \varphi_n)$;

$\Delta P_x = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \frac{k_p}{1 + k_p}$ – потери активной мощности при холостом ходе

двигателя; $\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \frac{1}{1 + k_p}$ – прирост потерь активной мощности

в двигателе при номинальной (100 %) нагрузке; $k_p = \frac{\Delta P_x^*}{(1 - \eta_n) - \Delta P_x^*}$; ΔP_x^* – потери холостого хода, отнесенные к номинальной мощности двигателя.

Коэффициент k_p имеет следующие значения для разных типов двигателей:

$0,5 \leq k_p \leq 1$ – ДПТ последовательного возбуждения;

$1 \leq k_p \leq 2$ – ДПТ независимого возбуждения;

$0,5 \leq k_p \leq 1$ – асинхронные.

Нижние значения коэффициента соответствуют тихоходным двигателям, верхние – быстроходным.

4.5. Снижение напряжения на зажимах электродвигателя

При невозможности замены малозагруженных двигателей следует проверить целесообразность снижения напряжения на его зажимах. Снижение напряжения питания АД приводит к уменьшению потребления реактивной мощности (за счет снижения тока намагничивания) и, тем самым, к повышению $\cos \varphi$. При этом одновременно уменьшаются потери активной мощности, т.е. увеличивается КПД двигателя.

Возможны следующие методы снижения напряжения у малозагруженных асинхронных двигателей:

- переключение статорной обмотки с «треугольника» на «звезду»;
- секционирование статорных обмоток;
- понижение напряжения в силовых цепях предприятий переключением ответвлений понижающих трансформаторов;

- применение простейшего регулируемого электропривода по схеме ТРН–АД.

Переключение статорной обмотки АД с «треугольника» на «звезду» обычно рекомендуют для двигателей напряжением до 1000 В, загруженных менее чем на 30 %. Эффективность мероприятий поясняется рис. 4.14 (здесь представлены графики для значений $\cos\varphi_H = 0,78; 0,82; 0,86; 0,9$) и рис. 4.15.

Величина момента, развиваемого асинхронным двигателем, пропорциональна квадрату напряжения питающей сети. Поэтому при переключении обмоток статора с «треугольника» на «звезду» вследствие снижения момента необходимо производить проверку по перегрузочной способности и величине пускового момента.

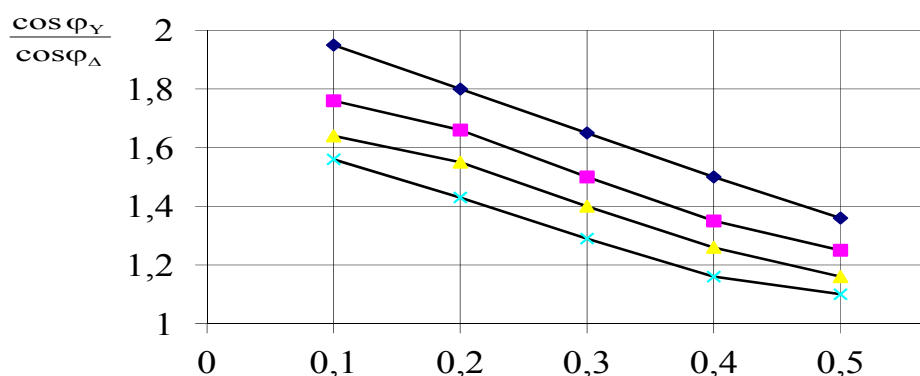


Рис. 4.14. Зависимости $\cos\varphi$ от коэффициента загрузки двигателя

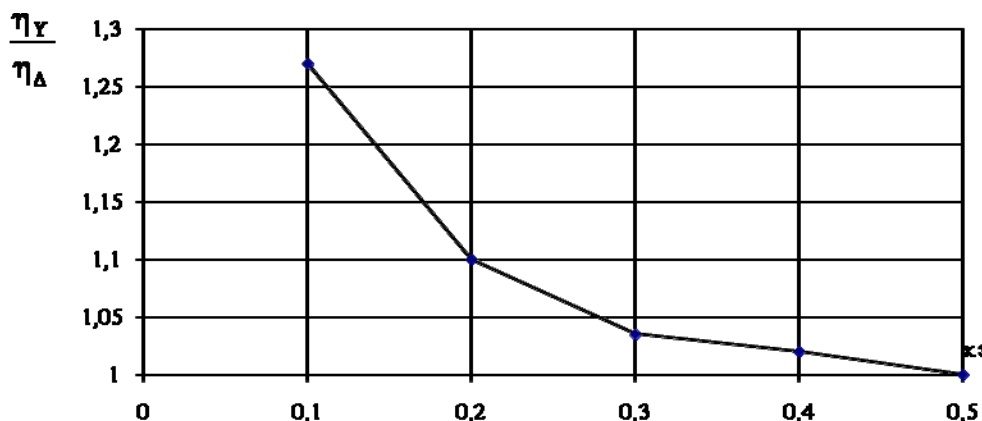


Рис. 4.15 Зависимости КПД двигателя при переключении с «треугольника» на «звезду»

Секционирование рекомендуется, если невозможно воспользоваться предыдущим способом. Если двигатели изготовлены с параллельны-

ми ветвями в статорной обмотке, то секционирование осуществляют путем перепайки лобовых соединений обмотки. Если же обмотка выполнена одиночным проводом, то переключение секций обмотки возможно лишь при капитальном ремонте.

Переключение ответвлений понижающего трансформатора часто применяют на практике. Это мероприятие рационально производить, если трансформатор не питает одновременно другие приемники, которые не допускают снижения напряжения на их зажимах. Понижая напряжение питающей сети, следует помнить, что при этом возрастают потери и в самой сети. А в трансформаторах суммарные потери активной мощности при изменении напряжения в большинстве случаев не меняются.

Снижение напряжения влияет и на тепловой режим асинхронных двигателей. Так, при номинальной нагрузке и номинальной частоте питающей сети снижение напряжения на 10 % приводит к росту перегрева двигателя также на 10 %. Однако следует учитывать, что при загрузке двигателя, составляющей 90 %, допустимо снижать напряжение на 13 %, а при $k_3 = 0,8$ – напряжение можно снижать на 22 %, без опасности перегрева двигателя свыше допустимого.

На практике используют отключение части приводных двигателей при недогрузке, например, многодвигательного конвейера. Но это нецелесообразно, поскольку из-за вращения работающими двигателями неработающих приводных блоков потери мощности почти не уменьшаются. А износ редукторов, связанных с неработающими двигателями, может быть не меньше, чем у работающих.

Анализ показывает, что электроприводы большого числа производственных механизмов имеют завышенную мощность, в 1,5–2,5 раза превышающую необходимую. Кроме того, электроприводы некоторых механизмов (прессов, кузнечного оборудования, станков) часть времени работают с недогрузкой.

Указанные особенности позволяют снизить электропотребление недогруженного асинхронного двигателя при работе в зоне номинальной скорости, обеспечив его работу за счет ТРН на регулировочной ($U_1 < U_H$), а не на естественной характеристике, где U_1 – действующее значение первой гармоники напряжения, приложенного к двигателю; U_H – действующее значение номинального напряжения сети. Этот режим работы иллюстрирует рис. 4.16, где цифрами 1 и 2 обозначены естественная и регулировочная механические характеристики при управлении от ТРН; s_1 и s_2 – скольжение на естественной и регулировочных характеристиках при заданном M_c .

Электромагнитные потери в двигателе

$$\Delta P = V_1 + V_2 + K_{c1}.$$

При работе на естественной характеристике

$$V_1 = [A + (1 - A)\mu_c^2]V_{1н};$$

$$V_2 = \mu_c^2 V_{2н};$$

$$K_{c1} = [B + (1 - B)\mu_c^2]K_{c1н},$$

где $V_{1н}$, $V_{2н}$, $K_{c1н}$ – номинальные потери в меди статора, ротора, стали статора; $\mu_c = \frac{M_c}{M_n}$ – относительное значение момента статической нагрузки;

$A \approx (I_0/I_n)^2$; I_0 – ток холостого хода двигателя при питании номинальным напряжением; B – конструктивный коэффициент ($B = 0,96 \div 0,98$ для двигателей единой серии, $B = 0,94 \div 0,97$ для двигателей краново-металлургических серий).

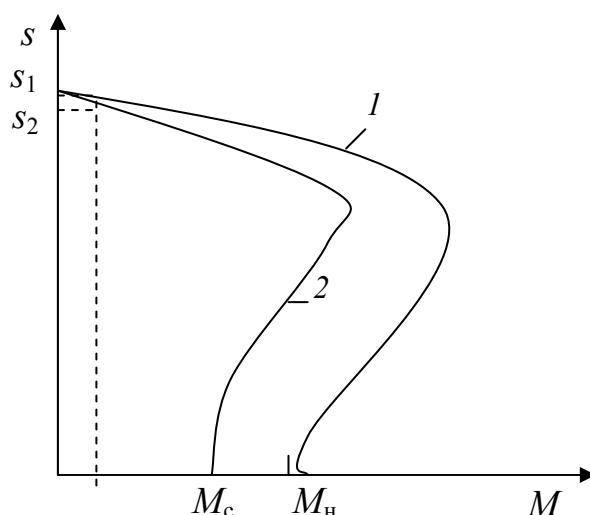


Рис. 4.16. Естественная и регулировочная характеристики

При работе на регулировочной характеристике 2, реализуемой за счет ТРН,

$$V_1 = 1,1\mu_c \left[A \frac{s_H}{s} + (1 - A) \frac{s}{s_H} \right] V_{1H};$$

$$V_2 \cong 1,1\mu_c \frac{s}{s_H} V_{2H};$$

$$K_{c1} = \mu_c \left[B \frac{s}{s_H} + (1 - B) \frac{s}{s_H} \right] K_{c1H}.$$

При работе с пониженным напряжением, когда $U_1 < U_H$, незначительно снижается скорость двигателя, увеличиваются потери V_2 , уменьшаются потери V_1 и K_{c1} , но их перераспределение таково, что значение ΔP при работе на характеристике 2 оказывается меньше, чем при работе на естественной характеристике. Существуют методики выбора оптимального значения s_2 , при котором обеспечивается минимальное значение электромагнитных потерь. В этом случае удастся снизить потребление энергии в 1,5–2 раза. Экономия электроэнергии будет тем больше, чем меньше момент двигателя по сравнению с номинальным и чем больше время работы двигателя с недогрузкой.

Эффект усиливается при использовании асинхронных двигателей с относительно высоким значением тока холостого хода статора. Так, если асинхронный двигатель МТКФ012-6 ($P_H = 2,2$ кВт) обеспечивает, работая в повторно-кратковременном режиме, 60 включений в час при времени работы на установившейся скорости $t_y = 30$ с и числе часов работы в году $T = 6000$ ч, то при работе на регулировочной характеристике со скольжением s_2 удастся сэкономить за год 210 кВт·ч – при $M_c = 0,5M_H$; 660 кВт·ч – при $M_c = 0,25M_H$; 1150 кВт·ч – при $M_c = 0,05M_H$ по сравнению с работой на естественной характеристике при s_1 .

4.6. Использование синхронной машины как компенсатора реактивной мощности

Работа системы электроснабжения характеризуется потреблением электроприемниками реактивной мощности. Это вызывает:

- дополнительные потери энергии в системе;
- снижение уровня напряжения и необходимость иметь повышенную пропускную способность подстанций и распределительных сетей, что снижает экономичность работы системы.

В связи с этим необходимо производить компенсацию реактивной мощности. Одним из эффективных способов компенсации является ис-

пользование синхронной машины, которая за счет регулирования тока возбуждения может осуществлять генерацию реактивной мощности в электрическую сеть. В этом случае СД работает с опережающим $\cos\varphi$.

Возможность работы СД в качестве источника (компенсатора) реактивной мощности иллюстрируют V-образные характеристики (рис. 4.17), которые представляют собой зависимости тока статора двигателя I_1 и его $\cos\varphi$ от тока возбуждения I_B при $U_\Phi = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ и $P_1 = \text{const}$. Зависимости тока $I_1(I_B)$ имеют минимум, которому соответствует максимум коэффициента мощности $\cos\varphi = 1$, что объясняется с помощью векторной диаграммы СД (рис. 4.18).

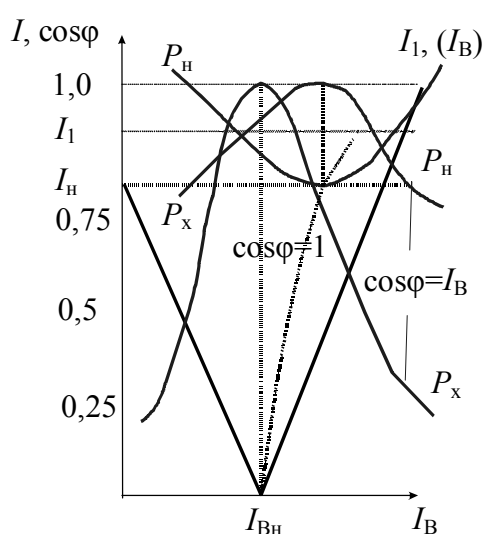


Рис. 4.17. Зависимость тока статора от тока возбуждения

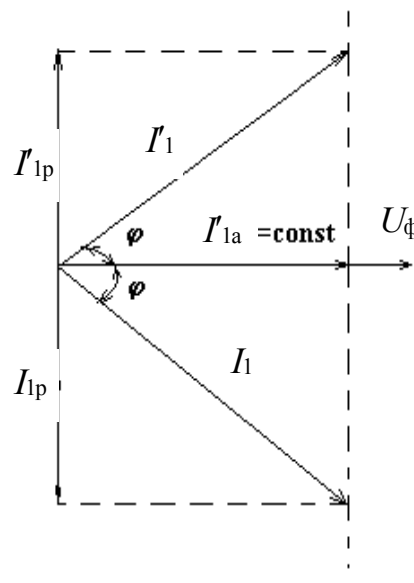


Рис. 4.18. Векторная диаграмма СД

При небольших токах возбуждения ток статора I_1 отстает от напряжения U_Φ на угол φ , что соответствует работе СД с отстающим $\cos\varphi$ и потреблению им реактивной мощности из питающей сети. Активная составляющая полного тока $I_{1a} = I_1 \cos\varphi$ совпадает по направлению с вектором напряжения сети U_Φ , а реактивная составляющая I_{1p} отстает от него на 90° , что и определяет потребление реактивной мощности.

Пусть СД работает при постоянной нагрузке и потребляет из сети активную мощность

$$P_1 = 3 U_\Phi I_1 \cos\varphi = 3 U_\Phi I_{1a}.$$

Из выражения следует, что при $P_1 = \text{const}$ и ток $I_{1a} = \text{const}$. Поэтому при увеличении тока возбуждения СД конец вектора полного тока I_1 будет перемещаться вверх по штриховой вертикальной линии, что озна-

чает уменьшение реактивной составляющей тока. При некотором токе возбуждения, близком к номинальному, реактивная составляющая тока станет равной нулю, т.е. ток статора будет равен активной составляющей I_{1a} . Этому режиму и будет соответствовать точка минимума кривых токов $I_1(I_B)$ и максимально возможное значение $\cos\varphi = 1$.

При дальнейшем увеличении тока возбуждения (перевозбуждение СД) вновь появится реактивная составляющая тока I'_{1p} , но уже опережающая напряжение сети на 90° . Ток статора I'_1 также будет опережать напряжение сети и СД будет работать с опережающим $\cos\varphi$, отдавая реактивную энергию в питающую сеть.

На рис. 4.17 показаны зависимости при двух уровнях нагрузки – номинальной (P_H) и при холостом ходе (P_X). Область характеристик справа от штрихпунктирной линии ($\cos\varphi = 1$) соответствует работе СД с опережающим $\cos\varphi$, а слева – с отстающим. Из рисунка видно, что с ростом мощности нагрузки область генерации реактивной мощности (опережающего $\cos\varphi$) смещается в сторону больших токов возбуждения. Таким образом, если СД работает с переменной нагрузкой на валу, то для полного использования его компенсирующих свойств требуется соответствующее изменение его тока возбуждения, что ведет к увеличению габаритной мощности двигателя.

Отношение полной (габаритной) мощности к активной

$$\frac{S}{P} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{P} = \sqrt{1 + \left(\frac{Q}{P}\right)^2}.$$

Пусть требуемая реактивная опережающая мощность составляет 40 % активной мощности, т.е. $Q/P = 0,4$. Расчет по формуле показывает, что при этом отношение S/P составит 1,08, т.е. генерирование указанной реактивной мощности потребует увеличения габаритной мощности только на 8 %.

Отдаваемая или потребляемая реактивная мощность СД

$$Q = 3 U_\phi I_1 \sin\varphi.$$

Более удобное выражение можно получить из векторных диаграмм. Для явнополюсного двигателя

$$Q = 3U_\phi \left[\frac{E \cos\theta}{X_d} - U_\phi \left(\frac{\cos^2\theta}{X_d} + \frac{\sin^2\theta}{X_q} \right) \right],$$

где X_d и X_q – индуктивные сопротивления СД соответственно по продольной и поперечной осям.

Для неявнополюсного $X_d = X_q = X_1$

$$Q = \frac{3U_\phi}{X_1} (E \cos \theta - U_\phi).$$

Приведенные выражения подтверждают, что с увеличением тока возбуждения и тем самым электродвижущей силы растет генерируемая двигателем реактивная мощность, значение которой при этом зависит от нагрузки, определяющей угол нагрузки θ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов М.В. Определение параметров фильтрующих устройств для обеспечения электромагнитной совместимости электроприводов // Электротехника. – 1999. – № 11. – С. 37–41.
2. Барский В.А. и др. Создание серии IGBT преобразователей частоты для регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. – 1999. – № 7. – С. 38–41.
3. Браславский И.Я. О возможностях энергосбережения при использовании регулируемых асинхронных электроприводов // Электротехника. – 1998. – № 8. – С. 2–5.
4. Галанов В.И. и др. Современные мощные полупроводниковые приборы и их функциональные особенности // Электротехника. – 1998. – № 3. – С. 48–52.
5. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
6. Изосимов Д.Б., Козаченко В.Ф. Алгоритмы и системы цифрового управления электроприводами переменного тока // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 41–51.
7. Ильинский Н.Ф. Перспективы применения вентильно-индукторного привода в современных технологиях // Электротехника. – 1997. – № 2. – С. 1–3.
8. Калашников Б.Е. Опыт разработки и внедрения IGBT-инверторов для асинхронного электропривода // Электротехника. – 1998. – № 7. – С. 24–31.
9. Луговой А.В. Итоги научно-производственного семинара «Проблемы энергосбережения в промышленности» // Проблемы создания новых машин и технологий: научные труды КГПИ. – Кременчуг, 1998. – Вып. 2.
10. Луговой А.В. К теории энергосбережения средствами промышленного электропривода // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 62–67.
11. Лезнов Б.С., Чебанов В.Б. Применение регулируемого электропривода в насосных установках систем водоснабжения и водоотлива // Электротехника. – 1995. – № 7. – С. 9–12.
12. Мамалыга В.М. Энергосбережение в системах электропривода. – Киев.: Энергетический центр ЕС в Киеве, 1995. – 86 с.
13. Масандилов Л.Б. Применение систем электропривода тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель для грузоподъемных машин // Электротехника. – 1995. – № 10. – С. 24–27.

14. Москаленко В.В. Электрический привод. – М.: Высш. шк., 1991. – 430 с.
15. Накопители энергии: учебное пособие для вузов / Д.А. Бут и др. – М. Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
16. Прня Р. Качество напряжения – новое в решении проблемы компенсации реактивной мощности // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 32–34.
17. Розанов Ю.К., Флоренцев С.Н. Электропривод и силовая электроника // Электротехника. – 1997. – № 11. – С. 7–12.
18. Розанов Ю.К. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 28–32.
19. Современная элементная база силовой электроники - Элементная база и схемотехника устройств силовой электроники – <http://leg.co.ua/knigi/raznoe/elementnaya-baza-i-shemotehnika-ustroystv-silovoy-elektroniki.html>
20. Флоренцев С.Н. Состояние и перспективы развития приборов силовой электроники на рубеже столетий // Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 2–7.
21. Хашимов А.А. Энергосберегающие системы автоматизированного электропривода переменного тока // Электротехника. – 1995. – № 11. – С. 34–39.
22. Энергоаудит и нормирование расходов энергоресурсов: Сборник методических материалов / Г. Я. Вагин и др. - Нижний Новгород: НГТУ, НИЦЭ, 1998. – 260 с.

Учебное издание

КРАСНОВ Иван Юрьевич

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Учебное пособие

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор ТУСУРа
Анатолий Антонович Светлаков

Кандидат технических наук, доцент СГТА
Сергей Николаевич Кладиев

Редактор
Кандидат технических наук, доцент
Бурулько Лев Кириллович


**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати . Формат 60×84/16.
Бумага «Снегурочка». Печать Хегох.
Усл. печ.л. 10,7. Уч.-изд. л. 9,68.
Заказ . Тираж 150 экз.



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

